

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

SEBASTIÃO RIBEIRO JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE
ARBORESCÊNCIAS EM MATERIAIS DIELÉTRICOS POR CONTRASTE DE FASE
DE RAIOS X**

TESE

CURITIBA

2013

SEBASTIÃO RIBEIRO JÚNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE
ARBORESCÊNCIAS EM MATERIAIS DIELÉTRICOS POR CONTRASTE DE FASE
DE RAIOS X**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de “Doutor em Ciências” – Área de Concentração: Engenharia Biomédica.

Orientador: Prof. Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk
Co-Orientador: Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho

CURITIBA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

R484 Ribeiro Júnior, Sebastião
Desenvolvimento de metodologia para análise de arborescências em materiais dielétricos por contraste de fase de raios X / Sebastião Ribeiro Júnior.
188 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Sergei Anatolyevich Pachuk.

Coorientador: Vitoldo Swinka Filho.

Tese (Doutorado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Curitiba, 2013.

Bibliografia: f. 165-170.

1. Cabos elétricos. 2. Energia elétrica – Distribuição. 3. Isoladores e isolantes elétricos. 4. Dielétricos. 5. Polietileno – Deterioração. 6. Processamento de imagens – Técnicas digitais. 7. Meios de contraste (Diagnóstico por imagem). 8. Colapso (Eletricidade) – Prevenção. 9. Engenharia biomédica. 10. Engenharia elétrica – Teses. I. Paschuk, Sergei Anatolyevich, orient. II. Swinka, Filho, Vitoldo, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. IV. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

Biblioteca Central da UTFPR, Campus Curitiba

Título da Tese Nº. 91

**“Desenvolvimento de Metodologia para Análise da
Arborescência em Materiais Dielétricos por
Contraste de Fase de Raio X”**

por

Sebastião Ribeiro Júnior

Orientador: Prof. Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk

Coorientador: Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho

Esta tese foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de DOUTOR EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Engenharia Biomédica, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, às 14h do dia 17 de setembro de 2013. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora, composta pelos doutores:

Prof. Sergei Anatolyevich Paschuk, Dr.
(Presidente – UTFPR)

Prof. Joaquim Teixeira de Assis, Dr.
(UERJ)

Prof. Ricardo Tadeu Lopes, Dr.
(UFRJ)

Prof. Ivan Evseev, Dr.
(UTFPR-FB)

Prof. Walmor Cardoso Godoi, Dr.
(UTFPR)

Prof. Hugo Reuters Schelin, Dr.
(UTFPR)

Visto da Coordenação:

Prof. Ricardo Lüders, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado sabedoria, inteligência e força para executar este trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Sergei Anatolyevich Paschuk, pelo apoio, dedicação e pelos esclarecimentos dos conhecimentos que foram empregados neste trabalho.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Vitoldo Swinka Filho, pelo apoio, incentivo, sugestões, discussões e críticas durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Hugo Reuters Schelin, pela ajuda constante, pelo conhecimento ministrado, pelas sugestões, discussões no desenvolvimento e na elaboração deste trabalho.

À minha esposa e filho Aline Alves da Silva Ribeiro e Guilherme Alves Ribeiro, aos meus pais, Sebastião Ribeiro e Mônica Zimmermann Ribeiro e familiares, Carlos, Shirlei, Deivid, Sheila, Fabio e Marlene por estarem me apoiando nesta grande etapa da minha vida.

Aos técnicos, bolsistas, mestres e doutores que se dedicaram, oferecendo seus conhecimentos em prol do trabalho.

Ao LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, em particular ao Departamento de Tecnologia em Materiais por disponibilizar os recursos materiais e humanos para o desenvolvimento deste trabalho.

À UFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelo o empréstimo de equipamentos.

À UTFPR - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, em especial ao CPGEI - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial por ter me admitido no programa de pós-graduação.

E aos professores Dr. Ivan Evseev, Dr. Ricardo Tadeu Lopes, Dr. Joaquim Teixeira de Assis e Dr. Walmor Cardoso Godoi pela participação e contribuição ao trabalho.

E a todos aqueles que de alguma forma colaboraram para a execução deste projeto.

*“Os que confiam no SENHOR serão
como o monte de Sião, que não se abala, mas
permanece para sempre” Salmos 125:1*

RESUMO

RIBEIRO, Sebastião Júnior. **Desenvolvimento de metodologia para análise de arborescências em materiais dielétricos por contraste de fase de raios X**. 188 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

A ocorrência de arborescências em água (*water tree*) ou elétrica (*electrical tree*) é apontada como o principal fenômeno de degradação em isolações sólidas de cabos de distribuição de energia elétrica. A evolução destas arborescências pode levar a camada de isolamento à ruptura dielétrica e, como consequência, à falha destes equipamentos, com a interrupção do fornecimento de energia elétrica. O entendimento deste fenômeno é necessário para desenvolver métodos de análise e prevenção da ruptura de materiais isolantes. Este trabalho mostra a aplicação da técnica contraste de fase por raios X como metodologia para o estudo das arborescências formadas em materiais isolantes de borracha de propileno etileno (EPR) e polietileno reticulado (XLPE).

Palavra-Chave: envelhecimento, degradação, EPR, XLPE, arborescência e contraste de fase por raios X.

ABSTRACT

RIBEIRO, Sebastião Júnior. *Development of methodology for analysis of water tree in dielectric materials using X-ray phase contrast*. 188 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

The water tree or electrical tree occurrence is identified as the main phenomena in the degradation in solid isolations of the electric energy distribution cables. The water tree evolution can lead to dielectric breakdown of the isolation layer and, consequently, to the failure this equipment and the interruption of the electric energy supply. The understanding this phenomenon is necessary for the development analysis methods and to prevent collapse in the polymeric insulation. This work demonstrates the application of X-ray phase contrast technique as a methodology for the study of the water tree and electrical tree in Ethylene propylene rubber (EPR) and crosslinked polyethylene (XLPE).

Keywords: aging, degradation, EPR, XLPE, electrical tree and X-ray phase contrast.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de uma ampola de raios X.....	26
Figura 2 - Esquema de uma fonte de raios X microfoco.	27
Figura 3 - Diagrama de mudança de fase de uma frente de onda.....	32
Figura 4 - Ilustração do efeito de borda de uma radiografia de contraste de fase com uma fonte pontual de raios X. Na borda da imagem do cilindro, ocorre o realce de borda devido à refração de raios X o qual é definido como contraste de fase	33
Figura 5 – Radiografia por contraste de fase de uma fatia de rim de coelho	34
Figura 6 - Detalhes ampliados de um percevejo, a) é mostrado a parte interna (1), b) a perna, sendo os pelos (2) e a pinça (3)	35
Figura 7 - Imagem de contraste de fase de raios X (PBI), a) tubo de polypropyleno com realce de borda de um defeito (i), b) Medido (o) e simulado (-) sessão transversal da imagem	35
Figura 8 - Imagem de contraste de fase de raios X de um phantom de mamografia	36
Figura 9 - Fotografia (a) microradiografia convencional (c , d) e DER (d) de um feto de <i>Desmodus rotundus</i> (MN67667)	37
Figura 10 - Mecanismo de contraste de fase de raio X de imagem: 1) fonte de radiação; 2 objeto); 3) detector; 4) distribuição de intensidade; 5) imagem do objeto; 6) linha de contorno escura; 7) linha de contorno clara; t área de contraste de fase; d é o diâmetro do objeto, d_i é o diâmetro da imagem; J_{pc} é o contraste de fase de intensidade de sinal; a) fluxo de radiação paralelo, $d = d_i$, $t_1 \sim t_3$, $J_{pc1} \sim J_{pc3}$, b) fonte de radiação com o ponto focal grande, $d \sim d_i$, $t_2 \sim t_3 \gg$, $\ll J_{pc2} \sim J_{pc1}$; c) fonte de radiação pontual (microfocais), $d < d_i$	38
Figura 11 - Ilustração do efeito de ampliação da resolução espacial	40
Figura 12 - Ilustração do efeito da penumbra geométrica	41
Figura 13 - Trilhamento elétrico em cabo isolado XLPE.....	44
Figura 14 - Representação de um eletrodo metálico com ponta aguda gerando descarga corona.	45
Figura 15 - Evolução da rigidez dielétrica no ar em função da pressão	46
Figura 16 - Relação entre o campo elétrico local e o campo elétrico médio no interior do material dielétrico para um vazio plano e um esférico	46

Figura 17 - Linhas de campo nas superfícies equipotenciais	48
Figura 18 - Processos de ruptura dielétrica com variação de campo elétrico e o tempo de operação.....	49
Figura 19 - Processos de ruptura dielétrica em cabos isolados.	49
Figura 20 - Arborescências em cabo isolado XLPE envelhecidos em campo, a) Arborescência em água, b) Arborescência elétrica	51
Figura 21 - Arborescências em água de cabo isolado XLPE envelhecidos em campo	51
Figura 22 - Arborescência elétrica em cabo isolado XLPE envelhecido em campo.....	52
Figura 23 - Componentes do sistema isolante de cabos isolados	54
Figura 24 - Linhas de campo no cabo sem semicondutora e com semicondutora	55
Figura 25 - Linhas de campo elétrico no cabo seccionado.....	56
Figura 26 - Ferramentas usadas em serviço de linha viva. Em (a) e (b) lençóis isolantes, (c) luva isolante e (d) manga isolante	57
Figura 27 - Montagem do corpo de prova no ensaio de ruptura dielétrica pontual, a) visão geral, b) dimensões do furo no corpo de prova	59
Figura 28 - Diagrama esquemático do circuito do ensaio de ruptura dielétrica pontual.	60
Figura 29 - Montagem da amostra no ensaio de rigidez dielétrica.....	60
Figura 30 - Diagrama esquemático da amostra no ensaio de rigidez dielétrica.	61
Figura 31 - Foto da cuba em acrílico utilizada para os processos de ruptura dielétrica nas amostras. A cuba possui um conjunto de eletrodos especificados nas normas da ASTM para ensaios de rigidez dielétrica, a) Vista diagonal, b) Vista superior	62
Figura 32 - Local da ruptura no cabo isolado.....	62
Figura 33 - Máquina de corte axial.....	63
Figura 34 - Amostra de cabo preparado para análise de arborescência.....	64
Figura 35 - Solução de coloração das amostras em aquecimento a) Montagem do sistema com misturador, b) montagem do sistema com condensador e misturador.	64
Figura 36 - Microscópio óptico	65
Figura 37 - Painel de controle dos geradores de raios X fabricante LACTEC	66
Figura 38 - Componente principal da mesa tomográfica para deslocamento da amostra.	67
Figura 39 - Mesa tomográfica.	67

Figura 40 - Foto do protótipo com o gerador de raios X e detector digital de raios X.	68
Figura 41 - Gerador de raios X fabricante Kevex	69
Figura 42 - Geradores de raios X.	70
Figura 43 - Detector de raios X fabricante <i>HAMAMATSU</i>	71
Figura 44 - Detector de raios X sem a tampa de proteção.....	72
Figura 45 - Detector de raios X fabricante <i>PERKINELMER</i>	73
Figura 46 - Visualização do filme mamográficos Min-R S no negatoscópio odontológico. ...	74
Figura 47 - Foto do primeiro sistema utilizado para exposição dos filmes mamográficos por raios X.	75
Figura 48 - Foto do segundo sistema utilizado para exposição dos filmes mamográficos por raios X, acoplado a cabine blindada.	76
Figura 49 - Detector de raios X fabricante Princeton Instruments.	77
Figura 50 - Exemplo da subtração da imagem escura, a) Imagem original, b) Gráfico da imagem original, c) Imagem resultante, d) Gráfico da imagem resultante.	78
Figura 51 - Exemplo da correção do campo luminoso, a) Imagem resultante com fundo corrigido, b) Gráfico da imagem resultante, c) Imagem resultante com correção do campo luminoso, d) Gráfico da imagem resultante.....	79
Figura 52 - Amostra após ensaio de ruptura dielétrica, a) amostra de cabo XLPE, b) amostra de cabo EPR.	80
Figura 53 – Montagem do ensaio de ruptura dielétrica por tensão aplicada em degraus escalonados em cabo isolado em XLPE.....	82
Figura 54 - Amostra de lençóis de borracha natural EPR, a) Amostra 1, b) Amostra 2.	83
Figura 55 - Dimensões das arborescências em água (<i>water trees</i>), a) Amostra 10 – B, b) Amostra 12 – A, c) Amostra 14 – A, d) Amostra 15 – A, e) Amostra 16 – A, f) Amostra 16 – B, g) Amostra 2 – B, h) Amostra 8 – A, i) Amostra 8 – B, j) Amostra 9 – A.	84
Figura 56 - Dimensões de arborescências elétricas (<i>electrical trees</i>), a) Amostra 10 – A, b) Amostra 13 – B, m) Amostra 20 – A.....	84
Figura 57 - Espessura remanescente da arborescência versus tensão de ruptura.	85
Figura 58 - Valores do ensaio de ruptura dielétrica por tensão aplicada em degraus escalonados.....	86
Figura 59 - Imagem na posição frontal do fatiamento da amostra 05.	87
Figura 60 - Imagem na posição diagonal do fatiamento da amostra 05.....	87

Figura 61 - Imagens das fatias na amostra 05 entre a região de ruptura dielétrica, a) vista frontal, b) vista diagonal, c) primeira fatia, d) segunda fatia, e) terceira fatia, f) quarta fatia, g) quinta fatia, h) sexta fatia.	88
Figura 62 - Imagens da quarta fatia da amostra 05 entre a região de ruptura dielétrica, a) região de cima da área de ruptura, b) região de baixo da área de ruptura.	89
Figura 63 - Amostra 4 de cabo isolado com XLPE.	90
Figura 64 - Amostra 03 de cabo isolado com XLPE, a) vista lateral, b) vista superior.	90
Figura 65 - Amostra 7 de cabo com isolamento em EPR, a) vista diagonal, b) visão diagonal da retirada dos corpos de prova, c) corpo de prova com caminho de ruptura inicial, d) corpo de prova com caminho de ruptura final.	91
Figura 66 - Amostra 8 de cabo com isolamento em EPR, a) vista diagonal, b) corpo de prova com caminho de ruptura final, c) corpo de prova cortado com caminho de ruptura inicial.	92
Figura 67 - Cálculos da ampliação da resolução espacial e os cálculos da penumbra geométrica para a fonte microfoco utilizada.	93
Figura 68 - Radiografia de amostra de tubo plástico e fibra óptica com ampliação de 05 vezes, a) imagem radiográfica com gerador de raios X milifoco b) imagem radiográfica com gerador de raios X microfoco.	94
Figura 69 - Radiografia por contraste de fase em tubo plástico com ampliação da resolução espacial de 03 vezes, a) radiografia com tensão de 30 kVp, b) radiografia com tensão de 50 kVp, c) radiografia com tensão de 70 kVp.	95
Figura 70 - Gráfico das atenuações dos raios X detectados para amostra de tubo plástico com ampliação da resolução espacial de 03 vezes.	96
Figura 71 - Radiografia por contraste de fase em tubo plástico com ampliação da resolução espacial de 05 vezes, a) radiografia com tensão de 30 kVp, b) radiografia com tensão de 50 kVp, c) radiografia com tensão de 70 kVp.	96
Figura 72 - Gráfico das atenuações dos raios X detectados para amostra de tubo plástico com ampliação da resolução espacial de 05 vezes.	97
Figura 73 - Absorção adquirida pelo detector digital com ampliação da resolução espacial de 03 vezes e uma distância entre a fonte e o detector de 200 mm em amostra de cabo EPR.	98
Figura 74 - Absorção adquirida pelo detector digital com ampliação da resolução espacial de 03 vezes e uma distância entre a fonte e o detector de 1400 mm em amostra de cabo EPR.	98
Figura 75 - Absorção adquirida pelo detector digital com ampliação da resolução espacial de 03 vezes e uma distância entre a fonte e o detector de 2800 mm em amostra de cabo EPR.	98

Figura 76 - Absorção adquirida pelo detector digital com ampliação da resolução espacial de 05 vezes e uma distância entre a fonte e o detector de 200 mm em amostra de cabo EPR.....	99
Figura 77 - Absorção adquirida pelo detector digital com ampliação da resolução espacial de 05 vezes e uma distância entre a fonte e o detector de 1400 mm em amostra de cabo EPR.....	99
Figura 78 - Absorção adquirida pelo detector digital com ampliação da resolução espacial de 015 vezes e uma distância entre a fonte e o detector de 2800 mm em amostra de cabo EPR.	100
Figura 79 - Radiografias por contraste em amostra de cabo EPR, a) ampliação espacial de 03 vezes e b) ampliação espacial de 05 vezes.	100
Figura 80 - Radiografia por contraste de fase em tubo plástico com ampliação da resolução espacial de 03 vezes, a) distância FD de 500 mm, b) distância FD de 800 mm, b) distância FD de 1000 mm, b) distância FD de 1500 mm, b) distância FD de 2000 mm.....	101
Figura 81 - Gráfico das atenuações dos raios X detectados para amostra de tubo plástico com ampliação da resolução espacial de 03 vezes.	101
Figura 82 - Radiografia por contraste de fase em tubo plástico com ampliação da resolução espacial de 05 vezes, a) distância FD de 500 mm, b) distância FD de 800 mm, b) distância FD de 1000 mm, b) distância FD de 1500 mm, b) distância FD de 2000 mm.....	102
Figura 83 - Gráfico das atenuações dos raios X detectados para amostra de tubo plástico com ampliação da resolução espacial de 05 vezes.	102
Figura 84 - Radiografia por contraste de fase em tubo plástico, a) sem equalização do histograma, b) histograma da imagem.....	103
Figura 85 - Radiografia por contraste de fase em tubo plástico, a) com equalização do histograma, b) histograma equalizado da imagem, c) distribuição da média de pixels na região selecionada na imagem (a).....	104
Figura 86 - Radiografia por contraste de fase em tubo plástico, a) radiografia com indicações dos efeitos de contraste de fase e região de análise, b) região selecionada para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X.....	105
Figura 87 - Radiografia de amostra impregnada com azul de metileno, utilizando uma energia de 35 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 50 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes.	107
Figura 88 - Radiografia de amostra impregnada com cloreto de bário e azul de metileno, utilizando uma energia de 25 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 50 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes.	108

Figura 89 - Radiografia de amostra impregnada com cloreto de bário e azul de metileno, utilizando uma energia de 30 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 50 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 05 vezes	108
Figura 90 - Radiografia de amostra impregnada com cloreto de bário e azul de metileno, utilizando uma energia de 40 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 20 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes.	109
Figura 91 - Radiografia de amostra impregnada com sulfato de cobre e azul de metileno, utilizando uma energia de 20 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 60 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes.	110
Figura 92 - Radiografia de amostra impregnada com sulfato de cobre e azul de metileno, utilizando uma energia de 30 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 50 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes.	110
Figura 93 - Radiografia de amostra impregnada com sulfato de cobre e azul de metileno, utilizando uma energia de 40 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 18 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes.	111
Figura 94 - Radiografia de amostra 07 de cabo isolado em EPR, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.....	112
Figura 95 - Radiografia de amostra 09 de cabo isolado em EPR possível região com arborescência elétrica, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.	113
Figura 96 - Radiografia da amostra 09 ampliada na possível região com arborescência elétrica, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.	113
Figura 97 - Radiografia de amostra 08 de cabo isolado em EPR a uma distância de 200 mm da fonte ao detector.	114
Figura 98 - Radiografia da amostra 08 de cabo isolado em EPR a uma distância de 400 mm da fonte ao detector.	114
Figura 99 - Radiografia de amostra 08 de cabo isolado em EPR a uma distância de 800 mm da fonte ao detector.	115
Figura 100 - Região selecionada para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X da Figura 97, Figura 98 e Figura 99.	115
Figura 101 - Radiografia de amostra de lençol de borracha natural EPR com ampliação de 03 vezes e tempo de integração de 07, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.	116

Figura 102 - Radiografia de amostra de lençol de borracha natural EPR com ampliação de 03 vezes e tempo de integração de 05, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.	117
Figura 103 - Radiografia de amostra de lençol de borracha natural EPR com ampliação de 05 vezes e tempo de integração de 07, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.	117
Figura 104 - Radiografia de amostra padrão de tubo plástico e fibra óptica com ampliação de 03 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.	119
Figura 105 - Região selecionada para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X da amostra padrão de tubo plástico e fibra óptica com ampliação de 03 vezes.	119
Figura 106 - Radiografia de amostra padrão de tubo plástico e fibra óptica com ampliação de 05 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.	120
Figura 107 - Região selecionada para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X da amostra padrão de tubo plástico e fibra óptica com ampliação de 05 vezes.	120
Figura 108 - Radiografia de amostra padrão de tubo plástico e fibra óptica com ampliação de 10 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.	121
Figura 109 - Região selecionada para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X da amostra padrão de tubo plástico e fibra óptica com ampliação de 10 vezes.	121
Figura 110 - Radiografia da Amostra 03 com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.	122
Figura 111 - Radiografia da Amostra 03 com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.	123
Figura 112 - Radiografia da Amostra 03 com ampliação de 40 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.	123
Figura 113 - Radiografia da Amostra 03 com ampliação de 40 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.	124
Figura 114 - Radiografia da Amostra 04 com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.	124
Figura 115 - Radiografia da Amostra 04 com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.	125
Figura 116 - Radiografia da Amostra 07 com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.	126
Figura 117 - Radiografia da Amostra 07 com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.	126
Figura 118 - Radiografia da Amostra 08 (a) com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.	127

Figura 119 - Radiografia da Amostra 08 (a) com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.	127
Figura 120 - Radiografia da Amostra 08 (b) com ampliação de 10 vezes, a) distância entre DF 200 mm e tensão de 26 kVp, b) distância entre DF 400 mm e tensão de 28 kVp, c) distância entre DF 800 mm e tensão de 36 kVp, d) distância entre DF 1000 mm e tensão de 39 kVp.	128
Figura 121 - Radiografia da Amostra 08 (b) com distância entre DF 1000 mm, a) ampliação da resolução espacial de 03 vezes, b) ampliação da resolução espacial de 05 vezes, c) ampliação da resolução espacial de 10 vezes, d) ampliação da resolução espacial de 40 vezes.	129
Figura 122 - Radiografia da Amostra 08 (b) com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.	130
Figura 123 - Radiografia da Amostra 08 (b) com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.	130
Figura 124 - Radiografia da Amostra 08 (b) com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas, c) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.	131
Figura 125 - Radiografia de amostra de lençol de borracha natural EPR com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.	132
Figura 126 - Radiografia de amostra de lençol de borracha natural EPR com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.	132
Figura 127 - Radiografia de amostra de lençol de borracha natural EPR com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.	133
Figura 128 - Radiografia de amostra de lençol de borracha natural EPR com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.	133
Figura 129 - Cálculos da ampliação da resolução espacial e os cálculos da penumbra geométrica para o gerador de raios X milifoco.	134
Figura 130 - Radiografia de amostra de tubo plástico e fibra óptica plástica, a) ampliação de 01 vez, b) ampliação de 02 vezes, b) ampliação de 03 vezes, b) ampliação de 05 vezes.	136
Figura 131 - Distorção das imagens provocadas pela penumbra geométrica.	137
Figura 132 - Radiografia de amostra padrão de tubo plástico e fibra óptica com ampliação de 05 vezes, a) imagem radiográfica com gerador de raios X milifoco b) imagem radiográfica com gerador de raios X microfoco.	137

Figura 133 - Filme adquirido em distância de 700 mm ampliação da resolução espacial de 03 vezes 12 kVp 100 μ A e 10 minutos de integração, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.....	138
Figura 134 - Filme em distância de 700 mm ampliação da resolução espacial de 03 vezes 12 kVp 100 μ A e 20 minutos de integração, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.	139
Figura 135 - Filme em distância de 700 mm ampliação da resolução espacial de 03 vezes 12 kVp 100 μ A e 30 minutos de integração, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.	139
Figura 136 - Filme em distância de 700 mm ampliação da resolução espacial de 03 vezes 12 kVp 50 μ A e 30 minutos de integração, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.	139
Figura 137 - Filme em distância de 700 mm ampliação da resolução espacial de 03 vezes 12 kVp 40 μ A e 40 minutos de integração, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.	140
Figura 138 - Filme em distância de 700 mm ampliação da resolução espacial de 03 vezes 12 kVp 40 μ A e 50 minutos de integração, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.	140
Figura 139 - Filme em distância de 700 mm ampliação da resolução espacial de 03 vezes 12 kVp 30 μ A e 01 hora de integração, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.	140
Figura 140 - Filme em distância de 700 mm ampliação da resolução espacial de 03 vezes 12 kVp 10 μ A e 01 hora de integração, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.	141
Figura 141 - Filme radiográfico de cabo isolado com XLPE, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.....	141
Figura 142 - Filme radiográfico de filme do cabo isolado com XLPE da amostra 05 (d), a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.	142
Figura 143 - Filme radiográfico de cabo isolado com EPR, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.	143
Figura 144 - Filme radiográfico de cabo isolado com EPR, a) filme radiográfico, b) com filtro de detecção de bordas.	143
Figura 145 - Filme radiográfico de amostra de lençol de borracha natural EPR com energia de 20 kVp, a) filme radiográfico, b) com filtro de detecção de bordas.....	144
Figura 146 - Filme radiográfico de amostra de lençol de borracha natural EPR com energia de 28 kVp, a) filme radiográfico, b) com filtro de detecção de bordas.....	145

Figura 147 - Radiografia da amostra padrão, a) com ampliação de 02 vezes, b) com ampliação de 03 vezes, c) com ampliação de 04 vezes, d) regiões selecionadas para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X da amostra de 0,25 mm.....	146
Figura 148 - Radiografia da amostra padrão, a) com ampliação de 02 vezes, b) com ampliação de 03 vezes, c) com ampliação de 04 vezes, d) regiões selecionadas para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X da amostra de 0,25 mm.....	147
Figura 149 - Radiografia de amostra padrão, a) com ampliação de 02 vezes, b) com ampliação de 04 vezes, c) regiões selecionadas para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X.	148
Figura 150 - Gráfico da comparação das distâncias do detector e o gerador de raios X na amostra padrão de 0,25 mm.....	149
Figura 151 - Radiografia da amostra padrão de coluna capilar de 0,25 mm, a) com tempo de integração de 10 s energia de 12,5 kVp, b) com tempo de integração de 300 s energia de 8 kVp, c) com tempo de integração de 600 s energia de 7 kVp, d) gráfico da comparação do tempo de integração.....	150
Figura 152 - Radiografia de amostra de cabo isolado em XLPE, a) com ampliação de 02 vezes, b) com ampliação de 04 vezes, c) gráfico da área selecionada da imagem com ampliação de 02 vezes, d) gráfico da área selecionada da imagem com ampliação de 04 vezes.	151
Figura 153 - Radiografia de amostra de cabo isolado em XLPE, a) com ampliação de 02 vezes, b) com ampliação de 03 vezes, c) gráfico da área selecionada da imagem com ampliação de 02 vezes, d) gráfico da área selecionada da imagem com ampliação de 03 vezes.	152
Figura 154 - Radiografias de cabo isolado com XLPE com falso positivo, a) Imagem radiográfica, b) local ampliado da imagem com o falso positivo indicado.....	153
Figura 155 – Radiografias de cabo isolado com XLPE, a) imagem radiográfica, b) local ampliado da imagem.....	154
Figura 156 – Imagens da região da ruptura dielétrica de cabo isolado com XLPE, a) radiografia do local ampliado da imagem, b) sequencia de 03 imagens adquiridas por microscopia ótica.	154
Figura 157 - Radiografias de cabo isolado com XLPE na amostra 05, a) filme radiográfico, b) local ampliado da imagem.....	155
Figura 158 - Radiografias de cabo isolado com XLPE na amostra 05, a) local ampliado da imagem com equalização do histograma, b) amostra 05 segunda fatia.	156
Figura 159 - Radiografias de cabo isolado com XLPE na amostra 05, a) filme radiográfico, b) local ampliado da imagem.....	157
Figura 160 - Radiografias de cabo isolado com XLPE na amostra 05, a) local ampliado da imagem com equalização do histograma, b) amostra 05 segunda fatia.	157

Figura 161(Anexo B) - Espectro contínuo de raios X para uma placa de tungstênio	178
Figura 162 (Anexo B) - Espectro produzido em um tubo para diferentes valores de corrente	179
Figura 163 - Espectro discreto de raios X para uma placa de tungstênio.....	179
Figura 164 (Anexo B) - Importância relativa dos diversos processos de interação dos fótons com a matéria em função da energia do fóton e do número atômico do material..	180
Figura 165 (Anexo B) - Esquema do efeito fotoelétrico	181
Figura 166 (Anexo B) - Esquema do espalhamento compton.....	183
Figura 167 (Anexo B) - Esquema da formação de pares.....	184
Figura 168 (Anexo B) - Atenuação	185
Figura 169 (Anexo B) - Atenuação da radiação em relação à espessura de um objeto.....	187
Figura 170 (Anexo B) - Projeção de uma imagem de raios X $P\phi(r)$	188

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades elétricas dos materiais isolantes utilizados em cabos isolados.....	54
Tabela 2 - Tipos de filmes mamográficos	74
Tabela 3 - Valores de tensão de ruptura dielétrica.	81
Tabela 4 - Calculo dos fatores que influenciam na radiografias por contraste de fase para o gerador de raios X microfoco.	94
Tabela 5 - Calcula dos fatores que influenciam de radiografias por contraste de fase no gerador de raios X milifoco.....	135

LISTA DE ABREVEATURAS E SIGLAS

PDI – Processamento Digitais de Imagens;

RDP – Sistema de Radiografia Digital portátil;

Pixel – *Picture Element* (Elemento de imagem);

Voxel – Volume de um Elemento;

CCD – Dispositivo de Carga Acoplada (*Charge Coupled Device*);

LDPE – Polietileno de Baixa Densidade (*Low-density polyethylene*);

HDPE – Polietileno de Alta Densidade (*High-density polyethylene*);

XLPE – Polietileno Entrecruzado (*Cross-linked polyethylene*);

EPR – Elastômero de Etileno Propileno (*Ethylene-Propylene Rubber*);

WTR-XLPE – Polietileno Entrecruzado com Retardante de Arborescência (*Water Tree Retardant - Cross-linked polyethylene*);

PVC – Poli-Cloreto de Vinila;

ASTM – *American Society for Testing and Materials* ;

NBR – Norma Brasileira Registrada;

IEC – *International Electrotechnical Commission*;

IEEE – *Institute of Electrical and Electronic Engineers*;

DER – *Diffraction-Enhanced Radiography*.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	22
1.1 MOTIVAÇÕES	22
1.2 OBJETIVOS	23
1.2.1 Objetivo Geral	23
1.2.1 Objetivos Específicos	24
1.3 ESTRUTURA DA TESE	24
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1 PRODUÇÃO DE RAIOS X	25
2.1.1 Geradores de Raios X Milifoco	25
2.1.2 Geradores de Raios X Microfoco	27
2.1.3 Interação dos Raios X.....	28
2.1.5 Radiografia por Contraste de Fase de Raios X.....	33
2.2 MATERIAIS ISOLANTES ELÉTRICOS	42
2.2.1 Elastômero de Etilenopropileno - EPR.....	42
2.2.2 Polietileno Entrecruzado - XLPE	42
2.4 MECANISMOS DE RUPTURA DIELÉTRICA EM MATERIAIS POLIMÉRICOS	43
2.4.1 Descargas Parciais	43
2.4.2 Condições para Ocorrência de Descargas Parciais Internas.....	45
2.4.3 Ruptura Dielétrica em Materiais Poliméricos	48
2.4.4 Envelhecimento e Degradação de Materiais Poliméricos	50
2.5 CABOS ISOLADOS	53
2.5.1 Muflas Terminais Primárias	55
2.6 MANTAS POLIMÉRICAS.....	56
3 METODOLOGIA	58
3.1 INDUÇÃO ARBORESCÊNCIAS EM AMOSTRAS EPR E XLPE.....	58
3.1.1 Indução Arborescências em Cabos EPR e XLPE.....	59
3.1.2 Indução Arborescências em Lençóis de Borracha Natural EPR	61
3.2 AVALIAÇÃO DE ARBORESCÊNCIA POR MICROSCOPIA ÓTICA	62
3.3 AVALIAÇÃO DE ARBORESCÊNCIA POR CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X ..	65
3.3.1 Geradores de Raios X.....	68
3.3.2 Detectores de Raios X	71
3.3.3 Correção de Ruídos Fixos.....	77
4 RESULTADOS	80
4.1 INDUÇÃO ARBORESCÊNCIAS EM AMOSTRAS EPR E XLPE.....	80
4.2 ARBORESCÊNCIAS ANALISADAS POR MICROSCOPIA ÓTICA.....	83
4.2.1 Arborescências Analisadas por Microscopia Óptica com Metodologia Convencional ..	83
4.2.2 Arborescências Analisadas por Microscopia Óptica e Cortes Perpendiculares sem Impregnação de Contraste	86
4.3 AVALIAÇÃO DE ARBORESCÊNCIA POR CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X ..	93

4.3.1 Avaliação de Arborescência por Contraste de Fase de Raios X Detector com tecnologia CMOS.....	95
4.3.2 Avaliação de Arborescência por Contraste de Fase de Raios X Detector Tecnologia de Silício Amorfo.....	118
4.3.3 Avaliação de Arborescência por Contraste de fase de Raios X Utilizando Filmes Radiográficos.....	138
4.3.4 Avaliação de Arborescência por Contraste de Fase de Raios X Detector tecnologia de CCD's.....	145
5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	158
5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	158
5.2 CONCLUSÕES.....	163
TRABALHOS FUTUROS	164
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	165
ANEXO A – TRABALHO PUBLICADO EM PERIÓDICO	171
ANEXO B – INTERAÇÃO DO RAIOS X COM A MATÉRIA	177
ANEXO B.1. ESPECTRO DE EMISSÃO DOS RAIOS X.....	178
ANEXO B.2. INTERAÇÃO DOS RAIOS X COM A MATÉRIA.....	179
ANEXO B.2.1 Efeito Fotoelétrico.....	180
ANEXO B.2.2 Espalhamento Compton.....	182
ANEXO B.2.3 Produção de Pares.....	183
ANEXO B.3 RADIOGRAFIA.....	184

CAPÍTULO – 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÕES

Materiais dielétricos têm sido extensivamente utilizados em redes subterrâneas de distribuição de energia elétrica, bem como o seu uso em outros seguimentos do setor.

Os cabos isolados em EPR, XLPE e acessórios são utilizados em diversas redes de distribuição de energia elétrica, onde alguns trechos dos circuitos foram submetidos a esforços diferenciados de carga e ambientais, conseqüentemente devem apresentar envelhecimento diferenciados.

O EPR, assim como vários polímeros, é altamente indicado para aplicações em isolamento elétrico. A aplicação destes materiais no setor elétrico consiste na fabricação de equipamentos de proteção individual e coletiva empregado por eletricitistas que realizam atividades com a rede energizada (KOWALSKI, 2006).

Apesar de suas excelentes propriedades físicas e químicas, observa-se que com o uso continuado de cabos isolados e equipamentos em exposição ao ambiente, podem ocorrer degradações das propriedades isolantes do material polimérico, as quais podem levar à prematura ruptura dielétrica destes equipamentos. Tem sido sugerido que este tipo de envelhecimento é devido aos mecanismos de migração da água contendo íons na presença de campos elétricos, envolvendo, também, fenômeno de oxidação e quebra de cadeias (KATZ, WALKER, & DYNDUL, 1990; DENSLEY, BARTNIKAS, & BERNSTEIN, 1994; WOLTER, JONHSON, & TANAKA, 1987; MALIK, AL - ARAINY, & QURESHI, *Electrical Insulation In Power Systems.*, 1998; ORTON, 2005).

A ocorrência e o crescimento de arborescência têm sido apontados como sendo o principal fenômeno de envelhecimento em isolações sólidas de equipamentos isolantes de distribuição de energia elétrica. Desta forma, esses fenômenos podem levar à falha destes equipamentos com conseqüente interrupção de serviço (DAS-GUPTA & GERHARD-MULTHAUPT, 1997; MALIK, AL - ARAINY, & QURESHI, *Electrical Insulation In Power Systems.*, 1998).

Nos últimos anos, ocorreram interrupções na distribuição de energia elétrica devido à ruptura de alguns cabos da rede subterrânea e a falha de vários acessórios tanto de equipamentos como de uso pessoal, com isso, foram realizadas diversas análises para verificar o estado de degradação desses equipamentos.

Em algumas destas análises foram utilizados os ensaios não-destrutivos. Estes ensaios alcançaram grande relevância na validação e qualificação de materiais e equipamentos, tanto em processos de fabricação ou durante o período de funcionamento, requisito essencial para manter a confiabilidade e adequar a exigências no mercado nacional e internacional destes equipamentos (SILVA R. R., 2003).

Dentre os ensaios não-destrutivos utilizados no meio industrial, a radiografia é uma das técnicas mais antigas. Sendo uma das vantagens é o fato que a imagem obtida representa uma imagem interna do equipamento em avaliação, assim podendo avaliar a amostra sem ter que destruí-la (GODOI, 2005).

Mas os métodos convencionais de inspeção radiográfica exige alta qualidade da imagem. Além de saber que a inspeção visual humana da radiografia é conduzida de forma, em certos casos, com a interpretação subjetiva, necessitando-se que o inspetor possua extrema experiência, acuidade visual e conhecimento da técnica empregada. Com as tecnologias empregadas atualmente é possível buscar uma melhora destas metodologias utilizando as técnicas de ensaios não destrutivos, visando melhora tanto da imagem como na avaliação final do equipamento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver a metodologia de análise de arborescências por radiografias de contraste de fase de raios X, possibilitando avaliações com melhor eficiência na verificação da morfologia e dimensionais, dessas arborescências que podem provocar mudanças irreversíveis nos materiais dielétricos.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para realizar o objetivo geral deve ser feita a avaliação das características do sistema de geração e de detecção de raio X, por meio de análises comparativas das imagens de corpos de prova (Tubo plástico, fibra ótica, tubo capilar, etc.) adquiridas por meio de filmes radiográficos e detectores digitais.

Na avaliação da metodologia devem ser preparados corpos de prova de materiais isolantes do tipo EPR e XLPE que deverão ser submetidos a análise de radiografias por contraste de fase de raios X.

Com relação a indução de arborescências em amostras EPR e XLPE, serão abordados os ensaios de rigidez dielétrica por tensão aplicada pontualmente e em degraus escalonados verificando as suas características de execução.

Visando atingir o objetivo geral do trabalho devem ser feitas avaliações das arborescências detectadas por microscopia óptica para materiais isolantes do tipo XLPE, comparado os resultados com a técnica de radiografia por contraste de fase de raios X.

Para a validação da metodologia de análise de radiografias por contraste de fase de raios X em arborescências deve ser feita a avaliação em materiais dielétricos do tipo EPR e XLPE verificando sua eficiência e características da aplicação.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está organizada em cinco capítulos. No Capítulo 1 é realizada uma breve introdução dos fatores que incentivaram a produção do trabalho e os mecanismos vislumbrados para a resolução destes problemas. O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica sobre contraste de fase, processamento de imagens digitais, equipamentos isolados em EPR e XLPE e mecanismos de degradação de materiais. No Capítulo 3 é descrito o desenvolvimento da metodologia proposta. No Capítulo 4 os resultados obtidos são mostrados. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas a discussão dos resultados, a conclusão do trabalho e as propostas para a adequação e implementação da metodologia analítica proposta.

CAPÍTULO – 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PRODUÇÃO DE RAIOS X

A produção de raios X pode ocorrer de várias formas, sendo a interação de elétrons com a matéria o método mais utilizado. Este processo ocorre na utilização de tubos de raios X ou pela interação de feixes de elétrons acelerados por campos magnéticos fortes, em aceleradores de luz Síncrotron (KAPLAN, 1962; TAUHATA, SALATI, & PRINZIO, 2003; ROCHA H. S., 2007).

Alguns destes processos serão abordados a seguir.

2.1.1 GERADORES DE RAIOS X MILIFOCO

Os raios X podem ser produzidos em equipamentos como o ilustrado na Figura 1. O tubo de raios X é um tubo de vácuo eletrônico com componentes contidos em uma ampola de vidro ou de metal, em que o vácuo permite maior eficiência na produção de raios X e uma vida mais longa do tubo. Esta ampola de vácuo contém dois eletrodos, o cátodo e o ânodo. Aplicando uma diferença de potencial entre os eletrodos são excitados elétrons por uma corrente elétrica I_e , os quais são acelerados por uma tensão elétrica U_e , formando um feixe de elétrons colimado por uma capa focalizadora direcionado ao alvo. A energia cinética que o elétron adquire é determinada pela tensão de aceleração U_e expressa em eletron-volt [eV] (TAUHATA, SALATI, & PRINZIO, 2003; ROCHA H. S., 2007; BUSHONG, 2010).

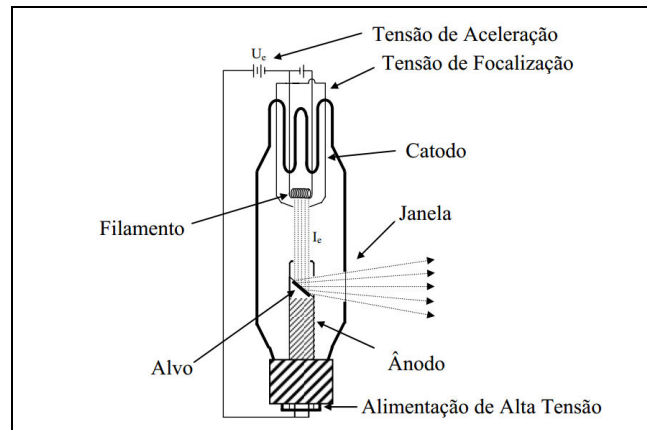


Figura 1 - Ilustração de uma ampola de raios X
Fonte: (ROCHA H. S., 2007).

A energia cinética do elétron [eV], resulta diretamente da tensão de aceleração U_e , em volts [V]. Os elétrons são acelerados pela energia de aceleração, que ao se colidirem contra o alvo provoca uma desaceleração desses elétrons, que perdem a energia cinética transformando em outras formas de energia uma delas, denominada como energia eletromagnética (TAUHATA, SALATI, & PRINZIO, 2003). Este processo ocorre por interação com o campo elétrico e por colisões com a estrutura do material alvo, onde a energia de ligação de um elétron produz pacotes discretos de energia denominados quanta (TAUHATA, SALATI, & PRINZIO, 2003; ROCHA H. S., 2007; BUSHONG, 2010). Esta radiação eletromagnética foi descoberta por Wilhelm Conrad Röntgen. A energia de radiação pode ser calculada, de acordo com as leis da radiação eletromagnética, pela equação (1) (TAUHATA, SALATI, & PRINZIO, 2003; ROCHA H. S., 2007; BUSHONG, 2010).

$$E = hf = h \frac{v}{\lambda} \quad (1)$$

Onde:

E = energia;

h = constante de Plank;

f = frequência;

v = velocidade da luz;

λ = comprimento de onda.

Outras teorias que vem discutir o processo características e formas que o raio X interage com a matéria pode ser observado no ANEXO B – Interação do Raios X com a matéria.

2.1.2 GERADORES DE RAIOS X MICROFOCO

Os geradores de raios X do tipo microfoco, produzem raios X de forma física semelhante aos tubos de raios X convencionais, como ilustra a Figura 1, mas possuem circuitos internos responsáveis pela focalização dos elétrons sobre o alvo que geram um feixe de raios X microfoco, como ilustra a Figura 2. Os geradores de raios X microfoco também possuem um feixe de elétrons gerados por um canhão de elétrons denominado de cilindro de *Wehnelt* e um cátodo que pode ser um filamento feito com material tungstênio ou rênio (ARNDT, DUNCUMB, & Long, 2001; TSUJI, 2004; TUOHIMAA, 2008).

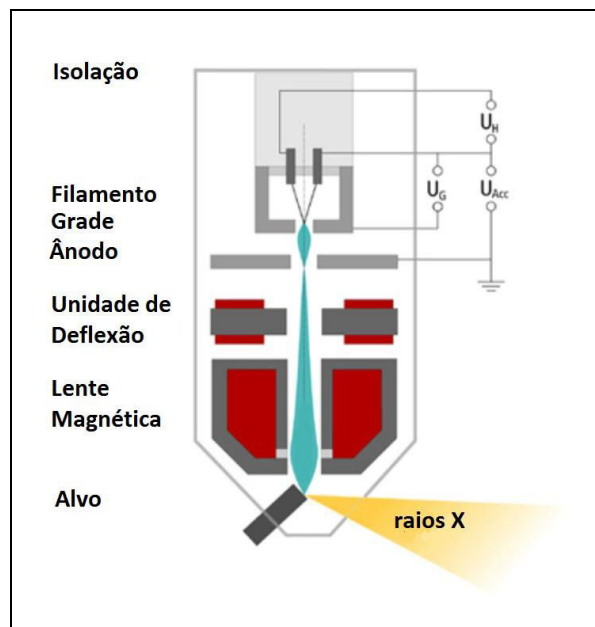


Figura 2 - Esquema de uma fonte de raios X microfoco.

Fonte: (PHOENIX, 2013).

Os elétrons são acelerados por uma diferença de potencial U_H (no filamento) ao ânodo (U_{Acc}), aplicando esta diferença de potencial no filamento, como ilustra a Figura 2. O ânodo consiste de uma placa de material específico aterrado com um orifício central por onde o feixe de elétrons atravessa. Ao atravessar essa placa os elétrons apresentam um foco muito pequeno, ocorrendo perdas devido à repulsão eletrostática dos elétrons que se propagam em direção ao alvo. Essa divergência do feixe pode ser estreitada quando o gerador possui lentes eletromagnéticas que provocam a correção do feixe, obtendo uma seção transversal pequena. As lentes eletromagnéticas (quadrupolares) focalizam o feixe de elétrons em certa área micrométrica sobre o alvo, produzindo assim os fótons de raios X. Esses fótons saem do tubo

através de janelas produzidas de materiais pouco absorvedores de raios X, como o berílio (ARNDT, DUNCUMB, & Long, 2001; TSUJI, 2004; TUOHIMAA, 2008; SOUZA, 2011).

O tubo do gerador de raios X deve ter uma refrigeração eficiente, a fim de evitar que o alvo seja danificado. Como o feixe de elétrons é focalizado em regiões micrométricas e o gerador pode funcionar por várias horas seguidas, deve ocorrer uma refrigeração do tubo adequada. Essa refrigeração pode ser feita por água, ar, por ânodos rotatórios ou por lentes magnéticas que movem a posição do feixe de elétrons no alvo. Para melhorar a dissipação de calor é utilizado materiais com alta condutividade térmica sobre o alvo, como por exemplo o diamante (ARNDT, DUNCUMB, & Long, 2001; TUOHIMAA, 2008; SOUZA, 2011).

Às fontes de microfoco apresentam tamanhos focais que variam entre 1 e 100 μm , sendo possível utilizar essas fontes de alta coerência de feixe de raios X para produzir imagens por contraste de fase (ARNDT, DUNCUMB, & Long, 2001; TUOHIMAA, 2008; SOUZA, 2011).

2.1.3 INTERAÇÃO DOS RAIOS X

2.1.3.1 REFRAÇÃO

Na faixa de energia dos raios X o índice de refração é muito pequeno, na ordem de 10^{-6} , sendo fortemente dominado pela densidade de elétrons em um material, não sendo esse efeito tão dependente da barreira eletrônica de energia. Em geral o índice é composto de uma parte real e uma imaginária. A parte real é fortemente responsável pela refração e a parte imaginária pela absorção (HASNAH, OLTULU, ZHONG, & CHAPMAN, 2002; HÖNNICKE M. G., 2006; ROCHA H. S., 2007).

O índice de refração pode ser escrito pela equação (2).

$$n = 1 + \alpha + i\beta \quad (2)$$

Onde:

n = índice de refração;

α = índice de refração real desviado da unidade;

β = termo referente à absorção.

Como a faixa de energia dos fótons de raios X tende a ser muito abaixo da barreira eletrônica de energia, a correção do índice é negativa, podendo ser expresso como na equação (3).

$$\alpha_i = -\rho_i \frac{\Gamma_e \lambda^2}{\pi} \left(\frac{Z}{A} \right)_i \quad (3)$$

Onde:

i = índice de referência do elemento;

Γ_e = raio clássico do elétron;

λ = comprimento de onda;

ρ = densidade do material;

$\left(\frac{Z}{A} \right)_i$ = número atômico Z dividido pela massa atômica A do elemento.

No caso onde o material é mais complexo ou é composto de múltiplos elementos ou a vários materiais, pode ser encontrada a relação mostrada na equação (4):

$$\alpha_c = \rho_c \sum \left(\frac{\alpha}{\rho} \right)_i f_i \quad (4)$$

Onde:

$\left(\frac{\alpha}{\rho} \right)_i$ = é dado pela equação (5);

f_i = a fração de massa do i -ésimo componente do composto.

$$\left(\frac{\alpha}{\rho} \right)_i = \frac{-\Gamma_e \lambda^2}{\pi} \left(\frac{Z}{A} \right)_i \quad (5)$$

O ângulo de refração δ surgindo de um material de dois componentes é representado na equação (6).

$$\delta = (\alpha_2 - \alpha_1) \frac{dt}{dz} \quad (6)$$

Onde:

$\frac{dt}{dz}$ = gradiente de espessura de um material perpendicular à direção do feixe e permanece em um plano de difração;

$\alpha_2 e \alpha_1$ = correções do índice de refração para dois materiais.

No caso de contraste de absorção, o ângulo de refração é um parâmetro adimensional e depende da diferença entre o índice de refração dos materiais, o gradiente em espessura em

uma direção perpendicular ao feixe e um plano de difração entre o monocromador e o cristal analisador (ROCHA H. S., 2007; HASNAH, OLTULU, ZHONG, & CHAPMAN, 2002; HÖNNICKE M. G., 2006).

2.1.3.2 DIFRAÇÃO

O fenômeno da difração está relacionado com as propriedades de ondas, que transportam energia de um ponto ao outro do espaço, e é intimamente relacionado ao fenômeno da interferência. Pode acontecer também que uma onda tenha a sua velocidade e/ou direção mudadas, ao interagir com um objeto ou meio material interposto em seu caminho (HÖNNICKE M. G., 2006; ZILIO, 2007).

Em 1917 o físico alemão Max von Laue, estimulado por uma discussão com P.P. Ewald que fazia o seu doutoramento em espalhamento de ondas eletromagnéticas por um grupo de osciladores harmônicos, argumentou que *se os cristais são compostos de espaços atômicos regulares que poderiam agir como centros espalhadores para os raios X, e se os raios X são ondas eletromagnéticas de comprimento de onda quase iguais à distância interatômica nos cristais, então seria possível difratar os raios X por meio dos cristais*. Nesta direção, Friedrich e Knipping conduziram experimentos para testar as hipóteses. Os experimentos que foram feitos em seguida provaram a hipótese e ao mesmo tempo a natureza ondulatória dos raios X e a periodicidade do arranjo atômico dentro do cristal. Os resultados despertaram o interesse do físico inglês W.H. Bragg e de seu filho W.L. Bragg. Eles analisaram os experimentos de Laue e o expressaram em uma função matemática que representava as condições necessárias para ocorrer a difração” (ROCHA H. S., 2007).

Esta formulação matemática ficou conhecida como a lei de Bragg, que é mostrada na equação (7).

$$n\lambda = 2d' \sin\theta \quad (7)$$

Onde:

n = número de ordem de reflexão;

λ = comprimento de onda da radiação incidente;

d' = distância entre planos;

θ = ângulo de incidência do feixe.

2.1.3.3 FASE

As ondas possuem uma íntima relação em medir transformações. O conhecimento apropriado da equação de onda independente do tempo, junto com a sua intensidade e sua fase em cima de uma superfície, permite conhecer tipicamente a onda em todos os lugares. Como a intensidade correspondente pode ser medida diretamente, pode-se obter a intensidade da luz ou a distribuição de probabilidade de uma onda mecânica quântica em qualquer lugar (NUGENT, PAGANIN, & GUREYEV, 2001; ROCHA H. S., 2007).

O conceito de fase é usualmente introduzido como uma propriedade de um campo de onda coerente. Como os campos de onda são calculados pela função complexa da equação (8).

$$\psi(r) = \sqrt{I(r)}[i\phi(r)] \quad (8)$$

Onde:

r = posição espacial;

$I(r)$ = intensidade (ou a probabilidade de intensidade) de onda;

$\phi(r)$ = fase.

As ondas geradas em um equipamento de raios X são descritas pela equação (8). As frentes de onda ilustradas em verde na Figura 3, coincidem com as superfícies da constante de fase $\phi(r) = 0\pi, 2\pi, 4\pi$, e assim por diante, e a direção de propagação local é dada no espaço livre pelo gradiente da fase. Em consequência, a forma das frentes de onda é refletida com a mudança de fase no detector. Dependendo do ponto de vista adotado, ocorre a uma distorção da frente de onda ao passar através do objeto causando a mudança de fase (NUGENT, PAGANIN, & GUREYEV, 2001).

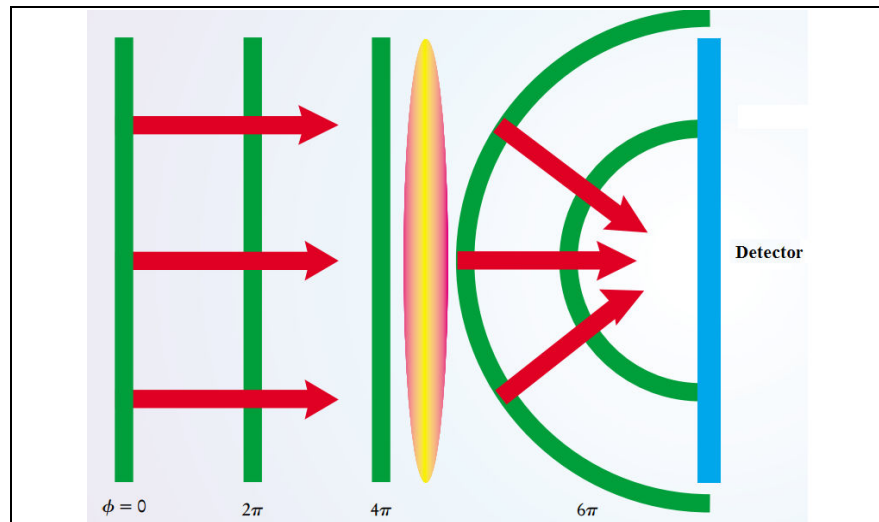


Figura 3 - Diagrama de mudança de fase de uma frente de onda
Fonte: (NUGENT, PAGANIN, & GUREYEV, 2001).

A fase de uma onda eletromagnética é inevitavelmente mudada quando passa através de um objeto. Alguns materiais afetam a fase de uma onda com somente mínimos efeitos na intensidade. Em propagação por uma distância apropriada, estas mudanças de fase invisíveis são transformadas em uma variação de intensidade visível. Pode-se concluir que o gradiente de fase pode ser visualizado pela observação da propagação de intensidade (NUGENT, PAGANIN, & GUREYEV, 2001; ROCHA H. S., 2007).

Quando uma onda de alta coerência esférica é utilizada, (normalmente em fontes microfocadas), uma frente de ondas de referência proveniente exclusivamente da fonte, interage com a frente de ondas que passou pela amostra formando interferências construtivas e destrutivas. O resultado é um aumento na intensidade em pontos específicos da imagem, relacionados à mudança de fase da onda que interagiu com a amostra como ilustra a Figura 4 (NUGENT, PAGANIN, & GUREYEV, 2001; ROCHA H. S., 2007).

Onde:

R1 = distância da fonte pontual de raios X ao objeto;

R2 = distância do objeto ao detector de raios X;

r = ao raio dimensional do objeto.

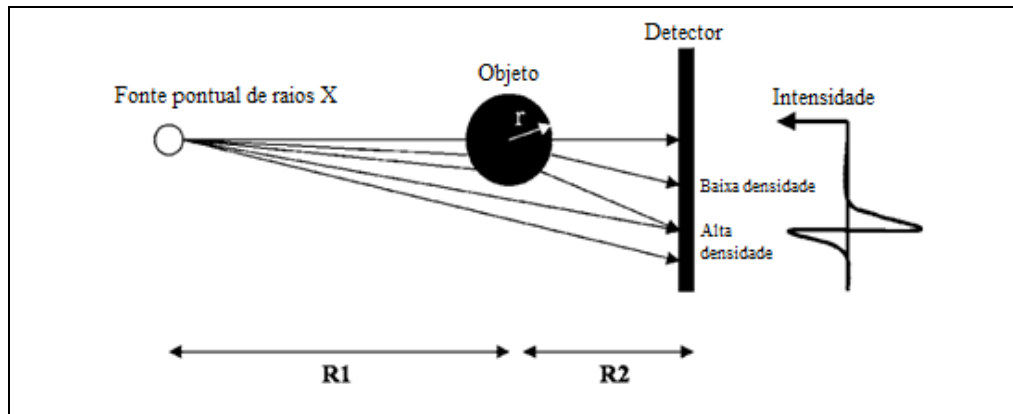


Figura 4 - Ilustração do efeito de borda de uma radiografia de contraste de fase com uma fonte pontual de raios X. Na borda da imagem do cilindro, ocorre o realce de borda devido à refração de raios X o qual é definido como contraste de fase

Fonte: (MATSUO, KATAFUCHI, TOHYAMA, MORISHITA, YAMADA, & FUJITA, 2005).

2.1.5 RADIOGRAFIA POR CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X

A radiografia de raios X é baseada na detecção de diferenças na atenuação de um feixe de raios X em um objeto. Objetos com coeficiente de atenuação semelhantes oferecem imagens de baixo contraste. O reforço do contraste de raios X em uma imagem pode ser conseguido por meio de agentes de contraste de atenuação e /ou de fase. Alternativamente, pode ser alcançado mediante a exploração da parte real, δ , do índice de refração calculado pela equação (2) em lugar de, ou em conjunto com a parte imaginária, $i\beta$, que é responsável pela absorção. Esta exploração é feita utilizando contrastes de fase com adequação do feixe de raios X, utilizando um feixe coerente de raios X produzido por um gerador de raios X microfocado ou utilizando um gerador de luz síncrotron (HÖNNICKE, KAKUNO, MANICA, & CUSATIS, 2007).

A imagem por contraste de fase é obtida pela interferência entre um feixe de referência e os outros feixes transmitidos pela amostra. Os gradientes de fase no feixe transmitido pela amostra são originários das variações no índice de refração, principal responsável pelo contraste na imagem. Logo, um sistema óptico que seja sensível a mudança na direção de propagação dos raios X é capaz de identificar os gradientes de fase e pode ser utilizado como um dispositivo de imagem por contraste de fase, sem o uso de uma fonte coerente (HÖNNICKE M. G., 2006).

Na literatura são encontrados vários métodos para adquirir imagens de contraste de fase. As principais técnicas são: a) imagem por contraste de fase utilizando interferômetros de

raios X como ilustra a Figura 5 (ANDO & HOSOYA, 1972; YONEYAMA, MOMOSE, SEYA, HIRANO, TAKEDA, & ITAI, 1999); b) imagens por contraste de fase utilizando um cristal analisador (ICA), como ilustra a Figura 6 (HÖNNICKE, et al., 2005a); c) imagem pelo método da propagação – PBI (*Propagation-Based Image*) ou também chamado de ILI (*In Line Imaging*) ou REI (*Refraction Enhanced Imaging*) e ou FSP (*Free Space Propagation*), ilustrado na Figura 7. Esta técnica pode ser realizada utilizando uma fonte coerente parcialmente monocromática (CLOETENS, et al., 1997) ou policromática (WILKINS, GUREYEV, GAO, POGANY, & STEVENSON, 1996). Nesta técnica enquadram-se as imagens no regime holográfico (CLOETENS, et al., 1999) e imagens no regime de detecção de bordas (CLOETENS, et al., 1997).

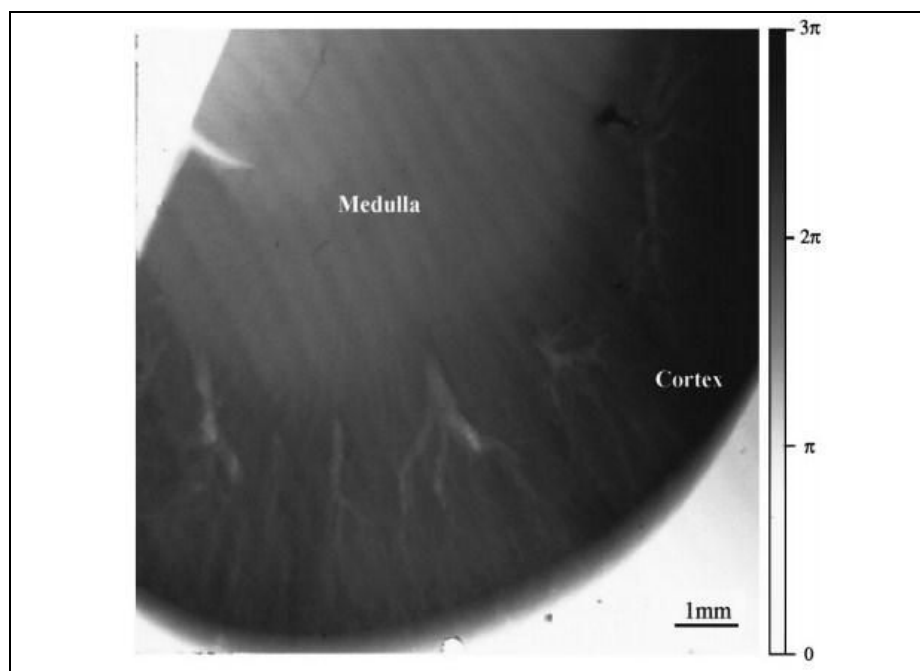


Figura 5 – Radiografia por contraste de fase de uma fatia de rim de coelho
Fonte: (YONEYAMA, MOMOSE, SEYA, HIRANO, TAKEDA, & ITAI, 1999).

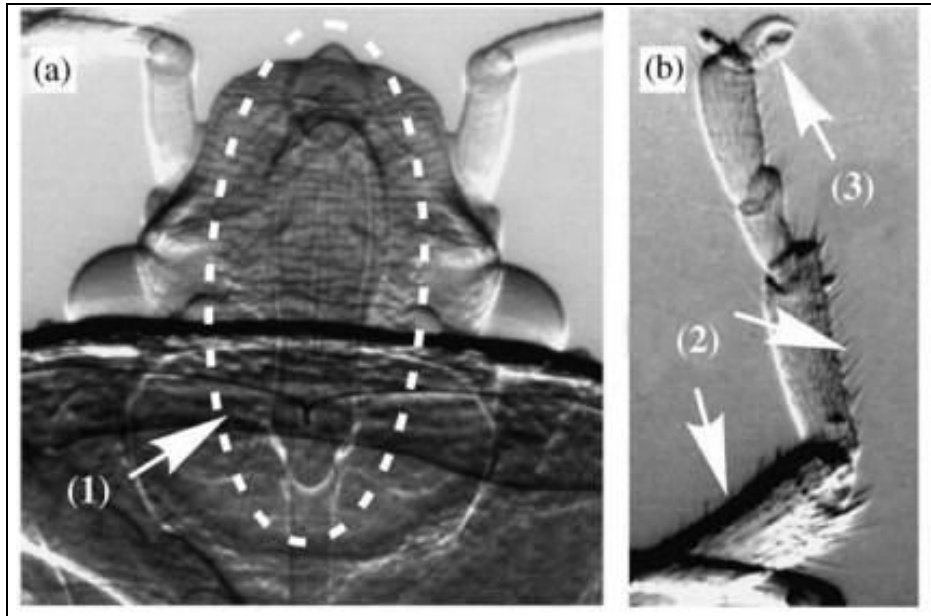


Figura 6 - Detalhes ampliados de um percevejo, a) é mostrado a parte interna (1), b) a perna, sendo os pelos (2) e a pinça (3)
 Fonte: (HÖNNICKE, FOERSTER, NAVARRO-SILVA, MENK, RIGON, & CUSATIS, 2005).

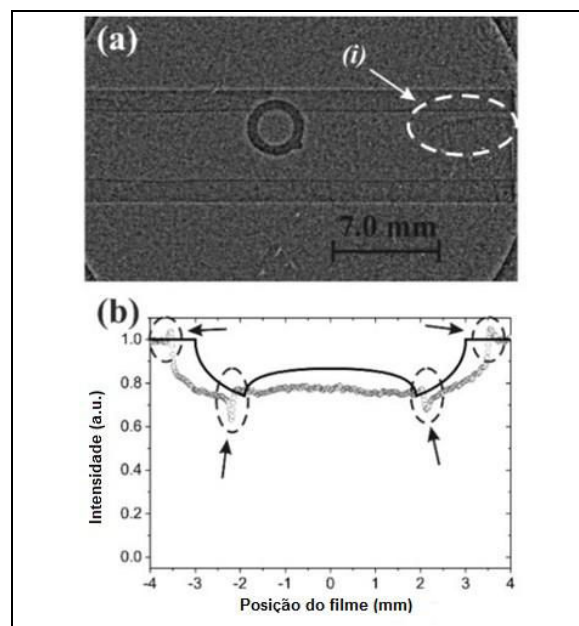


Figura 7 - Imagem de contraste de fase de raios X (PBI), a) tubo de polypropileno com realce de borda de um defeito (i), b) Medido (o) e simulado (-) sessão transversal da imagem
 Fonte: (HÖNNICKE, KAKUNO, MANICA, & CUSATIS, 2007).

Esta técnica pode ser realizada na detecção de bordas geométricas ou na geometria holográfica (CLOETENS, et al., 1997), dependendo da qualidade da fonte e da distância da

amostra ao detector. Essa técnica tem sido aplicada com sucesso em biologia (WESTNEAT, BETZ, BLOB, FEZZAA, COOPER, & LEE, 2003), medicina (Johnston, et al., 1996; Li, et al., 2003), ciências dos materiais (CLOETENS, et al., 1997) e arqueologia (CHAIMANEE, et al., 2003).

A técnica PBI é bem conhecida por sua simplicidade, uma vez que, não requer nenhum sistema ótico sofisticado. Como não há elementos de óptica, não ocorreram aberrações na radiografia. A única exigência é um feixe de raios X coerente, fornecido por exemplo, por geradores de raios X de microfoco, como ilustra a Figura 8 (WILKINS, GUREYEV, GAO, POGANY, & STEVENSON, 1996; BLINOV, VASIL'EV, SEROVA, GRYAZNOV, & POTRAKHOV, 2009), ou, pela terceira geração de fontes de radiação síncrotron de alto brilho e baixa emitância com coerência espacial suficiente, como ilustra a Figura 9 (SNIGIREV, SNIGIREVA, KOHN, KUZNETSW, & SCHELOKOV, 1995; CLOETENS, et al., 1997; SNIGIREVA & SNIGIREV, 2006).

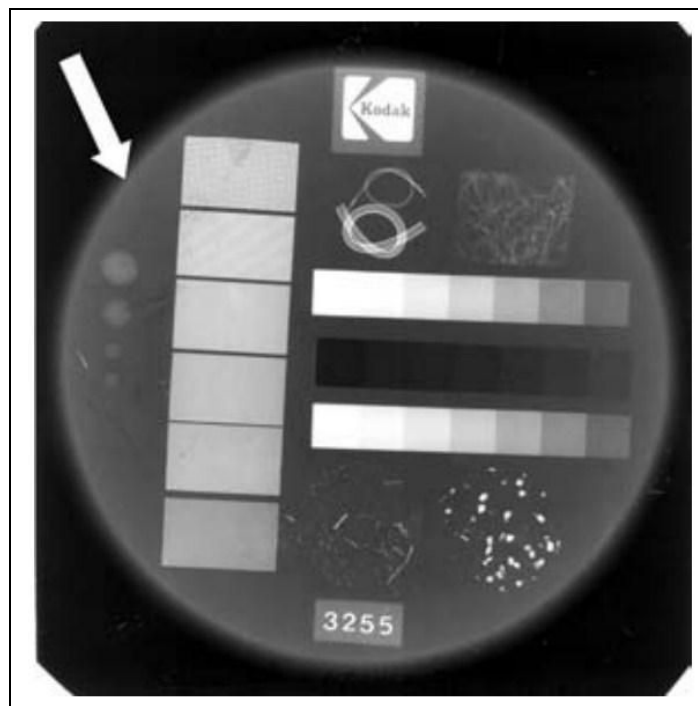


Figura 8 - Imagem de contraste de fase de raios X de um phantom de mamografia

Fonte: (BLINOV, VASIL'EV, SEROVA, GRYAZNOV, & POTRAKHOV, 2009).

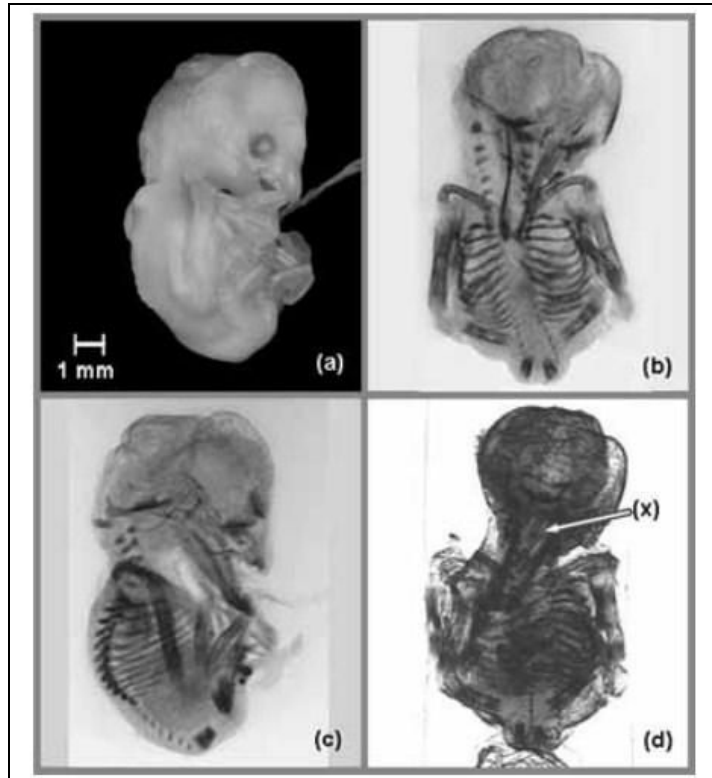


Figura 9 - Fotografia (a) microradiografia convencional (c , d) e DER (d) de um feto de *Desmodus rotundus* (MN67667)

Fonte: (ROCHA H. S., 2007).

Na técnica PBI é disposto o objeto em avaliação em frente da fonte de raios X com feixe coerente, onde a fonte emite um feixe de raios X que ao atravessar o objeto, transmite o feixe que irá propagar ao longo da distância entre objeto e o detector. Se o detector estiver localizado logo após do objeto, é obtida uma radiografia convencional, caso a distâncias entre o objeto e o detector aumentar uma radiografia por contraste de fase será formada (BRADLEY, GUNDOGDU, JENNESON, NIRGIANAKI, & ISMAIL, 2007), como pode ser observado na Figura 10.

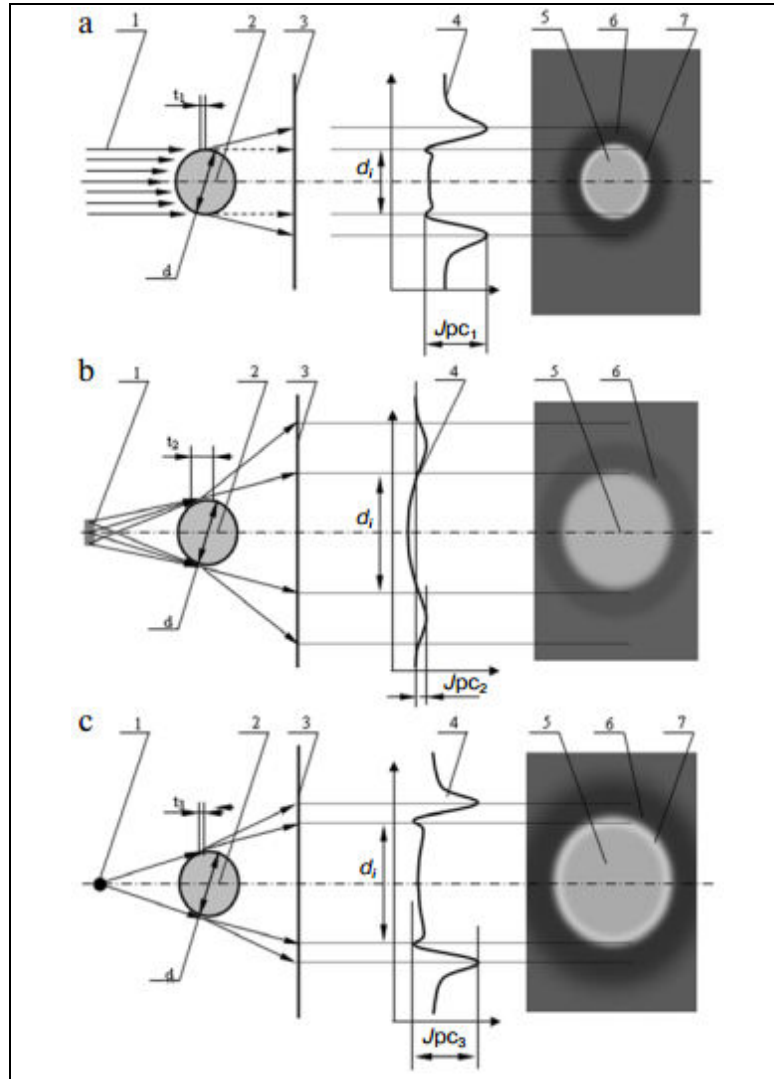


Figura 10 - Mecanismo de contraste de fase de raio X de imagem:
 1) fonte de radiação; 2) objeto; 3) detector; 4) distribuição de intensidade; 5) imagem do objeto; 6) linha de contorno escura; 7) linha de contorno clara; t área de contraste de fase; d é o diâmetro do objeto, d_i é o diâmetro da imagem; J_{pc} é o contraste de fase de intensidade de sinal; a) fluxo de radiação paralelo, $d = d_i$, $t_1 \sim t_3$, $J_{pc1} \sim J_{pc3}$; b) fonte de radiação com o ponto focal grande, $d \sim d_i$, $t_2 \sim t_3 \gg \ll J_{pc2} \ll J_{pc1}$; c) fonte de radiação pontual (microfocais), $d \ll d_i$

Fonte: (BLINOV, VASIL'EV, SEROVA, GRYAZNOV, & POTRAKHOV, 2009).

A partir de energias na faixa de 1000 eV os processos dominantes no feixe de raios X são a absorção fotoelétrica, refração e espalhamento coerente e incoerente. Fótons de raios X atravessam o objeto, interagindo através do efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e espalhamento coerente (*Rayleigh*). Fótons de espalhamento coerente desviam do seu caminho inicial em pequenos ângulos. Esta refração do feixe ocorre nos limites do objeto com

diferentes índices de refração de raios X (BRADLEY, GUNDOGDU, JENNESON, NIRGIANAKI, & ISMAIL, 2007).

Com certa distância entre o detector e objeto, fótons de raios X desviados podem ser observados sobrepondo o mecanismo fotoelétrico com o mecanismo de dispersão inelástica, produzindo variações de intensidade de contraste (KOTRE & BIRCH, 1999; BRADLEY, GUNDOGDU, JENNESON, NIRGIANAKI, & ISMAIL, 2007).

A seguir serão discutidos fatores que influenciam na produção de radiografias por contraste de fase.

2.1.5.1 COERÊNCIA ESPACIAL

Para atingir a imagem de contraste de fase adequada o tubo de raios X deve fornecer um grau suficiente de coerência espacial ou lateral. A incoerência-espacial de um feixe de raios X não produzirá efeitos de contraste de fase suficientes para detecção. A coerência, no entanto, não afeta a absorção de raios X, que é uma função característica da energia de raios X e o objeto em análise (HÖNNICKE M. G., 2006; BRADLEY, GUNDOGDU, JENNESON, NIRGIANAKI, & ISMAIL, 2007; LEWIS, 2004). A coerência espacial é calculada pela equação (9).

$$d = \frac{\lambda \cdot R_1}{f} \quad (9)$$

Onde:

d = tamanho da coerência espacial (m);

λ = comprimento de onda (m);

f = ponto focal da fonte (m);

R_1 = distância entre a fonte e o objeto (m).

O comprimento de onda é calculado pela equação (10).

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{E_{ef}} \quad (10)$$

Onde:

λ = comprimento de onda (m);

h = Constante de Planck (eVs);

c = Velocidade da luz no vácuo (m/s)

E_{ef} = Energia efetiva (eV)

A energia efetiva da fonte pode ser calculada pela equação (11).

$$E_{ef} = E \cdot 0,6 \quad (11)$$

Onde:

E_{ef} = Energia efetiva da fonte (eV);

E = Energia da fonte (eV).

2.1.5.2 ALTERAÇÃO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL

A ampliação (*magnification*) da resolução espacial da imagem ocorre variando-se a distância R_1 e R_2 ilustrada na Figura 11 e demonstrada pela equação (12).

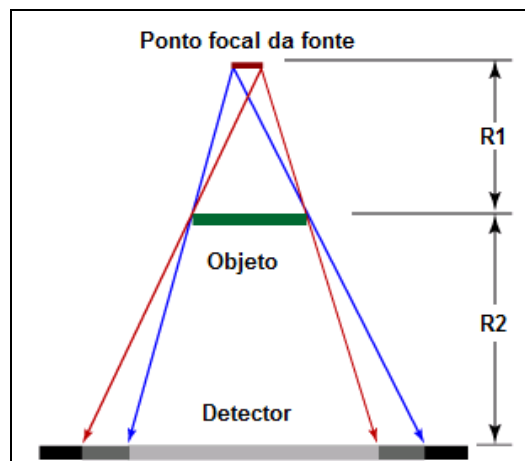


Figura 11 - Ilustração do efeito de ampliação da resolução espacial
Fonte: (NDT, 2010).

$$M = 1 + \frac{R_1}{R_2} \quad (12)$$

Onde:

M = ampliação (m);

R_1 = distância entre a fonte e o objeto (m);

R_2 = distância entre o objeto e o detector (m).

Com o resultado da ampliação da resolução espacial, a imagem de contraste de fase também pode ser melhorada. O contraste da imagem obtida, a partir dos perfis de raios X de intensidade de um objeto, é calculada pela equação (13) (BRADLEY, GUNDOGDU, JENNESON, NIRGIANAKI, & ISMAIL, 2007).

$$\text{Contraste} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{\left(\frac{I_{\max} + I_{\min}}{2} \right)} \quad (13)$$

Onde:

Contraste = contraste da imagem obtida;

I_{\max} = intensidade máxima da imagem;

I_{\min} = intensidade mínima da imagem.

2.1.5.3 PENUMBRA GEOMÉTRICA

Outro parâmetro associado com a qualidade de imagem é a penumbra devido ao tamanho finito do ponto focal da fonte. A penumbra geométrica (*geometrical unsharpness*) é ilustrada na Figura 12 e calculada pela equação (14).

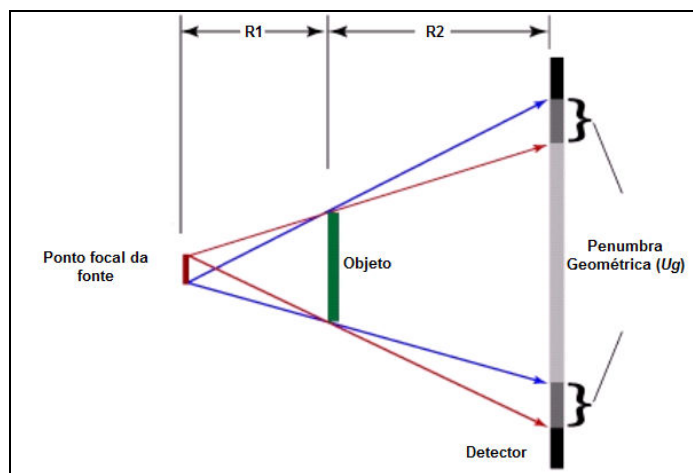


Figura 12 - Ilustração do efeito da penumbra geométrica
Fonte: (NDT, 2010).

$$U_g = f \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (14)$$

Onde:

U_g = penumbra geométrica (m);

R_1 = distância entre a fonte e o objeto (m);

R_2 = distância entre o objeto e o detector (m);

f = ponto focal da fonte (m).

2.2 MATERIAIS ISOLANTES ELÉTRICOS

2.2.1 ELASTÔMERO DE ETILENOPROPILENO - EPR

O elastômero de etilenopropileno (EPR) é um polímero obtido da copolimerização do etileno e propileno (EPM) ou de um terpolímero etileno-propileno-dieno-monômero (EPDM). O termo “isolação de composto a base de EPR” se aplica bem neste caso, pois uma formulação típica de EPR contém de sete a nove formulações em que o EPM ou EPDM constitui apenas 45% a 50% do peso total do composto, sendo a parte principal do composto isolante onde se determina a base física e as propriedades elétricas da isolação. O restante da formulação consiste em carga mineral, antioxidante, agente de vulcanização, co-agentes, agentes de processo e agentes especiais que conferem características específicas aos compostos melhorando as propriedades físicas (TEIXEIRA JR., 2004.). O EPR, assim como o XLPE, têm sido amplamente utilizado em cabos de potência devido a suas excelentes propriedades elétricas (BARTNIKAS & SRIVASTAVA, 2000). Por se tratar de um material resistente ao fenômeno de arborescência em água (*water treeing*), o EPR é largamente aplicado em cabos de média e alta tensão que tenham que operar em contato prolongado com a água (TEIXEIRA JR., 2004.).

2.2.2 POLIETILENO ENTRECruzADO - XLPE

O polietileno é um polímero sintético membro de uma série de compostos químicos chamados poliolefinas, obtido a partir da reação de polimerização do monômero etileno (C_2H_4). O processo de reticulação do polietileno consiste na formação de ligações químicas entre as macromoléculas, resultando em um polímero com estrutura em rede (STENNIS & KREUGER, 1990). Em cabos com isolação em XLPE, os processos utilizados são a cura a vapor e a cura a seco utilizando peróxido de dicumila. A polimerização ocorre na presença de catalisadores sob determinadas condições de temperatura e pressão (HALL, 1989; BARLOW, 1991). Dependendo das condições impostas no processo de polimerização é que se obterá o polietileno de baixa densidade (LDPE), o polietileno de alta densidade (HDPE) ou o polietileno entrecruzado XLPE. O XLPE possui excelentes propriedades químicas e físicas, tais como inércia química, boas propriedades mecânicas e excelentes propriedades elétricas,

tais como alta resistividade volumétrica, baixa permissividade, baixas perdas dielétricas e alta rigidez dielétrica. Além disto, o XLPE possui excelente estabilidade em elevadas temperaturas. Por possuir tais propriedades o XLPE é atualmente o tipo de polietileno mais utilizado para aplicação como isolamento em cabos de potência extrudados. Adicionalmente, a estrutura reticulada do XLPE melhora sua capacidade de incorporar aditivos como retardante de chama, antioxidantes, carga mineral e negro de carbono, os quais são utilizados para melhorar seu desempenho, mantendo a integridade de suas propriedades físicas. Essas características permitem que mais potência possa ser transportada para a mesma seção do condutor quando comparado ao cabo com isolamento em polietileno (BARLOW, 1991; DISSADO & FOTHERGILL, 1992; HALL, 1989; TEIXEIRA JR., 2004.).

Apesar de suas excelentes propriedades físicas e químicas, tem sido mostrado que o polietileno, de um modo geral, e o XLPE, em particular, pode apresentar diversos mecanismos de envelhecimento quando submetido a diferentes estresses, os quais podem levar, em última instância, à ruptura do material (DISSADO & FOTHERGILL, 1992). A partir de 1980, o polietileno entrecruzado com retardante de arborescência TR-XLPE (*“Additive” WTR-XLPE, “Polymer” WTR-XLPE*) vem sendo utilizado com o objetivo de minimizar a degradação provocada pelo crescimento de arborescências em água (TEIXEIRA JR., 2004.; HARTLEIN & ORTON, 2006).

2.4 MECANISMOS DE RUPTURA DIELÉTRICA EM MATERIAIS POLIMÉRICOS

2.4.1 DESCARGAS PARCIAIS

A descarga parcial é uma descarga elétrica que ocorre em uma região do espaço sujeita a um campo elétrico, cujo caminho condutor formado pela descarga não une os dois eletrodos de forma completa (KREUGER, 1989). A ocorrência de uma descarga parcial depende da existência de cargas livres (elétrons e ou íons positivos) numa determinada região do espaço e um campo elétrico intenso o suficiente para acelerar as cargas livres com energia necessária para iniciar um processo de avalanche. As descargas parciais podem ser classificadas como: descarga parcial interna, descarga parcial superficial e descarga corona (IEC-270, 1981; SWINKA, 2000; SILVA G. C., 2005).

As descargas parciais internas ocorrem no interior de vazios ou inclusões de material dielétrico, em que um vazio está totalmente circundado pelo dielétrico ou na interface entre o dielétrico e um eletrodo. A inclusão é formada por caminhos condutores, como arborescência elétrica, sendo os canais preenchidos por materiais com propriedades condutoras, em geral, carbono resultante das reações químicas das moléculas do polímero sob ação das descargas e vazios preenchidos com gases também resultantes destas reações. Dentro desses vazios também ocorrem descargas parciais que aceleram o processo de crescimento da arborescência levando o material à ruptura dielétrica (SWINKA, 2000; SILVA G. C., 2005).

Na descarga parcial superficial a descarga ocorre na superfície de um material dielétrico, normalmente partindo de um eletrodo para a superfície. Quando o campo elétrico paralelo à superfície excede certo valor crítico, inicia-se o processo de descarga superficial (KREUGER, 1989). Assim como as descargas internas, as descargas superficiais ocasionam alterações na superfície, iniciando caminhos condutores que se propagam ao longo da direção do campo elétrico. Estes caminhos condutores são conhecidos como “trilhamento” como mostra a Figura 13, e também podem levar o isolamento à ruptura total (SWINKA, 2000; SILVA G. C., 2005).

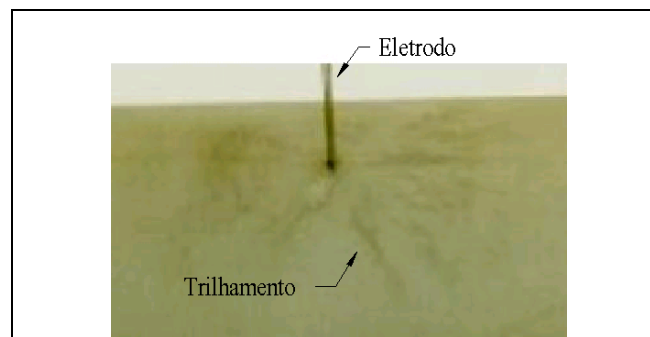


Figura 13 - Trilhamento elétrico em cabo isolado XLPE
Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2008).

No efeito corona, as descargas parciais ocorrem no ar e partindo de pontas agudas (partes com pequenos raios de curvatura) em eletrodos metálicos. Em eletrodos de alta-tensão com pontas agudas, são criadas regiões nas vizinhanças do condutor com campo elétrico elevado, que ultrapassa o valor crítico, dando origem a descargas parciais (KREUGER, 1989; KUFFEL & ZAENGL, 1990; SWINKA, 2000; SILVA G. C., 2005). Quando a tensão aplicada é alternada com forma senoidal, a descarga parcial corona pode ser facilmente identificada devido a sua ocorrência inicial localizar-se no máximo do semi-ciclo negativo da

tensão aplicada. Isto se deve ao fato de que um eletrodo metálico disponibiliza elétrons no ar, na região próxima do eletrodo (nuvem eletrônica) como mostra a Figura 14 (SWINKA, 2000; SILVA G. C., 2005).

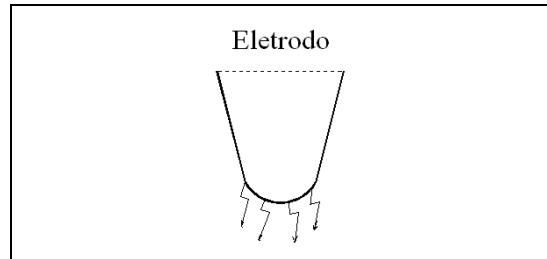


Figura 14 - Representação de um eletrodo metálico com ponta aguda gerando descarga corona.

Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2008).

2.4.2 CONDIÇÕES PARA OCORRÊNCIA DE DESCARGAS PARCIAIS INTERNAS

A ocorrência das descargas parciais no interior de defeitos em materiais poliméricos depende a princípio de dois fatores: a) o campo elétrico local (campo no interior do vazio) deve ultrapassar um certo valor crítico e b) deve haver elétrons livres o suficiente para iniciar o processo de avalanche (SWINKA, 2000; SILVA G. C., 2005).

2.4.2.1 INFLUÊNCIA DO CAMPO ELÉTRICO LOCAL

Para que ocorram descargas parciais no interior de defeitos presentes na isolação é necessário que o campo elétrico local ultrapasse um certo valor de campo elétrico crítico. Esse processo pode ser visto de forma análoga ao caso de descargas entre eletrodos metálicos, dada pela curva de *Paschen* (KREUGER, 1989; KUFFEL & ZAENGL, 1990; SWINKA, 2000; PICOT, 2003; SILVA G. C., 2005).

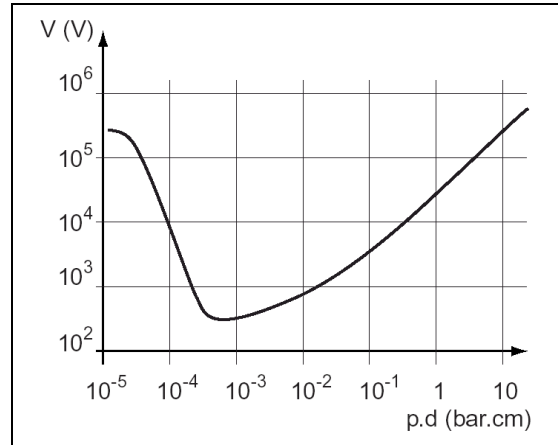


Figura 15 - Evolução da rigidez dielétrica no ar em função da pressão
Fonte: (PICOT, 2003).

Nesta situação, a ocorrência da descarga depende do produto da pressão do gás pela distância entre os eletrodos. A ocorrência das descargas em vazios também depende da pressão e da natureza dos gases resultantes na formação do vazio. O campo elétrico local no interior do vazio pode ser determinado em função do campo elétrico macroscópico médio no restante do material dielétrico para vazios com geometria simples e considerando que o restante do material dielétrico seja homogêneo. Para um vazio plano e pouco espesso, com campo elétrico perpendicular ao plano, o campo elétrico local é descrito pela equação (15) e para um vazio esférico o campo elétrico local é descrito pela equação (16) como mostra a Figura 16 (KREUGER, 1989; GUTFLEISCH & NIEMEYER, 1995; SWINKA, 2000).

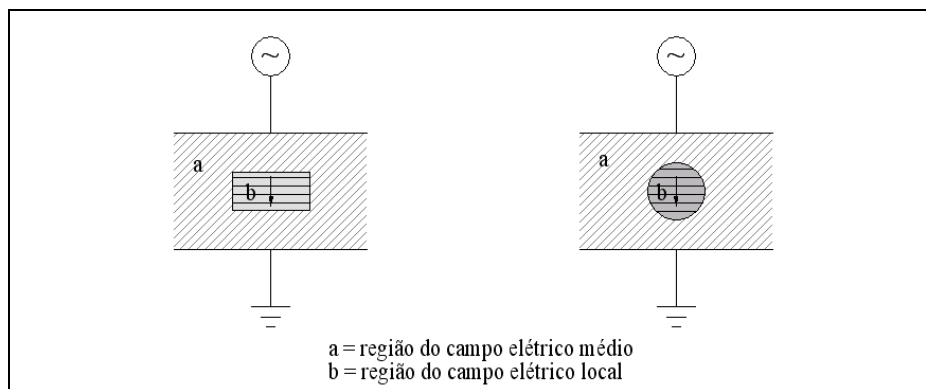


Figura 16 - Relação entre o campo elétrico local e o campo elétrico médio no interior do material dielétrico para um vazio plano e um esférico
Fonte: (SWINKA, 2000).

$$E_l = \varepsilon_r \cdot E_m \quad (15)$$

$$E_l = \frac{3 \cdot \varepsilon_r}{1 + 2 \cdot \varepsilon_r} \cdot E_m \quad (16)$$

Onde:

- E_l é o campo elétrico local;
- E_m é o campo elétrico médio;
- ε_r é o permissividade elétrica relativa.

Considerando um dielétrico com permissividade relativa igual a 2,5, um vazio plano com espessura de 1mm, pressão do gás no interior de 1 atm e verificando a curva de *Paschen*, conjuntamente o campo elétrico local crítico é de 6,8kV/mm. Desta forma, as descargas parciais neste defeito devem iniciar para um campo elétrico médio acima de 2,7 kV/mm. Este campo elétrico é inferior aos campos elétricos normalmente utilizados em sistemas de isolamento poliméricos (SWINKA, 2000).

2.4.2.2 GERAÇÃO DE ELÉTRONS INICIAIS

As ocorrências das descargas parciais também dependem da disponibilidade de elétrons livres na região do vazio, onde o campo elétrico local está acima do campo elétrico crítico. Estes elétrons são necessários para dar início ao processo de avalanche e podem ser gerados quando ainda não ocorreram descargas no vazio, isto é, no vazio virgem. A primeira descarga dependerá da geração de elétrons livres através da foto-ionização do gás no interior do vazio. A foto-ionização depende da interação da radiação cósmica ou da radiação natural do meio (radiação de fundo) com o gás no interior do vazio ou com a própria superfície do vazio. Medidas do tempo de atraso para a ocorrência da primeira descarga em vazios virgens, mostram estar de acordo com o tempo de atraso (*time lag*) calculado (GUTFLEISCH & NIEMEYER, 1995), levando-se em consideração a probabilidade de interação dessas radiações com o vazio. A probabilidade de interação é proporcional ao volume do vazio, à densidade do gás e à densidade de fluxo de radiação. Outro mecanismo que poderia gerar os elétrons iniciais seria a emissão por campo pela superfície interna do vazio. Este segundo mecanismo é pouco provável devido à elevada função trabalho apresentada pelas superfícies lisas dos materiais poliméricos (GUTFLEISCH & NIEMEYER, 1995; SWINKA, 2000).

Após a ocorrência da primeira descarga, elétrons iniciais adicionais estarão disponíveis na forma de cargas superficiais depositadas na superfície interna do vazio. A emissão desses elétrons presos em "armadilhas" na superfície do vazio, deve obedecer a um processo de emissão térmica (GUTFLEISCH & NIEMEYER, 1995). A carga superficial

depositada nas superfícies internas do vazio depende da carga total transferida na descarga anterior e das propriedades da superfície. As propriedades da superfície interna do vazio se alteram ao longo da vida do material, sendo que, o bombardeamento iônico, em geral, aumenta a condutividade elétrica da superfície diminuindo o tempo de permanência destas cargas nas armadilhas (GUTFLEISCH & NIEMEYER, 1995; SWINKA, 2000).

2.4.3 RUPTURA DIELÉTRICA EM MATERIAIS POLIMÉRICOS

As medidas realizadas, da tensão de ruptura dielétrica em materiais dielétricos são influenciadas pelas condições da amostra no ensaio. Analisando o processo da montagem das muflas ao aplicar tensão elétrica no cabo com a sua isolação imersa no óleo, podendo estar em meios líquidos ou gasoso, observa-se descargas parciais principalmente nas proximidades das bordas dos eletrodos, da fita semicondutora e da blindagem devido a distribuição do campo elétrico antes de ocorrer a ruptura do dielétrico, e ao alto nível da diferença de potencial como demonstra a Figura 25 e Figura 17 (MAMEDE FILHO, 1994; IEDA, 1980).

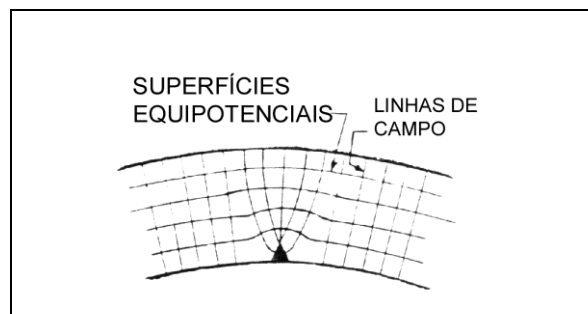


Figura 17 - Linhas de campo nas superfícies equipotenciais

Fonte: (MAMEDE FILHO, 1994).

Para a análise dos mecanismos de ruptura dielétrica estes eventos podem ser divididos em três categorias (DISSADO & FOTHERGILL, 1992):

- a) baixo nível de campo e degradação, onde o sistema isolante é afetado pelo campo elétrico em conjunto com outros fatores;
- b) evento devido ao campo elétrico exceder o campo elétrico crítico (modelos determinísticos);
- c) Devido às mudanças físicas e não homogeneidade existe uma probabilidade de ruptura no tempo (modelos estocásticos).

Os modelos determinísticos de ruptura dielétrica são definidos de acordo com o processo que conduz ao seu estágio final. Estes processos podem ser subdivididos em: elétrica, térmica, eletromecânica e ruptura por descargas parciais. Na Figura 18 e Figura 19, pode ser vistos os processos de ruptura dielétrica com seus respectivos campos demonstrando a sua ocorrência durante o tempo de operação (DISSADO & FOTHERGILL, 1992).

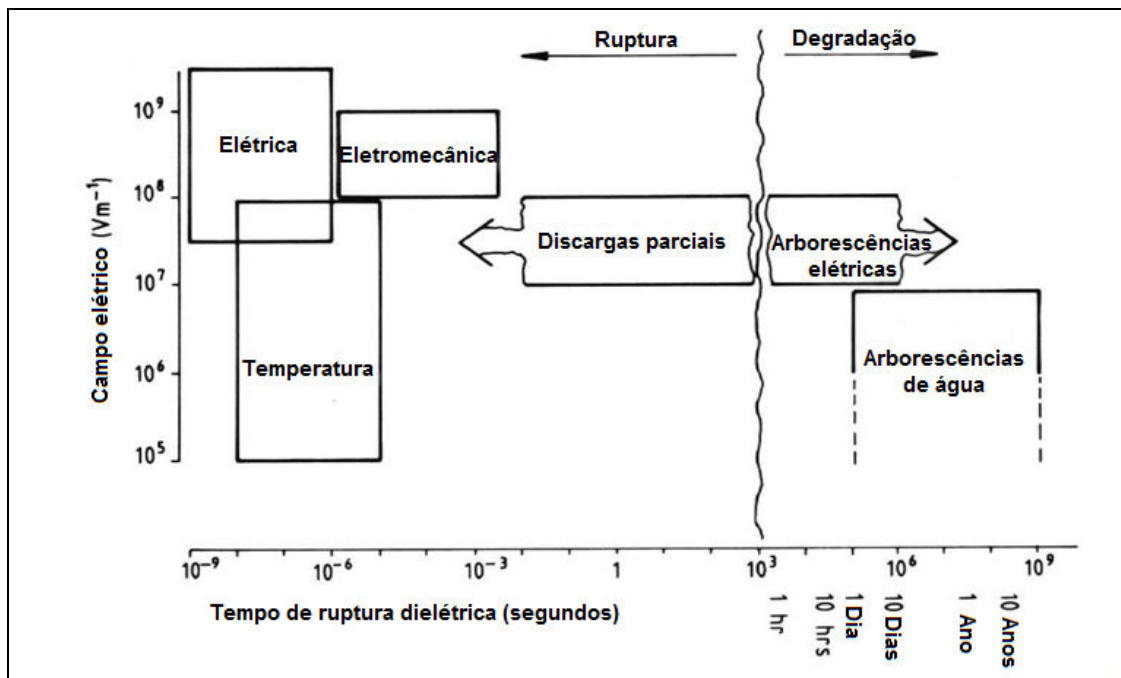


Figura 18 - Processos de ruptura dielétrica com variação de campo elétrico e o tempo de operação

Fonte: (DISSADO & FOTHERGILL, 1992).

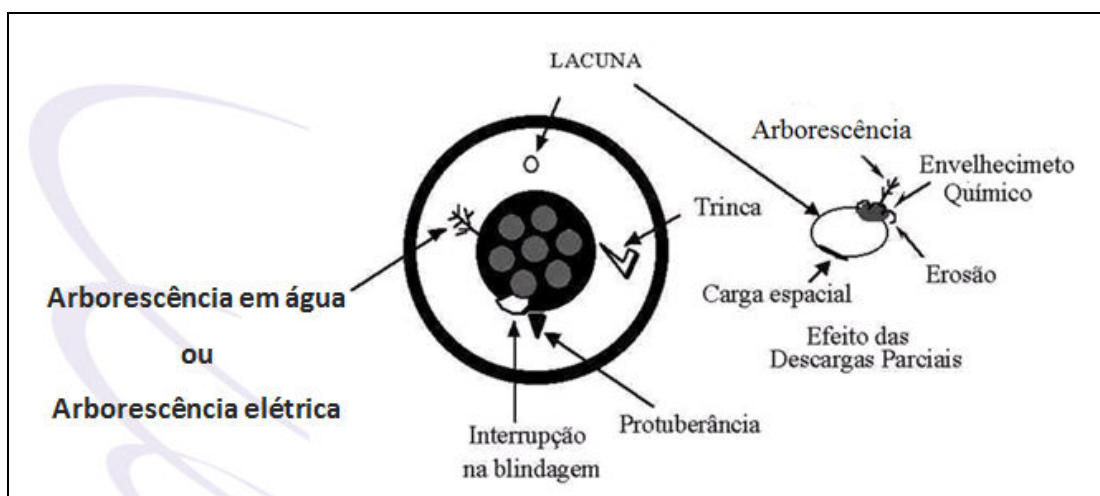


Figura 19 - Processos de ruptura dielétrica em cabos isolados.

Fonte: (PIAZZA, 2001)

A ruptura dielétrica por modelos determinísticos nos gases é iniciada por poucos elétrons livres sempre presentes em um gás, seguida por uma avalanche elétrica; a tensão atravessa o espaço ionizado alcançando um máximo valor e então diminui como uma descarga finalmente tornando-se um arco de corrente conforme a lei de *Paschen* (Figura 15). Na ruptura dielétrica por modelos determinísticos em óleos ultra puros, os portadores iniciais são os poucos íons e elétrons livres presentes. Em bons óleos, portadores adicionais consistem em impurezas como partículas de matéria sólida e umidade. Uma ionização em alta tensão por colisão seguida por avalanches elétricas desenvolve arco piloto, faixas de alta tensão, “corona e descargas em líquidos”, e então rompe. A tensão de ruptura é conhecida como “*sparkover*”, ou tensão crítica. A ruptura dielétrica em materiais dielétricos sempre é irreversível, resultando na carbonização e vaporização do dielétrico (DISSADO & FOTHERGILL, 1992; PIAZZA, 2001).

2.4.4 ENVELHECIMENTO E DEGRADAÇÃO DE MATERIAIS POLIMÉRICOS

Envelhecimento pode ser definido como as mudanças irreversíveis e deletérias que ocorrem nos materiais dielétricos com o passar do tempo, as quais afetam sua habilidade para satisfazer o desempenho requerido. Essas mudanças podem afetar as propriedades elétricas, dielétricas e físico-químicas destes materiais. Deste modo, o diagnóstico e a avaliação do envelhecimento de materiais dielétricos podem ser realizados pela observação de propriedades selecionadas, as quais seriam sensíveis ao envelhecimento (MONTANARI & SIMONI, 1993).

Em condições reais de operação, a isolação pode estar sujeita a diversos tipos de estresse elétricos (tensão, frequência de operação), térmicos (temperatura de operação, gradiente de temperatura), mecânicos (vibração, torção) e ambientais (umidade, contaminação) (CYGAN & LAGHARI, 1990; DENSLEY, BARTNIKAS, & BERNSTEIN, 1994; GJAERDE, 1997). Estes estresses, agindo de forma individual ou combinada, podem levar ao envelhecimento e degradação e, em última instância, à ruptura do sistema de isolação. Os principais mecanismos de envelhecimento e degradação que ocorrem em cabos de potência isolados são as arborescências em água (*water trees*) e as arborescências elétricas (*electrical trees*), como mostra a Figura 20 (DISSADO & FOTHERGILL, 1992; PIAZZA, 2001).

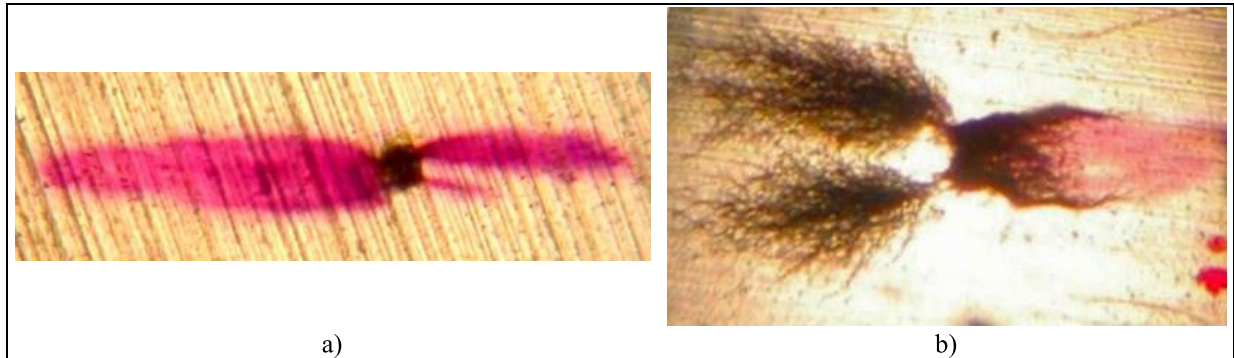


Figura 20 - Arborescências em cabo isolado XLPE envelhecidos em campo, a) Arborescência em água, b) Arborescência elétrica
 Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2008).

2.4.4.1 ARBORESCÊNCIA EM ÁGUA

Arborescências em água como ilustradas na Figura 21, são regiões de microcavitações e danos na forma de filamentos em polímeros, tais como XLPE, causada pela penetração de água contendo íons sob a presença de um campo elétrico alternado. Seu crescimento é lento e praticamente não apresenta descargas parciais. Com o seu crescimento é reduzida a rigidez dielétrica do cabo isolado (DAS-GUPTA & GERHARD-MULTHAUPT, 1997; MALIK, AL - ARAINY, & QURESHI, *Electrical Insulation In Power Systems.*, 1998).

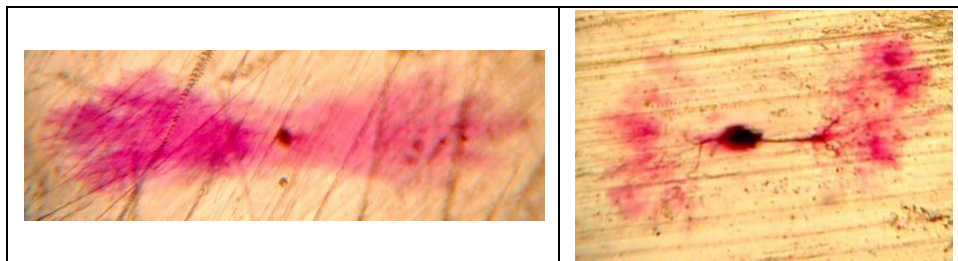


Figura 21 - Arborescências em água de cabo isolado XLPE envelhecidos em campo
 Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2008).

O mecanismo de formação da arborescência em água não é bem conhecido, mas tem sido sugerido que o seu início e crescimento são devidos aos mecanismos de ação de capilaridade, osmose, forças coulombianas, dieletroforese, envelhecimento térmico, descargas parciais, envelhecimento químico e solicitações mecânicas (DAS-GUPTA & GERHARD-MULTHAUPT, 1997). Embora não exista um consenso no meio técnico-científico, há um entendimento que a arborescência em água consiste de um aglomerado de precipitados de água líquida dentro da matriz polimérica, formando os micro-canais, por ação de várias

solicitações e da ação do tempo, que modificam a permissividade relativa e a mobilidade dos transportadores de carga no local (PATSCHE, 1992). Geralmente, conclui-se que uma arborescência em água pode transformar-se em ou iniciar uma arborescência elétrica, ou atravessar toda extensão da isolação, e que após a ocorrência de qualquer destes eventos a ruptura dielétrica é iminente (DISSADO & FOTHERGILL, 1992; PIAZZA, 2001).

2.4.4.2 ARBORESCÊNCIA ELÉTRICA

Arborescências elétricas são canais vazios resultantes da decomposição do material dielétrico por descargas parciais e são permanentemente visíveis como mostra a Figura 22 (MALIK, AL - ARAINY, & QURESHI, *Electrical Insulation In Power Systems.*, 1998). Tem sido sugerido que descargas parciais ocorrem devido a concentrações de solicitações referentes ao campo elétrico na isolação ou de superfícies ou cavidades levando à formação de arborescências elétricas. As concentrações de solicitação elétrica podem ser causadas por protuberâncias na interface entre a blindagem semicondutora e a isolação, causando a injeção de carga, embora o mecanismo exato seja desconhecido (EICHHORN & BARTNIKAS, 1983; PIAZZA, 2001).

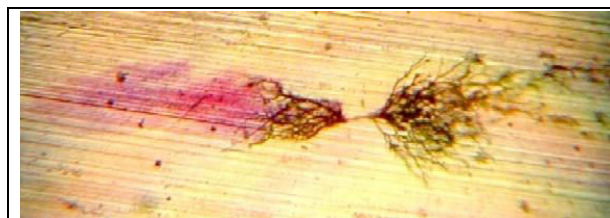


Figura 22 - Arborescência elétrica em cabo isolado XLPE envelhecido em campo
Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2008).

Outro meio que propicia a geração das arborescências elétricas em isolamentos sólidos são as cavidades no volume do material e nas interfaces com os eletrodos, preenchidos com gás ou água. Nas cavidades preenchidas com gás ocorre o fenômeno de descarga parcial. Estas cavidades podem ter sua origem na fabricação do cabo ou de terminações devido a condensação da água, após o sistema ser submetido a altas temperaturas. A formação destas cavidades também pode ser atribuída à recristalização secundária nas regiões amorfas durante os ciclos térmicos e descolamento das impurezas da isolação (DENSLEY, BARTNIKAS, & BERNSTEIN, 1994; PIAZZA, 2001).

2.5 CABOS ISOLADOS

Uma rede de distribuição subterrânea é composta de equipamentos e acessórios bem como de cabos isolados, monofásicos ou trifásicos, instalados em bancos de dutos ou diretamente enterrados no solo e não requer nenhum tipo de sistema de suporte como ocorre com as redes aéreas (BOCUZZI & MARTINS, 1997). Os cabos isolados utilizados nas primeiras redes subterrâneas usados para transporte de energia elétrica começaram a ser desenvolvidos no final do século XIX, sendo a isolação destes cabos desenvolvida inicialmente com piche (Resina betuminosa à base de alcatrão de ulha) por Thomas Edison e, posteriormente, com fita de papel seco. Durante a terceira década do século XX a isolação em papel foi melhorada, através da impregnação do papel, com óleo e iniciou-se também o desenvolvimento de cabos extrudados a base de borracha natural vulcanizada (EPR). Nos anos 60 surgiram os primeiros cabos isolados com polietileno (BARTNIKAS & SRIVASTAVA, 2000; TEIXEIRA JR., 2004.).

Atualmente, a isolação primária dos cabos é composta por material dielétrico sólido extrudado, podendo ser de polietileno entrecruzado XLPE (*Crosslinked Polyethylene*), polietileno entrecruzado com retardante de arborescência WTR-XLPE (*Water Tree Retardant Crosslinked Polyethylene*) ou elastômero de etileno propileno EPR (*Ethylene Propylene Rubber*) (BARTNIKAS & SRIVASTAVA, 2000; ARRIGHI, 1986).

Os cabos isolados empregados nas redes subterrâneas de distribuição são caracterizados por quatro elementos básicos: condutor metálico, sistema dielétrico, blindagem metálica e proteção externa. O condutor, elemento de transporte de energia elétrica, pode ser único no caso de cabos singelos (unipolares) e/ou múltiplo no caso de cabos multipolares. O sistema dielétrico é constituído por semicondutora interna, isolação e semicondutora externa. A blindagem metálica serve como condutor para o transporte das correntes de carga capacitiva e de curto-circuito do sistema e a proteção externa serve como reforço mecânico e proteção contra penetração de água e agentes externos (TEIXEIRA JR., 2004.). Uma ilustração de cabo isolado é mostrado na Figura 23.

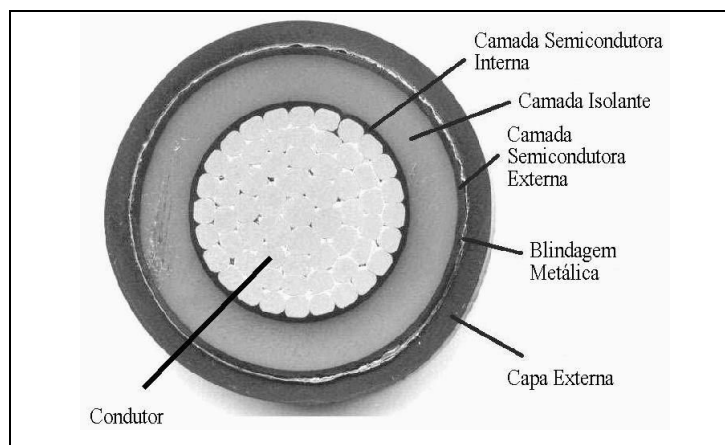


Figura 23 - Componentes do sistema isolante de cabos isolados
Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2008).

Muitos são os benefícios trazidos pela instalação de redes de distribuição subterrânea, entre os quais pode-se destacar a redução significativa das interrupções e conseqüente aumento da confiabilidade do sistema (BOCUZZI & MARTINS, 1997).

Alguns valores relativos às propriedades elétricas dos materiais isolantes utilizados em cabos isolados são listados na Tabela 1 (BARTNIKAS & SRIVASTAVA, 2000; TEIXEIRA JR., 2004.).

Tabela 1 - Propriedades elétricas dos materiais isolantes utilizados em cabos isolados

Propriedades		XLPE	EPR
Resistividade volumétrica ($\Omega \cdot \text{cm}$)		10^{16}	$10^{15} - 10^{17}$
Rigidez dielétrica (kV/mm)	CA	50	40
	Impulso	65	60
Permissividade relativa (1 kHz)		2,3	3,2
Fator de dissipação (1 kHz)		3×10^{-4}	7×10^{-3}

Fonte: (BARTNIKAS & SRIVASTAVA, 2000).

Apesar das excelentes propriedades dos materiais poliméricos empregados como dielétrico sólido em cabos de potência, observa-se que estes materiais podem apresentar diversos mecanismos de envelhecimento quando submetidos a diferentes estresses, os quais podem levar, em última instância, à ruptura do material (DISSADO & FOTHERGILL, 1992).

2.5.1 MUFLAS TERMINAIS PRIMÁRIAS

Um cabo isolado de média e alta tensão é composto geralmente de condutor, isolamento, fitas semicondutoras e blindagem eletrostática metálica. Desta forma, se estabelece no cabo isolado um campo elétrico conforme Figura 24 (MAMEDE FILHO, 1994).

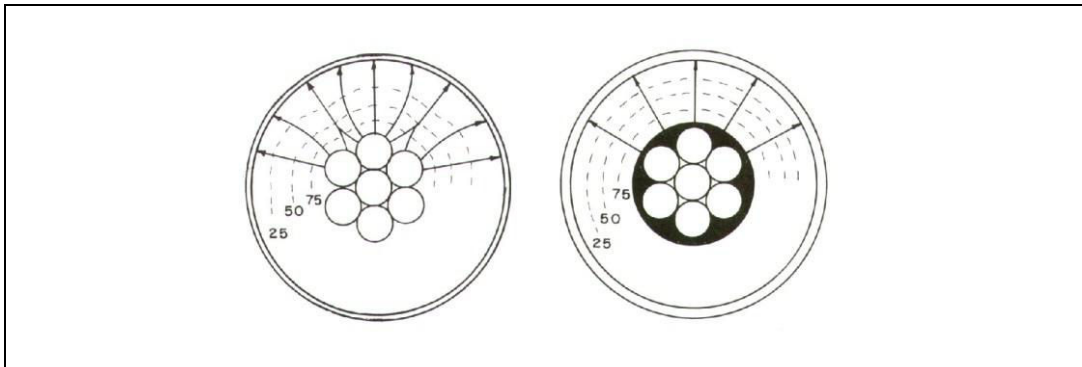


Figura 24 - Linhas de campo no cabo sem semicondutora e com semicondutora
Fonte: (MAMEDE FILHO, 1994).

O condutor, a fita semicondutora e a blindagem são elementos condutores, enquanto a isolamento é o meio dielétrico do campo elétrico. A fita semicondutora possibilita o estabelecimento de linhas equipotenciais no dielétrico conforme a Figura 24 (MAMEDE FILHO, 1994).

Ao realizar uma emenda em um cabo isolado as linhas de campo são encaminhadas para a extremidade da blindagem, provocando uma intensidade muito elevada de campo elétrico no corte da blindagem e da fita semicondutora, conforme ilustra a Figura 25, podendo também provocar situações como *flash over* (que é a ionização do ar, a ruptura do isolante ou a circulação de correntes na superfície do isolante), bem como caminhos com forma arborescente, conhecidos como *tracking* (MAMEDE FILHO, 1994).

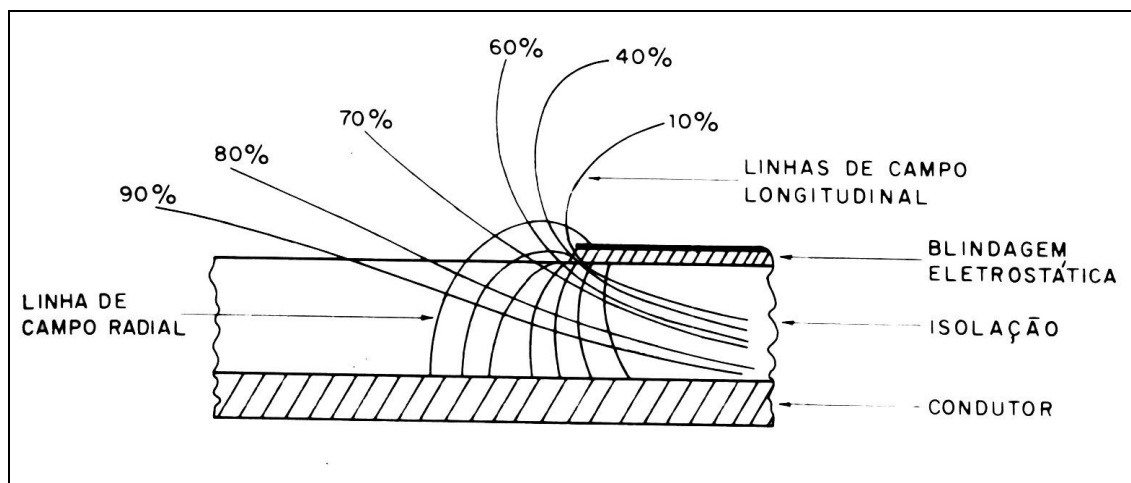


Figura 25 - Linhas de campo elétrico no cabo seccionado
 Fonte: (MAMEDE FILHO, 1994).

Quando o cabo se encontra na condição do cabo ilustrado na Figura 25 é necessário reduzir o gradiente de tensão provocado pelo campo elétrico, aumentando a isolação no corte da fita semicondutora e da blindagem, formando um cone de alívio de tensão elétrica que provoca uma melhor distribuição das linhas de campo elétrico (MAMEDE FILHO, 1994). Este cone de alívio ou de deflexão pode ser feito de várias maneiras utilizando meios isolantes líquidos, gasosos ou polímeros com alto nível de isolamento.

2.6 MANTAS POLIMÉRICAS

As mantas poliméricas são confeccionadas a partir da borracha natural, um produto sólido obtido pela coagulação de látices de determinados vegetais, sendo o principal a *Hevea Brasiliensis*. Embora seja grande o número de espécies que por uma incisão na casca fluem secreção de aspecto semelhante ao látex, somente algumas produzem quantidade e qualidade suficientes para exploração em bases econômicas (KOWALSKI, 2006).

A borracha natural obtida possui desvantagens tais quais, ser perecível e putrefável, estar misturada a outras substâncias que não a borracha, e ser pegajosa e sensível à temperatura. Para obter-se uma borracha com melhores propriedades dentro da aplicação desejada, após a coagulação e secagem seguida do aquecimento, deve-se proceder a mistura, que consiste na adição de cargas e aditivos, e sua dispersão homogênea na matriz. As principais cargas e aditivos empregados são o enxofre, óxido de zinco, ácido esteárico, aceleradores orgânicos, anti-ozonantes e antioxidantes, agentes de fluxo, plastificantes,

esponjantes e cargas minerais entre as quais se destaca a mica e o negro de carbono (KOWALSKI, 2006).

O processo de mistura é realizado por meio do misturador de cilindros aberto ou fechado (*Banbury*) onde variáveis como pressão, temperatura e tempo de mistura, bem como a ordem de adição das cargas e aditivos, influenciam sobre as propriedades finais do composto. À mistura segue-se a conformação, onde por meio de moldes em processos contínuos, quando extrusão, ou intermitente, na termo prensagem, dá-se a forma final ao material o (EPR). Um processo bastante empregado principalmente na indústria de luvas é a dissolução do composto em solvente, onde a conformação passa a ser feita pela imersão dos moldes na solução de borracha, ou pela pintura como ilustra a Figura 26 (KOWALSKI, 2006).

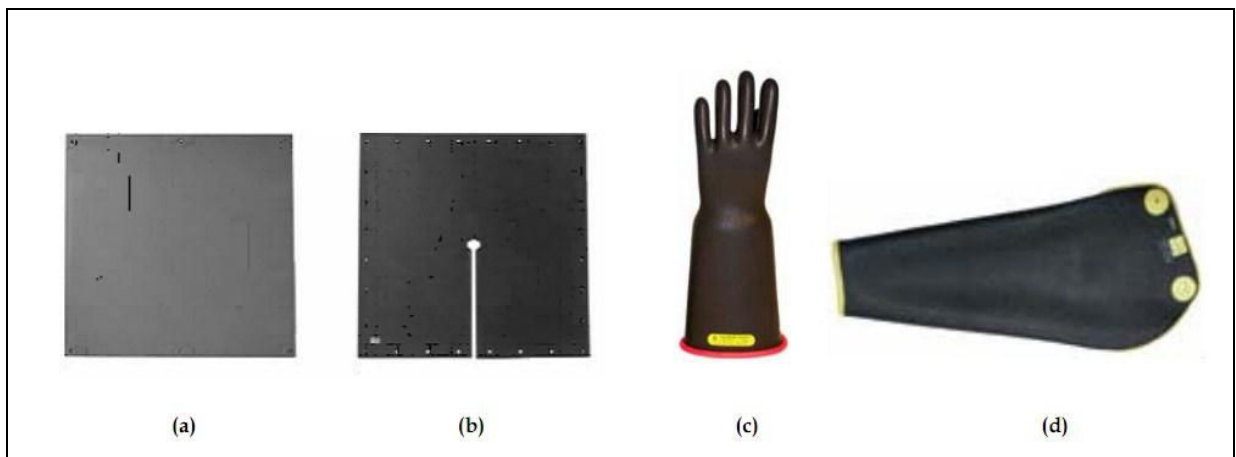


Figura 26 - Ferramentas usadas em serviço de linha viva. Em (a) e (b) lençóis isolantes, (c) luva isolante e (d) manga isolante
Fonte: (KOWALSKI, 2006).

CAPÍTULO – 3

3 METODOLOGIA

Para analisar as arborescências nos materiais poliméricos XLPE e EPR, foram feitos os seguintes procedimentos:

- Indução de arborescências em amostras EPR e XLPE;
- Avaliação de arborescência por microscopia óptica para materiais XLPE;
- Avaliação de arborescência por contraste de fase de raios X para materiais EPR e XLPE.

As induções de arborescências em amostras EPR e XLPE foram feitas a fim de obter amostras que possibilitem a validação da metodologia proposta de avaliação de arborescências.

A avaliação de arborescência por microscopia óptica foi feita para comprovar a existência de arborescências nos corpos de prova retiradas das amostras de cabo isolado em XLPE.

Os procedimentos de avaliação da arborescência por contraste de fase de raios X foram feitos logo após a avaliação de arborescência por microscopia óptica para amostras de cabo isolado em XLPE, buscando localizar e identificar as arborescências de forma a facilitar o estudo da metodologia de avaliação das arborescências por contraste de fase de raios X.

Para amostras EPR não é possível realizar a técnica de avaliação de arborescência por microscopia óptica devido ao fato do material ser de difícil corte a temperatura ambiente.

3.1 INDUÇÃO ARBORESCÊNCIAS EM AMOSTRAS EPR E XLPE

As induções de arborescências em amostras EPR e XLPE foram feitas por meio do ensaio de ruptura dielétrica por tensão elétrica, e os procedimentos foram realizados de acordo com procedimentos referenciados na literatura (DENSLEY, KALICKIL, & NADOLNY, Feb. 2001; ASTM-D149-09, 2009; TANAKA, OKAMOTO, NAKANISHI, & MIYAMOTO, Oct. 1993; SWINKA, 2000).

3.1.1 INDUÇÃO ARBORESCÊNCIAS EM CABOS EPR E XLPE

Os ensaios de ruptura dielétrica por tensão aplicada pontualmente, em cabos isolados, foram feitos com tensão alternada na frequência de 60 Hz e temperatura ambiente. Foi aplicada uma tensão V_0 (fase-terra), em amostras de cabo entre o eletrodo introduzido na isolação do cabo e o condutor aterrado até a ocorrência da perfuração como é demonstrado na Figura 27.

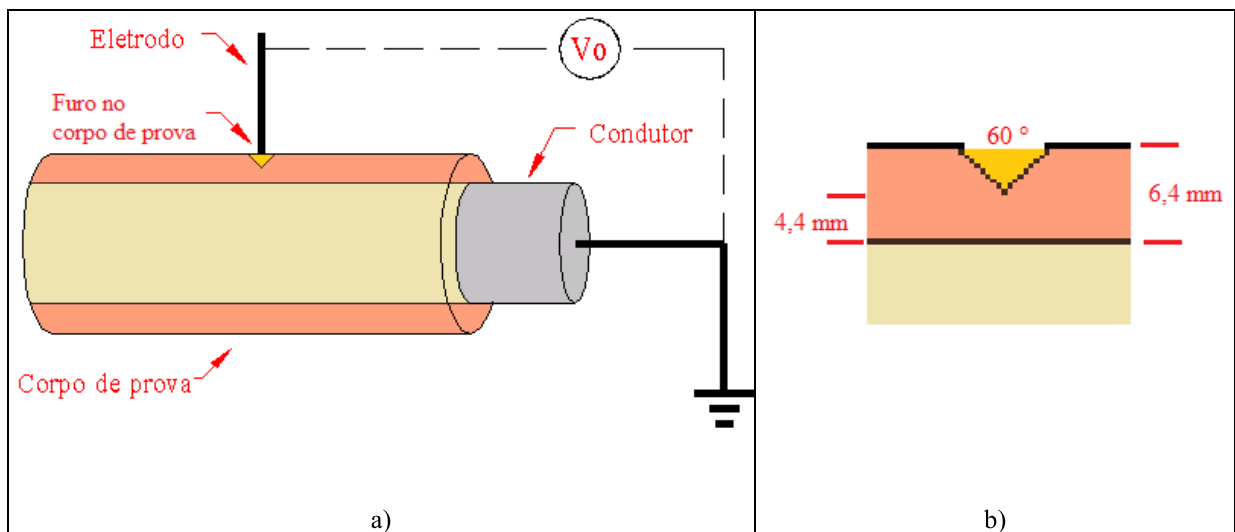


Figura 27 - Montagem do corpo de prova no ensaio de ruptura dielétrica pontual, a) visão geral, b) dimensões do furo no corpo de prova

Fonte: (CARONIA, FURNO, PANG, & SZANISZLO, 1999).

Na preparação da amostra foi feito um furo de 2 mm com ângulo de 60° , a fim de propiciar uma concentração de campo elétrico nesta região e diminuir a distância do dielétrico entre os eletrodos, diminuindo assim o nível de tensão de ruptura dielétrica.

O circuito de ruptura dielétrica está ilustrado na Figura 28, que mostra os instrumentos e equipamentos que constituem este circuito, que são:

- *TP1* - Transformador de potência General Eletric, 1 Fase, 80000/115 V, 50/60 Hz, 1000 VA, Classe 0,3;
- *TP2* - Transformador de potência Hitachi Line, 1 Fase, 69000 V, 60 Hz, 1000 VA, Classe 0,3;
- *VT* - Fonte Variável NF-Corporation, 4420 series AC, Power Supply single-phase system.

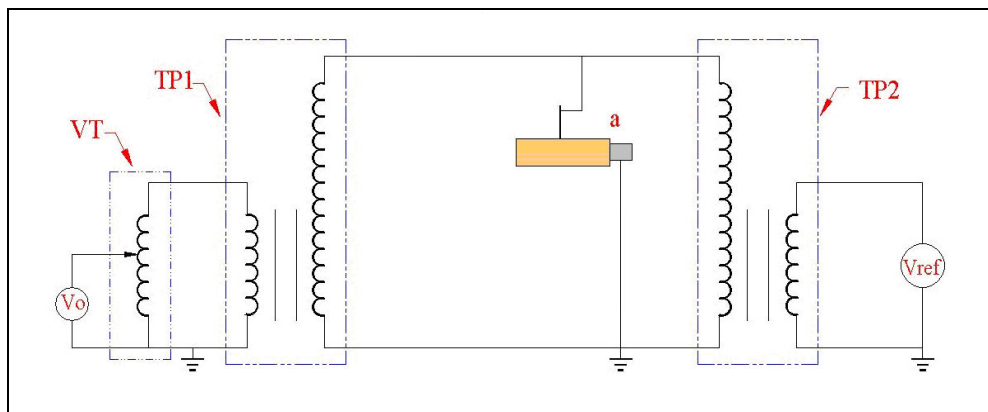


Figura 28 - Diagrama esquemático do circuito do ensaio de ruptura dielétrica pontual.

O transformador de potência (TP1) acoplado a um variador de tensão (VT) permitiu elevar a tensão (V_o) de 0 a 40 kV. O transformador de potência (TP2) foi utilizado como referência da tensão aplicada (V_{ref}).

A amostra foi montada dentro de um caixa de acrílico imersa em óleo mineral isolante, com rigidez dielétrica de 40 kV/mm, a fim de evitar descargas disruptivas (*flashover*) na superfície da amostra e de concentrar o campo elétrico na agulha, como ilustra a Figura 29. Foi elevada a tensão elétrica a uma taxa de 1 kV/s até o valor da tensão de ruptura das amostras, assim permanecendo até o momento de ruptura.



Figura 29 - Montagem da amostra no ensaio de rigidez dielétrica.

3.1.2 INDUÇÃO ARBORESCÊNCIAS EM LENÇÓIS DE BORRACHA NATURAL EPR

Os ensaios de ruptura dielétrica por tensão aplicada em lençóis de borracha natural EPR, foram feitos com tensão alternada na frequência de 60 Hz e temperatura ambiente. Foi aplicada uma tensão V_0 (fase-terra), entre dois eletrodos circulares, sendo o inferior de 75 mm de diâmetro e 15 mm de espessura e o superior de 50 mm de diâmetro e 25 mm de espessura, até a ocorrência da perfuração como ilustra a Figura 30.

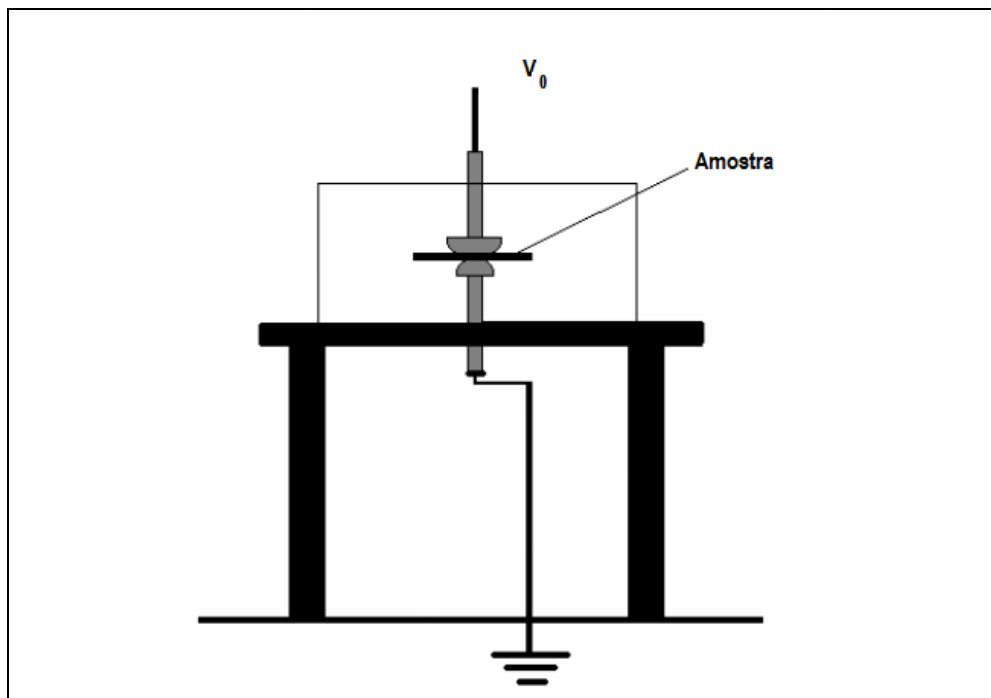


Figura 30 - Diagrama esquemático da amostra no ensaio de rigidez dielétrica.

A amostra foi montada dentro de um caixa de acrílico imersa em óleo isolante com rigidez dielétrica de 40 kV/mm, a fim de evitar descargas desruptivas (*flashover*) na superfície da amostra e concentrar o campo elétrico nos eletrodos, como ilustra a Figura 30 e Figura 31. Também foi elevada a tensão elétrica a uma taxa de 1 kV/s até o valor da tensão de ruptura das amostras, assim permanecendo até o momento de ruptura.

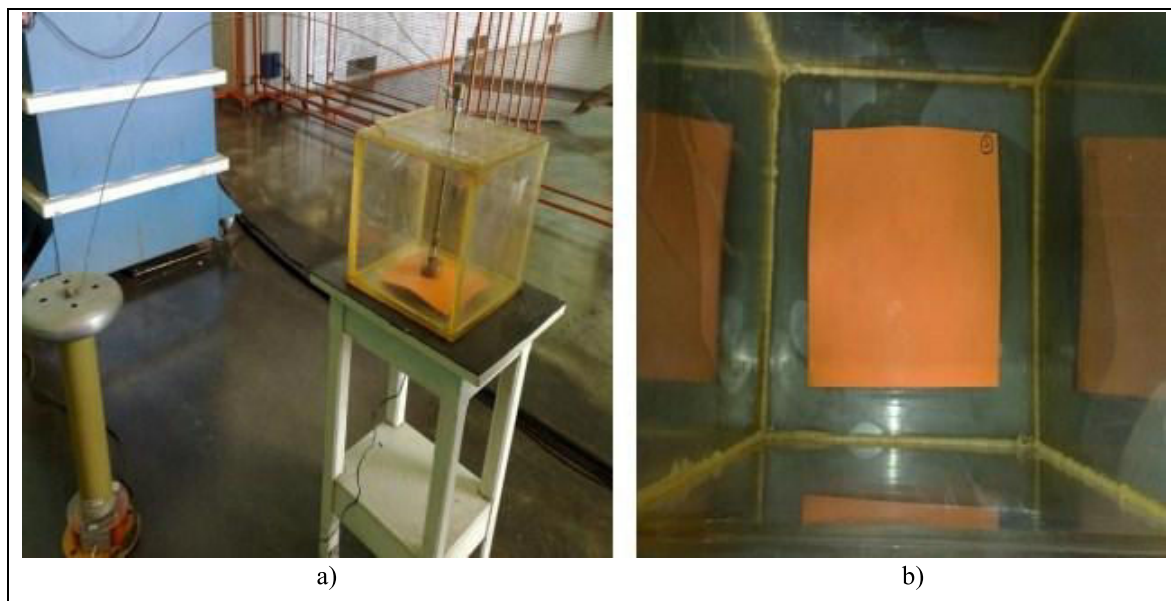


Figura 31 - Foto da cuba em acrílico utilizada para os processos de ruptura dielétrica nas amostras. A cuba possui um conjunto de eletrodos especificados nas normas da ASTM para ensaios de rigidez dielétrica, a) Vista diagonal, b) Vista superior

Fonte: (MIURA & SCHOLZ, 2010)

3.2 AVALIAÇÃO DE ARBORESCÊNCIA POR MICROSCOPIA ÓTICA

Os procedimentos de avaliação da arborescência foram iniciados em amostras de cabos isolados em XLPE envelhecidas em campo, que sofreram a ruptura dielétrica após ensaios de ruptura dielétrica. Após localizar a ruptura é realizada uma análise em torno do cabo isolado, percorrendo uma distância de 100 mm anterior e posterior do local de ruptura como ilustra a Figura 32.

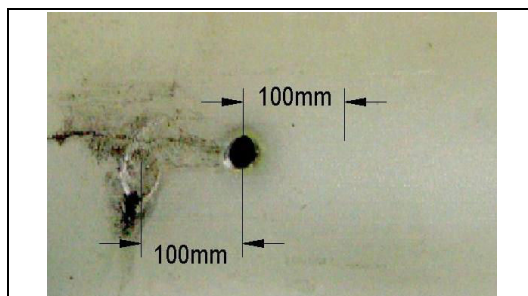


Figura 32 - Local da ruptura no cabo isolado
Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2008).

Com as amostras definidas, foram feitas várias fatias no sentido axial de 100 a 150 μm , com o aparelho de corte Leica, modelo RM2165 conforme Figura 33 gerando vários corpos de prova para a avaliação.



Figura 33 - Máquina de corte axial
Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2008).

Para visualização das arborescências, os corpos de prova foram limpos com álcool isopropílico e mergulhados em uma solução corante com uma temperatura próxima de 80 °C durante um período de 4 horas para uma melhor visualização das arborescências. A solução utilizada nesta técnica é uma solução aquosa com 250 ml de água destilada, com 8 ml de amônia e 0,5 g de azul de metileno. A Figura 34 ilustra um corpo de prova após a imersão na solução corante e a Figura 35 ilustra a solução de coloração das amostras em aquecimento (LEGUENZA, 2003; BULINSKI, CRINE, NOIRHOMME, DENSLEY, & BAMJI, 1998; ROSS, SMIT, & AUKEMA, 1992; MALIK, AL-ARAINY, & QURESHI, The Role Of Cations In Water Tree Growth In Technical Grade Xlpe Insulated Cables, 2007).



Figura 34 - Amostra de cabo preparado para análise de arborescência
Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2008).



Figura 35 - Solução de coloração das amostras em aquecimento a) Montagem do sistema com misturador, b) montagem do sistema com condensador e misturador.

Desta forma, com o auxílio do microscópio óptico marca Leitz Wetzlar, modelo MM6 ilustrado na Figura 36, é possível identificar as arborescências nas amostras, quantificá-las e medi-las para avaliações posteriores.



Figura 36 - Microscópio óptico
Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2008).

As fatias dos corpos de prova em que se encontram arborescências foram tomadas para estudo, quantificadas, mensuradas e fotografadas.

3.3 AVALIAÇÃO DE ARBORESCÊNCIA POR CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X

Para aquisição das imagens radiográficas, foi utilizado o sistema de Radiografia Digital Portátil (RDP) do laboratório de Tomografia Industrial do LACTEC. Para o controle da energia e corrente do feixe foi utilizado o painel de controle RDP, mostrado na Figura 37, confeccionado pelo laboratório de Tomografia Industrial do LACTEC.

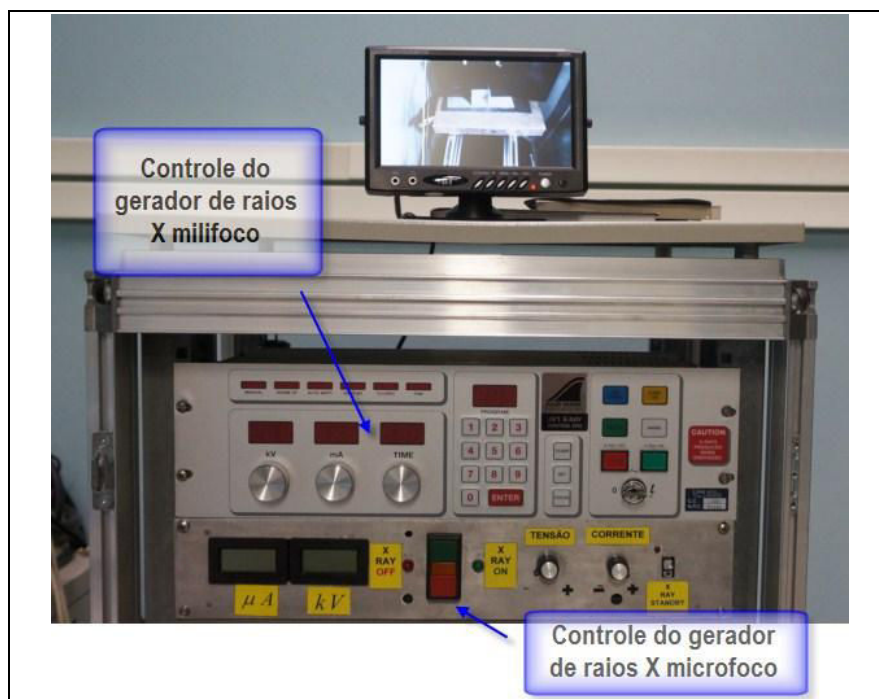


Figura 37 - Painel de controle dos geradores de raios X fabricante LACTEC
Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2008).

Para posicionar a amostra e o gerador de raios X microfoco com maior precisão, foi utilizado o sistema mecânico de mesa do tomógrafo fabricado no LACTEC. A mesa do tomógrafo possui um sistema de suporte de amostra, que tem a função de gerar os movimentos de rotação, translação vertical e translação horizontal da mesa giratória, feita por acionamento computacional ou manual. O sistema é composto por um carro principal, que se desloca sobre a estrutura mecânica, apoiado no cavalete principal como ilustra a Figura 38 e dois fusos acoplados a motores de passo (sendo um responsável pela elevação e outro pelo deslocamento horizontal), ambos atuando na mesa giratória que suporta a amostra. Um terceiro motor de passo atua diretamente no movimento de rotação da mesa. Os mecanismos são apoiados em guias esféricas e rolamentos para redução do atrito e precisão do posicionamento.

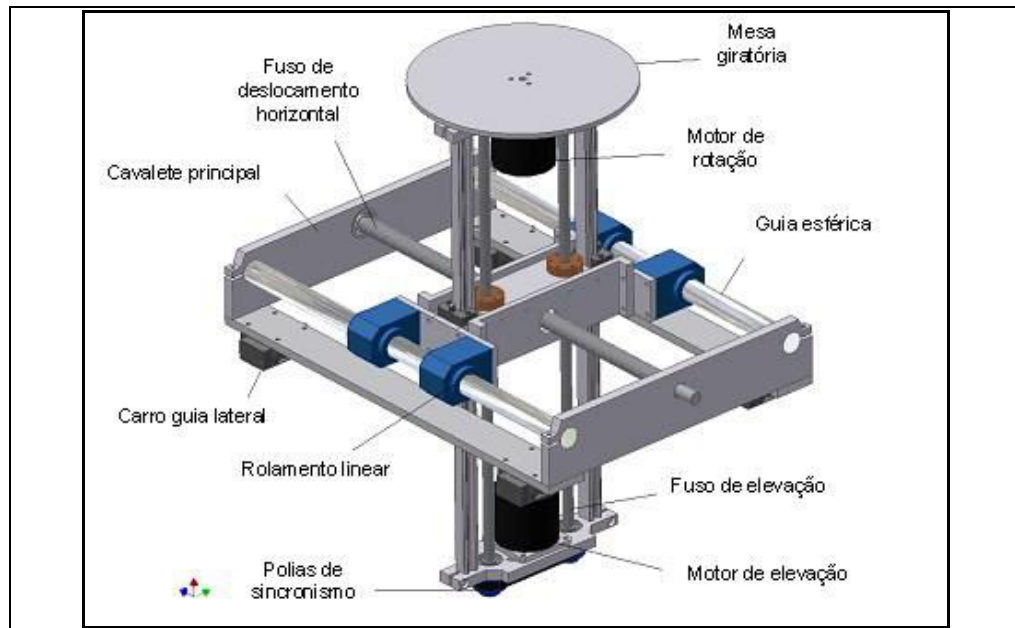


Figura 38 - Componente principal da mesa tomográfica para deslocamento da amostra.

O carro principal é suportado com guias lineares na estrutura da mesa e pode ser posicionado manualmente com curso total de 1.400 mm como ilustra a Figura 39. O deslocamento vertical e o horizontal apresentam curso total de 250 mm e o movimento rotacional bidirecional de 1 °.

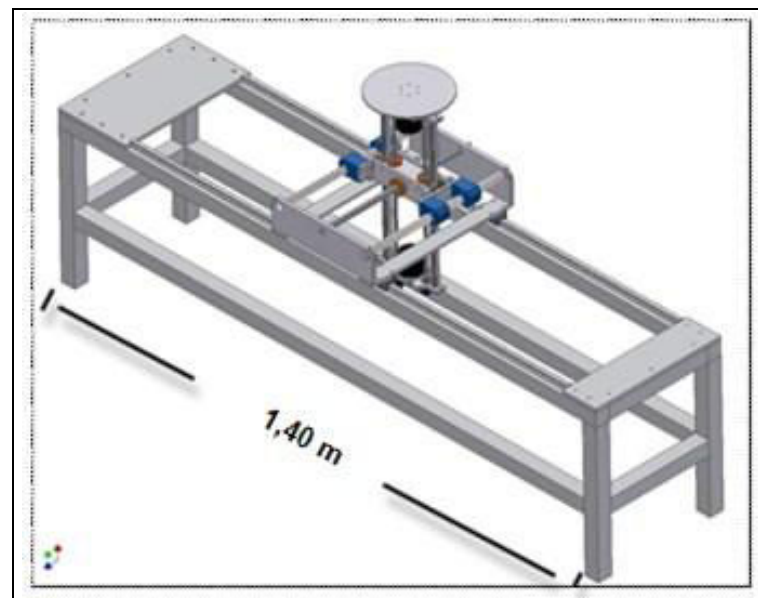


Figura 39 - Mesa tomográfica.

A mesa do tomógrafo também possui um carro de deslocamento e sustentação do gerador de raios X microfoco, que pode ser tirado dessa mesa e colocado em distâncias

maiores. Este carro tem uma movimentação manual e aproximação máxima do detector de até 400 mm. Para aproximações menores, tanto do detector quanto ao gerador de raios X, deve ser utilizado um suporte de amostra acoplado a mesa giratória. A Figura 40 ilustra uma fotografia da mesa tomográfica com o gerador microfoco de raios X e o detector digital de raios X fixado no suporte.

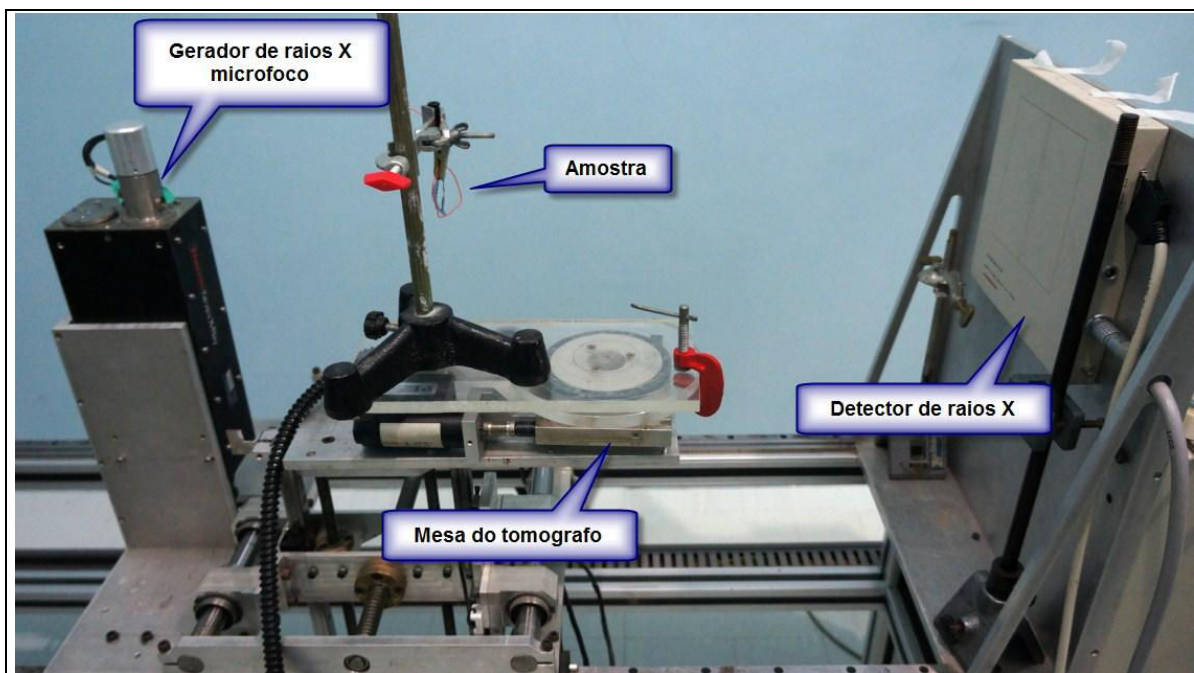


Figura 40 - Foto do protótipo com o gerador de raios X e detector digital de raios X.

Para o controle da aquisição das projeções e o controle da mesa giratória, foi utilizado um microcomputador, que controla o acionamento do motor da mesa giratória e a aquisição de radiografias por meio dos detectores digitais de raios X.

3.3.1 GERADORES DE RAIOS X

Neste trabalho foi utilizado dois geradores de raios X. O primeiro foi o gerador de raios X microfoco, modelo PXS5-722SA (Thermo Kevex X-Ray Inc.), mostrado na Figura 41, que possui as seguintes características:

- Tamanho do foco: $10\mu \times 10\mu \text{ m}^2$;
- Alvo de tungstênio;

- Faixa de tensão: 12,5 a 70 kV em corrente máxima;
- Faixa de corrente: 0 a 100 μ A;
- Potência: 7 W;
- Material da janela: Berílio;
- Diâmetro: 9,4 mm;
- Espessura: 0,13 mm;
- Grau de iluminação do cone de raios X: 34 graus;
- Unidade de controle (Figura 37).



Figura 41 - Gerador de raios X fabricante Kevex
Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2008).

O segundo foi o gerador de raios X milifoco modelo MXR-225HP/11 desenvolvido pela empresa COMET mostrado na Figura 42. O gerador de raios X possui as seguintes características:

- Tamanho do foco: 0,4 e 1,0 mm;
- Alvo de tungstênio;
- Faixa de tensão: 20 a 225 kVp;
- Faixa de corrente: 0 a 10 mA;
- Potência: 1800 W;
- Unidade de controle (Figura 37).

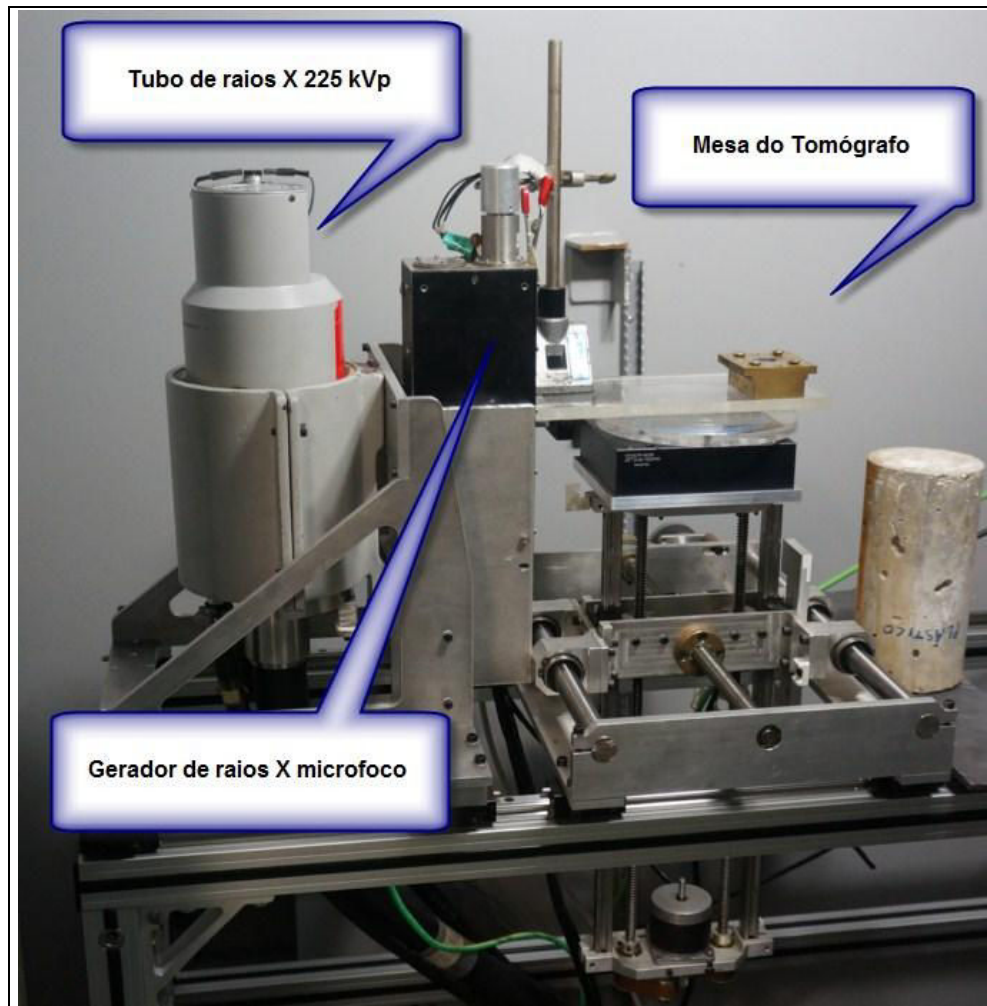


Figura 42 - Geradores de raios X.

Os geradores de raios X se encontram instalados em uma cabine blindada para energias de até 225 kVp e 20 mA.

3.3.2 DETECTORES DE RAIOS X

Para detecção das imagens radiográficas foram utilizados quatro tipos de detectores de raios X, escolhidos com o intuito de verificar se a metodologia se aplica para os detectores selecionados, buscando mostrar suas vantagens e desvantagens frente a metodologia proposta.

3.3.2.1 DETECTOR DE RAIOS X COM TECNOLOGIA CMOS

Para a aquisição de radiografias de objetos menores foi possível utilizar o detector de raios X modelo Hamamatsu CT7942 o qual utiliza a tecnologia com fotodetectores CMOS (semicondutor metal-óxido complementar) (ROCHA J. G., 2003), mostrado na Figura 43, o qual possui as seguintes características:

- Área de detecção: 11,7 x 11,2 cm;
- Dimensão espacial da imagem: 2344 x 2240 *pixels*;
- Tamanho do *pixel*: 50 x 50 μm^2 ;
- Resolução em profundidade (saída digital): 12 *bits* (4096 níveis de cinza);
- Dinâmica das imagens coletadas: 9 *frames/s* (4 x 4 *binning*);
- Sensibilidade de energia : 20 keV a 70 keV;
- Placa de Aquisição (*framegrabber*) modelo: NI/IMAQ PCI-1422.



Figura 43 - Detector de raios X fabricante HAMAMATSU
Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2008).

Para melhorar a sensibilidade do detector ilustrado na Figura 43, foi retirada a tampa de proteção do detector como ilustra a Figura 44. Com a retirada da tampa de proteção o detector aumentou a sensibilidade em torno de 30 % em relação à energia detectada.

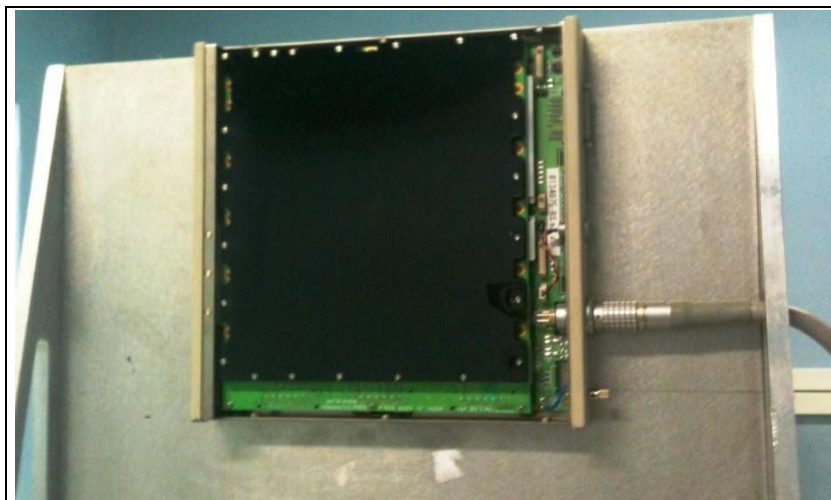


Figura 44 - Detector de raios X sem a tampa de proteção.

3.3.2.2 DETECTOR DE RAIOS X TECNOLOGIA SILÍCIO AMORFO

Para a aquisição de imagens radiográficas com um controle de tempo de integração maior, em torno de 5 minutos devido ao sinal ruído da imagem, foi utilizado o detector de raios X modelo Perkinelmer XRD 1622 AP14 o qual utiliza tecnologia com silício amorfo (a-Si), mostrado na Figura 45, que possui as seguintes características:

- Área de detecção: 41 x 41 cm;
- Dimensão espacial da imagem: 2048 x 2048 *pixels*;
- Tamanho do *pixel*: 200 x 200 μm^2 ;
- Resolução em profundidade (saída digital): 16 *bits* (65536 níveis de cinza);
- Sensibilidade de energia : 20 keV a 15 MeV;
- Dinâmica das imagens coletadas: 4 *frames/s* (2 x 2 *binning*);



Figura 45 - Detector de raios X fabricante *PERKINELMER*.

O detector da Perkinelmer apresentou resultados satisfatórios em relação à técnica aplicada, sendo uma das melhores características deste detector, além do controle de integração, a resolução em profundidade de 16 bits, que possibilita análises mais pontuais em certos níveis de cores. Uma das dificuldades de análise encontradas neste detector foi o tamanho do pixel de 200 μm , devido a magnitude das imagens para a visualização das arborescências desejadas.

3.3.2.3 DETECÇÃO DE RAIOS X POR FILMES RADIOGRÁFICOS

Para detecção das projeções geradas pelo feixe de raios X foram utilizados filmes mamográficos do fabricante Kodak modelos Min-R S e Min-R 2000, os quais possuem as características descritas na Tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de filmes mamográficos

Filme	Min-R S	Min-R 2000
Dimensão	18x24 cm	
Velocidade Relativa ¹	100 (Média)	150 (Rápida)
Ruído	Mais Baixo	Baixo
Nitidez	Alta	
Contraste RP / EX ²	3,40 / 3,60	
Granulação	± 25 µm	
Resolução em profundidade ³	13 bits (8192 níveis de cinza)	

- (1) Velocidade relativa determinada a partir de radiografias de densidade correspondente: para referência, filme Min-R M da Kodak com écran Min-R determinados arbitrariamente a uma velocidade relativa de 100.
- (2) Constante medida com o gradiente médio entre densidades 0,25 e 2,00 acima do fog bruto usando sensitometria quadrada inversa.
- (3) De acordo com o digitalizador.

Fonte: (HEALTH, 2009; RADIO IN MAMA, 2013).

A Figura 46 ilustra um dos filmes mamográficos utilizados.

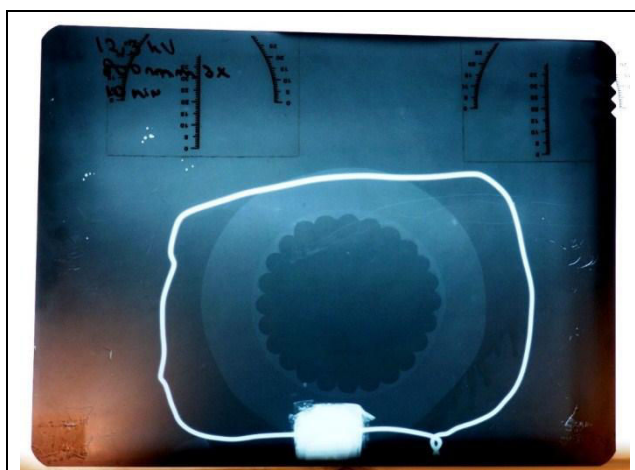


Figura 46 - Visualização do filme mamográficos Min-R S no negatoscópio odontológico.

A Figura 47 ilustra o primeiro sistema utilizado para exposição dos filmes mamográficos, no qual o gerador de raios X e a amostra se encontram em um suporte de concreto, para evitar trepidações e o filme se encontra em um suporte de alumínio sobre uma mesa estável.

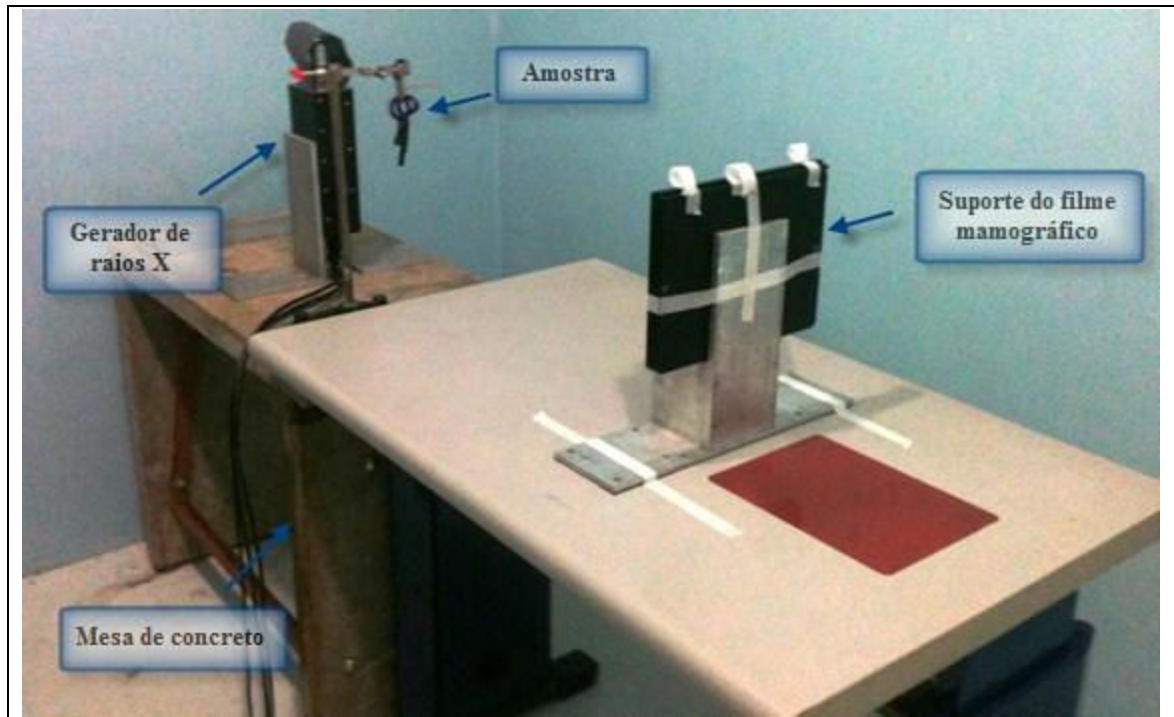


Figura 47 - Foto do primeiro sistema utilizado para exposição dos filmes mamográficos por raios X.

O segundo sistema utilizado foi o interno à cabine blindada para energias de até 225 kVp e 20 mA. Dentro desse sistema foi acoplado o suporte de alumínio do filme mamográfico como ilustra a Figura 48.

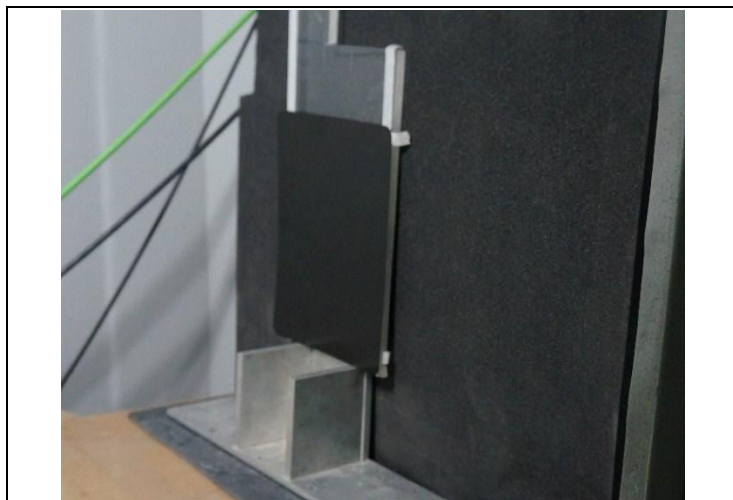


Figura 48 - Foto do segundo sistema utilizado para exposição dos filmes mamográficos por raios X, acoplado a cabine blindada.

Para a revelação dos filmes mamográficos foi utilizado os produtos químicos descritos a seguir:

- Revelador: Revelador Mamoray MR32 V1 – indústria AGFA;
- Fixador: Rapid Fixer G 334i A e B – indústria AGFA;
- Água destilada.

Inicialmente para avaliação de quais tempos e temperaturas seriam ideais para revelação dos filmes, foi montado o sistema que possui no elemento químico revelador um controle de temperatura.

Nas avaliações dos tempos de revelação foi verificado que o a metodologia mais adequada foi à temperatura ambiente (23 °C), com tempo necessário para revelação de 4 minutos (sendo agitado o filme na água destilada), 30 segundos para limpeza na água destilada, 2 minutos no fixador e 30 segundos na água destilada para limpeza final do filme.

3.3.2.4 DETECTOR DE RAIOS X CCD'S

O quarto detector de raios X utilizado foi o detector CCD's da Princeton Instruments, inc. localizado no laboratório LORXI/UFPR, mostrado na Figura 49, que possui as seguintes características:

- Área de detecção: 2,6 x 2,8 cm;
- Dimensão espacial da imagem: 1152 x 1242 pixels;
- Tamanho do pixel: 22,5 x 22,5 μm^2 ;

- Resolução em profundidade (saída digital): 16 bits (65536 níveis de cinza);
- Dinâmica das imagens coletadas: 1 *frames/s*;



Figura 49 - Detector de raios X fabricante Princeton Instruments.

O detector da Princeton Instruments apresentou resultados satisfatórios em relação à técnica aplicada, sendo uma das melhores características deste detector o tempo de integração das imagens, que pode ser superior a 01 hora. Outra característica interessante foi a resolução em profundidade de 16 bits, que possibilitou análises mais pontuais. O detector da Princeton trabalha somente com baixas energias na ordem máxima de 20 kVp.

3.3.3 CORREÇÃO DE RUÍDOS FIXOS

Para a correção de ruídos fixos provocados pela aquisição de imagens radiográficas em sistemas digitais, utilizam-se técnicas de subtração da imagem escura ou branca e a correção do campo luminoso. A técnica de subtração da imagem de *background* $I_p(x,y)$ (imagem adquirida sem o feixe de raios X) e a radiografia de raios X adquiridas $I_{or}(x,y)$, essa técnica utiliza a equação (17) (HAMAMATSU, 2007).

$$I_{rs} = I_{or}(x,y) - I_p(x,y) \quad (17)$$

Onde:

- $I_{or}(x,y)$ é a imagem original;
- $I_p(x,y)$ é a imagem *background*;
- $I_{rs}(x,y)$ é a imagem resultante da subtração.

Para corrigir os níveis de cinza da imagem $I_{rs}(x,y)$ é necessário realiza a equalização do histograma como mostra a equação (18) (HAMAMATSU, 2007).

$$I_{rse}(x,y) = \left(\frac{I_{rs}(x,y) - I_{min}}{I_{max} - I_{min}} \right) nc \quad (18)$$

Onde:

- $I_{rse}(x,y)$ é a imagem resultante da equalização do histograma;
- I_{min} é o menor valor de nível de cinza das imagens;
- I_{max} é o maior valor de nível de cinza das imagens;
- nc é o valor definido para a equalização dos níveis de cinza.

O resultado da técnica de subtração da imagem escura é demonstrado na Figura 50.

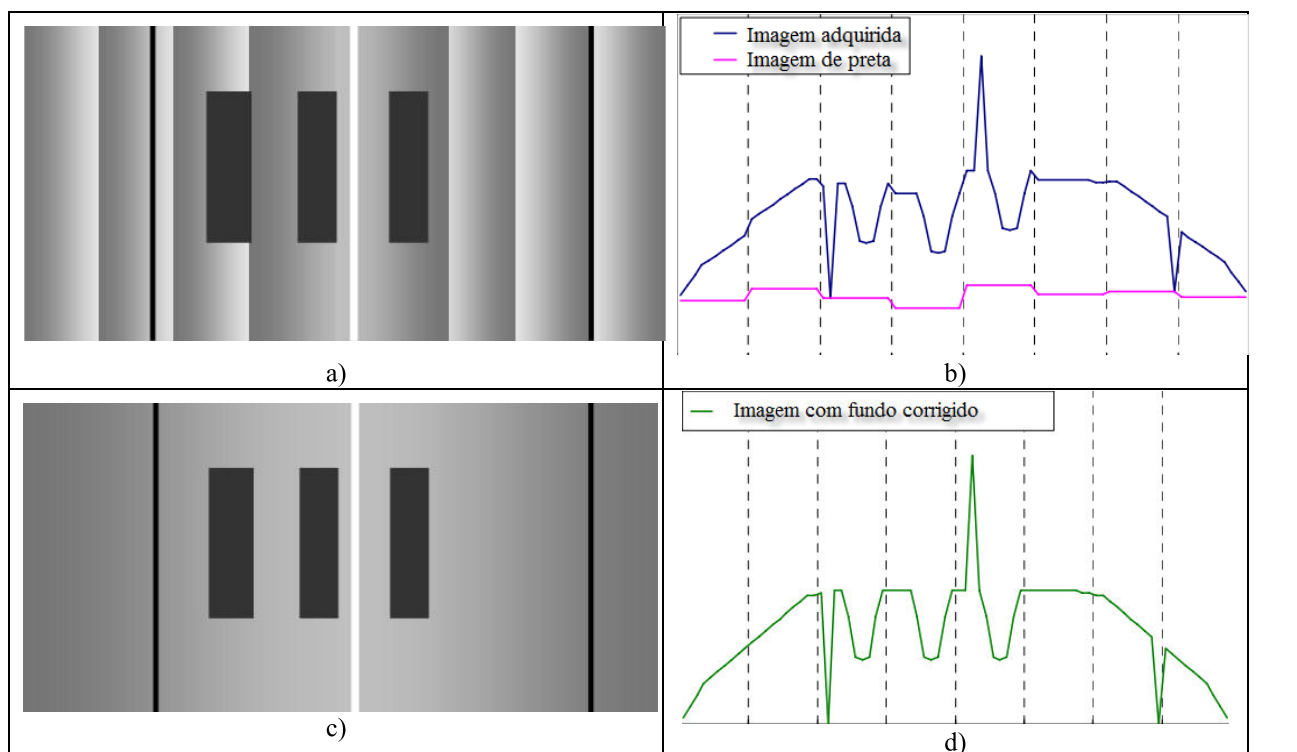


Figura 50 - Exemplo da subtração da imagem escura, a) Imagem original, b) Grafico da imagem original, c) Imagem resultante, d) Grafico da imagem resultante.

Fonte: (HAMAMATSU, 2007).

A técnica de correção do campo luminoso utiliza imagem *background* $I_p(x,y)$ uma radiografia de raios X branca $I_b(x,y)$ e imagem resultante da subtração da imagem original da

imagem escura $I_{rs}(x,y)$, essa técnica utiliza a equação (19) e a constante c é definida pela equação (20) (HAMAMATSU, 2007).

$$I_c = \left(\frac{I_{rs}(x,y)}{I_b(x,y) - I_p(x,y)} \right) \cdot c \quad (19)$$

$$c = \left(\frac{\sum I_b(x,y) - I_p(x,y)}{\sum np} \right) \quad (20)$$

Onde:

- $I_c(x,y)$ é a imagem com correção do campo luminoso;
- $I_b(x,y)$ é a imagem branca;
- $I_p(x,y)$ é a imagem *background*;
- $I_{rs}(x,y)$ é a imagem resultante da subtração;
- c constante da média.

A Figura 51 mostra a diferença entre as imagens de correção do campo luminoso e a imagem original.

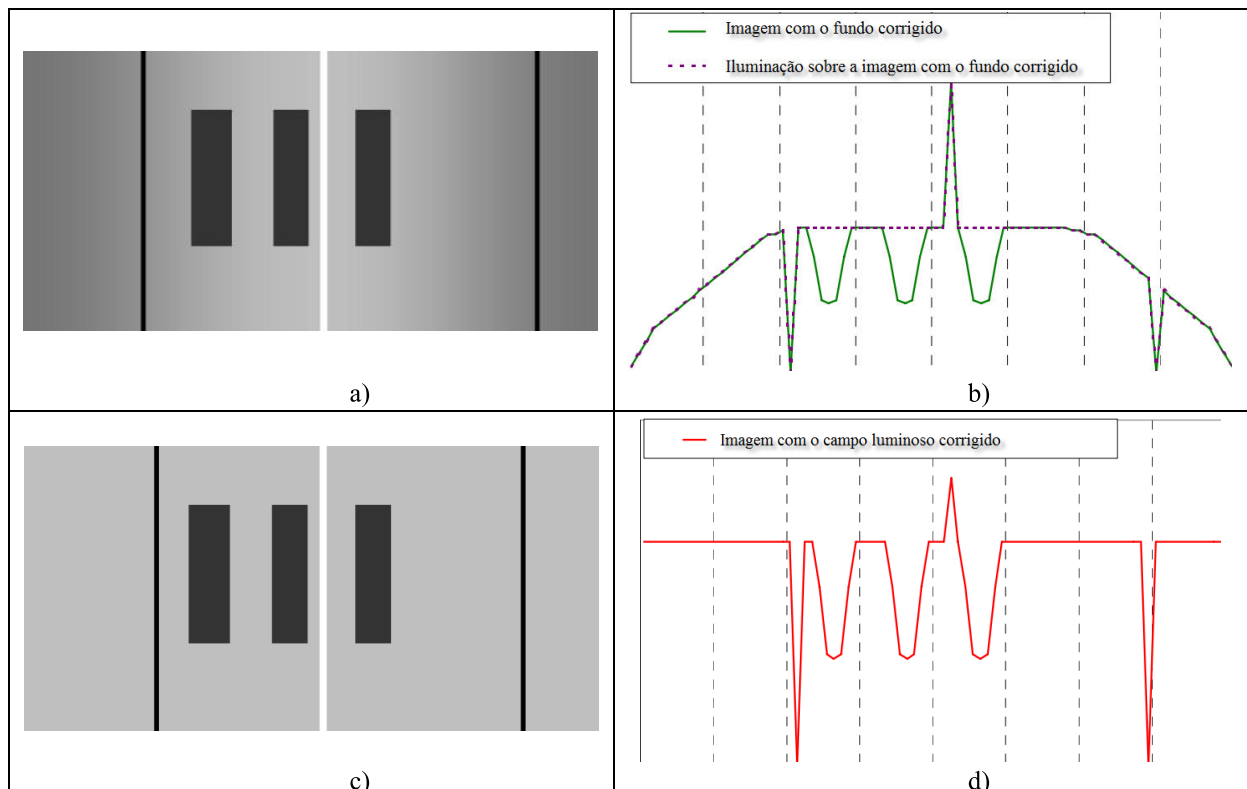


Figura 51 - Exemplo da correção do campo luminoso, a) Imagem resultante com fundo corrigido, b) Grafico da imagem resultante, c) Imagem resultante com correção do campo luminoso, d) Grafico da imagem resultante.

Fonte: (HAMAMATSU, 2007).

CAPÍTULO – 4

4 RESULTADOS

4.1 INDUÇÃO ARBORESCÊNCIAS EM AMOSTRAS EPR E XLPE

A geração de arborescências em laboratório foi feita por meio dos ensaios de ruptura dielétrica por tensão aplicada pontual em cabos isolados XLPE e EPR e ensaios de ruptura dielétrica por tensão aplicada degraus escalonados. As amostras utilizadas foram retiradas de campo e possuem um tempo de uso entre 30 a 35 anos.

Para o ensaio de ruptura dielétrica por tensão aplicada pontual, foram feitos os ensaios em amostras de comprimentos variados de 10 a 30 cm a fim de verificar a influência do tamanho da amostra com referência a descargas desruptivas (*flashover*). Uma das amostras ensaiadas esta demonstrada na Figura 52.

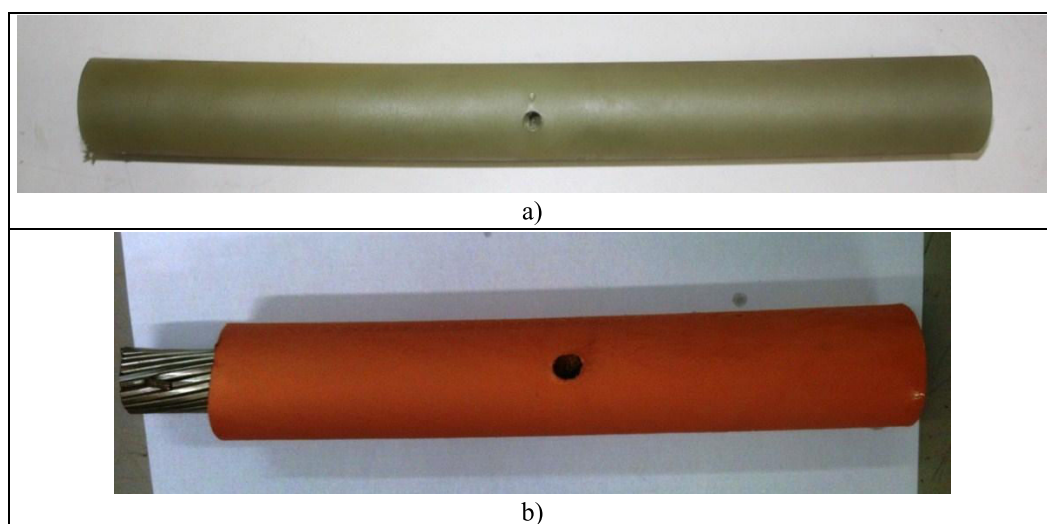


Figura 52 - Amostra após ensaio de ruptura dielétrica, a) amostra de cabo XLPE, b) amostra de cabo EPR.

As amostras foram montadas dentro de uma caixa de acrílico imersa em óleo mineral isolante com rigidez dielétrica de 40 kV/mm, a fim de evitar descargas desruptivas na superfície da amostra. Após os ensaios observou-se que não houve ocorrência de descargas

desruptivas na superfície da amostra, nem trilhamento elétrico ou degradação das amostras através do óleo isolante.

O ensaio foi feito com tensão alternada na frequência de 60 Hz e temperatura ambiente. Foi aplicada tensão V_0 (fase-terra) nas amostras de cabo entre o eletrodo introduzido na isolação e o condutor no valor inicial de 15 kV. A tensão elétrica foi elevada a uma taxa de 1 kV/s até o valor da tensão de ruptura das amostras permanecendo até o momento de ruptura. A Tabela 3 ilustra os valores de ruptura nas amostras avaliadas.

Tabela 3 - Valores de tensão de ruptura dielétrica.

Amostra	Tempo (min.)	Valor de tensão de ruptura dielétrica (kV)
Amostra 01 – Cabo XLPE 15 kV 400mm ²	7	25,2
Amostra 02 – Cabo XLPE 15 kV 400mm ²	26	27,3
Amostra 03 – Cabo XLPE 15 kV 400mm ²	23	27,4
Amostra 04 – Cabo XLPE 15 kV 400mm ²	26	27
Amostra 05 – Cabo XLPE 15 kV 400mm ²	27	26,9
Amostra 06 – Cabo XLPE 15 kV 400mm ²	26	26,8
Amostra 07 – Cabo EPR 15 kV 400mm ²	27	32,8
Amostra 08 – Cabo EPR 15 kV 400mm ²	33	33,5
Amostra 09 – Cabo EPR 15 kV 400mm ²	29	33,2

Após os ensaios, foram selecionadas algumas amostras de cabo isolado em XLPE e EPR para análise da ruptura dielétrica por microscopia óptica com e sem impregnação e avaliação de arborescência por contraste de fase de raios X. Foi observado que o tamanho mínimo de 10 cm da amostra foi adequado para o ensaio de ruptura dielétrica pontual, devido a suportabilidade superficial do material frente a rigidez dielétrica do óleo.

Para o ensaio de ruptura dielétrica por tensão aplicada em degraus escalonados, foram realizados ensaios em amostras de cabo isolado em XLPE de comprimento de 5 metros, com terminações de 40 cm imersas em óleo mineral isolante com rigidez dielétrica de 40 kV/mm como ilustra a Figura 53. O ensaio foi feito com tensão alternada na frequência de 60 Hz e temperatura ambiente. Foi aplicada tensão V_0 (fase-terra) nas amostras entre o condutor do

cabo isolado e a blindagem. A tensão elétrica foi elevada a uma taxa de 1 kV/s até a ruptura da amostra.



Figura 53 – Montagem do ensaio de ruptura dielétrica por tensão aplicada em degraus escalonados em cabo isolado em XLPE.

Os ensaios de ruptura dielétrica por tensão aplicada em lençóis de borracha natural EPR, foram realizados com tensão alternada na frequência de 60 Hz e temperatura ambiente. Foi aplicada tensão V_0 (fase-terra) a uma taxa de 1 kV/s entre dois eletrodos circulares até a ocorrência da perfuração. As amostras foram imersas em óleo mineral isolante com rigidez dielétrica de 40 kV/mm. A Figura 54 demonstra alguma das amostras selecionadas para a avaliação por contraste de fase de raios X.

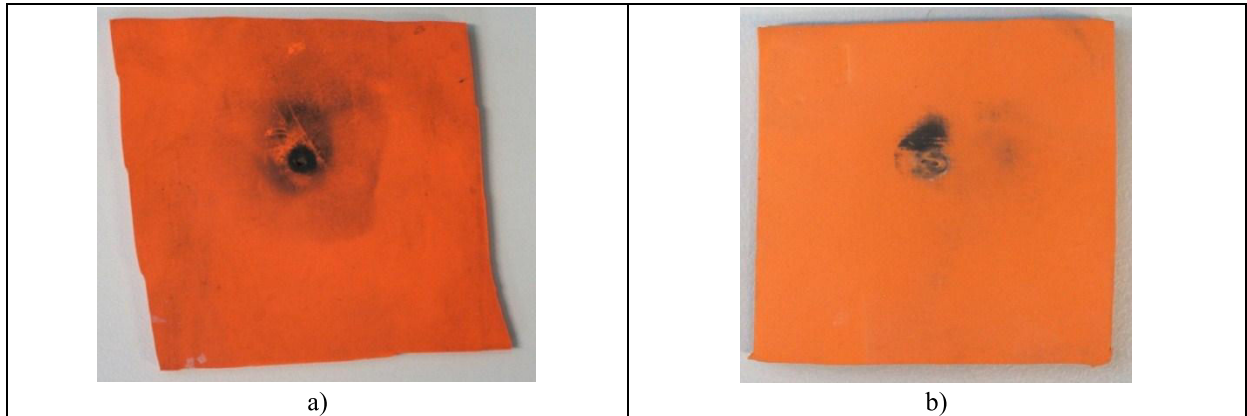


Figura 54 - Amostra de lençóis de borracha natural EPR, a) Amostra 1, b) Amostra 2.

4.2 ARBORESCÊNCIAS ANALISADAS POR MICROSCOPIA ÓTICA

4.2.1 ARBORESCÊNCIAS ANALISADAS POR MICROSCOPIA ÓTICA COM METODOLOGIA CONVENCIONAL

As análises das arborescências por microscopia óptica pela metodologia convencional foram realizadas em torno de cabos isolados em XLPE avaliados no ensaio de ruptura dielétrica por tensão aplicada em degraus escalonados, percorrendo uma distância de 100 mm anterior e posterior do local de ruptura, efetuado cortes perpendiculares a amostra de 100 a 150 μm , com o aparelho de corte Letica ilustrada na Figura 33.

Os corpos de prova foram limpos com álcool isopropílico e mergulhados em uma solução corante com uma temperatura próxima de 80 °C durante um período de 4 horas para uma melhor visualização das arborescências. A solução utilizada nesta técnica é uma solução aquosa com 250 ml de água destilada, 8 ml de amônia e 0,5 g de azul de metileno.

Com o auxílio do microscópio foi possível identificar a posição das arborescências nos corpos de prova, quantificá-las e medi-las, a fim de auxiliar na localização das arborescências, utilizando a técnica de avaliação de arborescência por contraste de fase de raios X.

Foram feitas inspeções de varredura com o microscópio a procura de arborescências em 16 amostras do cabo isolado, no qual foram encontradas arborescências elétricas “*electrical trees*” de várias dimensões e arborescências em água “*water trees*” de várias dimensões. Os resultados das maiores arborescências estão demonstradas na Figura 55 e Figura 56.

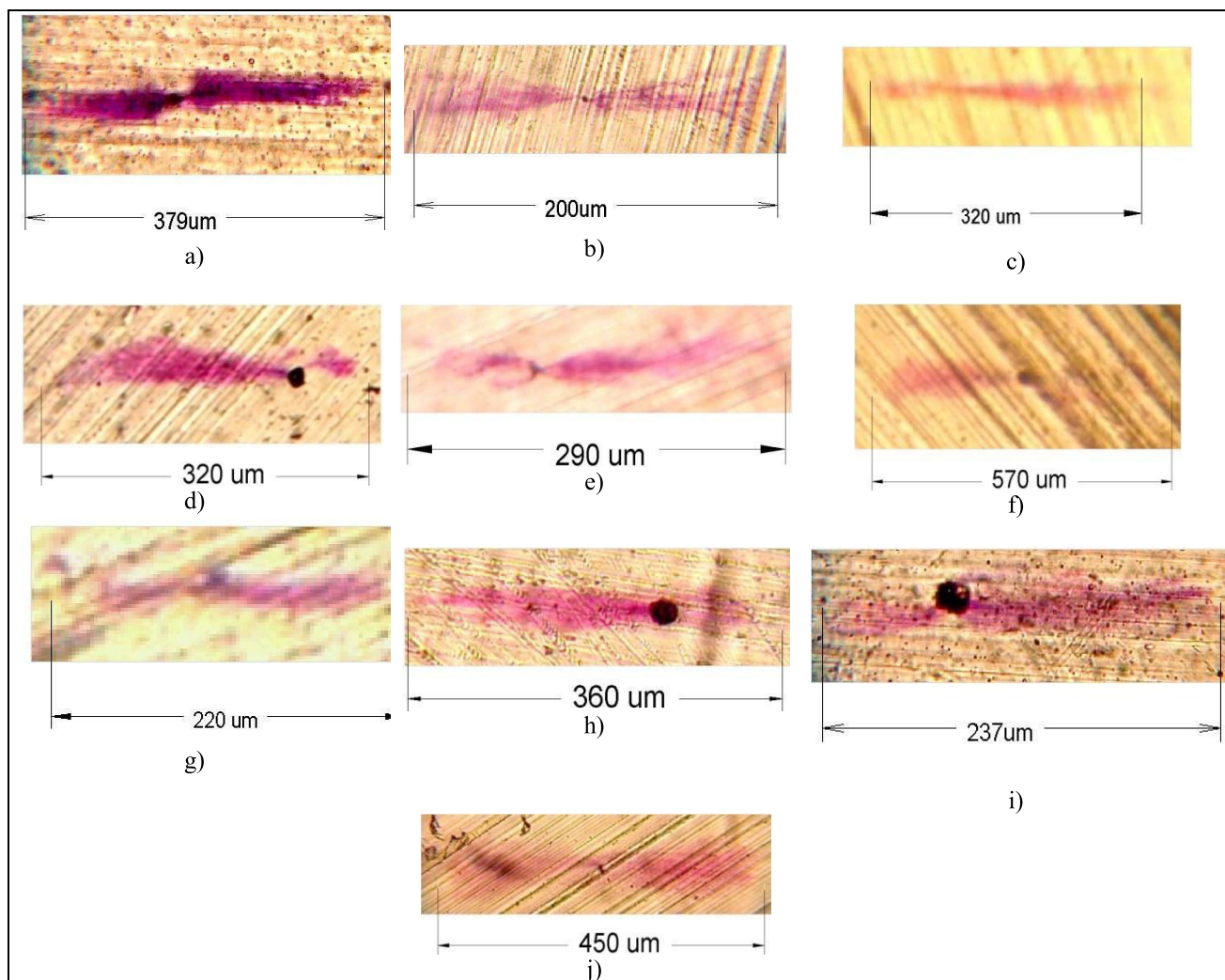


Figura 55 - Dimensões das arborescências em água (*water trees*), a) Amostra 10 – B, b) Amostra 12 – A, c) Amostra 14 – A, d) Amostra 15 – A, e) Amostra 16 – A, f) Amostra 16 – B, g) Amostra 2 – B, h) Amostra 8 – A, i) Amostra 8 – B, j) Amostra 9 – A.

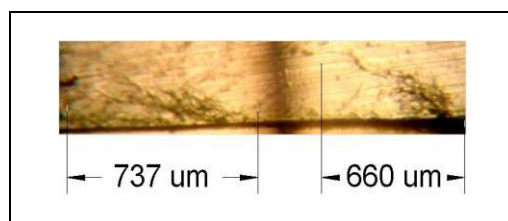


Figura 56 - Dimensões de arborescências elétricas (*electrical trees*), a) Amostra 10 – A, b) Amostra 13 – B, m) Amostra 20 – A.

Com os dados correlacionados entre o valor do ensaio de tensão de ruptura dielétrica das amostras, com a espessura remanescente das maiores arborescências das amostras, foi possível reproduzir o gráfico demonstrado na Figura 57. Este mostra a variação da tensão de ruptura influenciada pelo tamanho da arborescência.

Pode-se observar no gráfico da Figura 57 que ao incluir uma linha de tendência, a espessura total do isolamento do cabo está ligada a maior tensão de ruptura obtida em um cabo novo no ensaio de ruptura dielétrica por tensão aplicada em degraus escalonados.

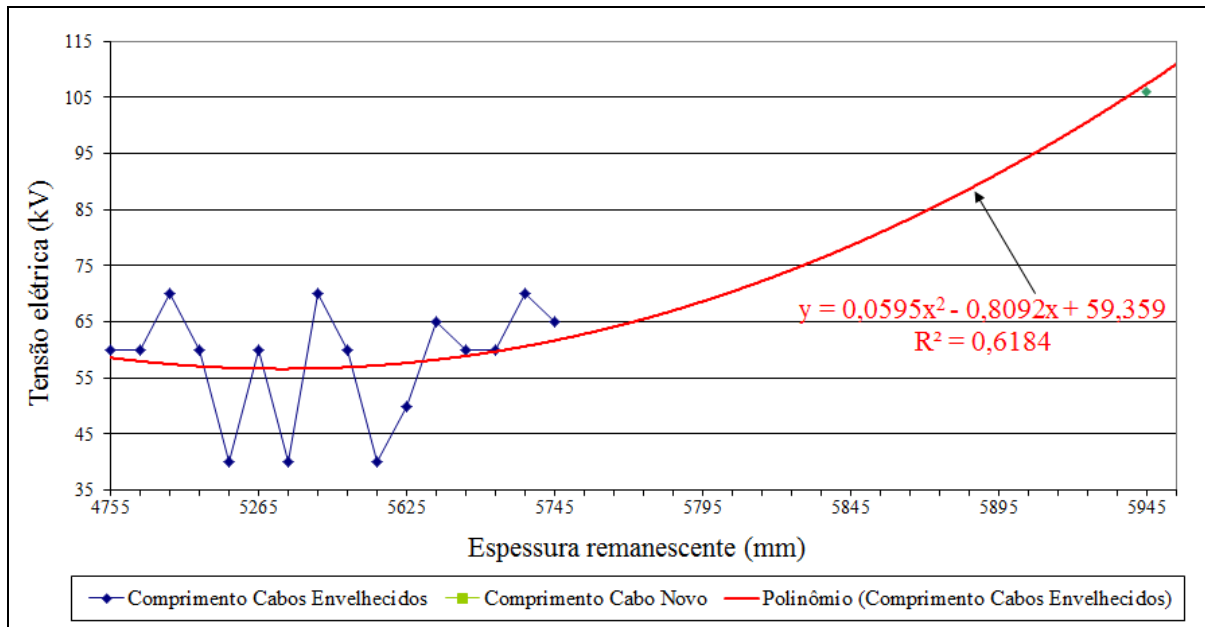


Figura 57 - Espessura remanescente da arborescência versus tensão de ruptura.

De acordo com o procedimento de estimativa da vida útil de cabos isolados em XLPE (UCHIDA, Y., NAKADE, INOUE, SAKAKIBARA, & TANAKA, 2001), é possível prever a vida útil de cabos isolados em XLPE na relação entre a espessura remanescente da arborescência e a tensão de ruptura conforme a Figura 58, tendo uma estimativa de crescimento da arborescência.

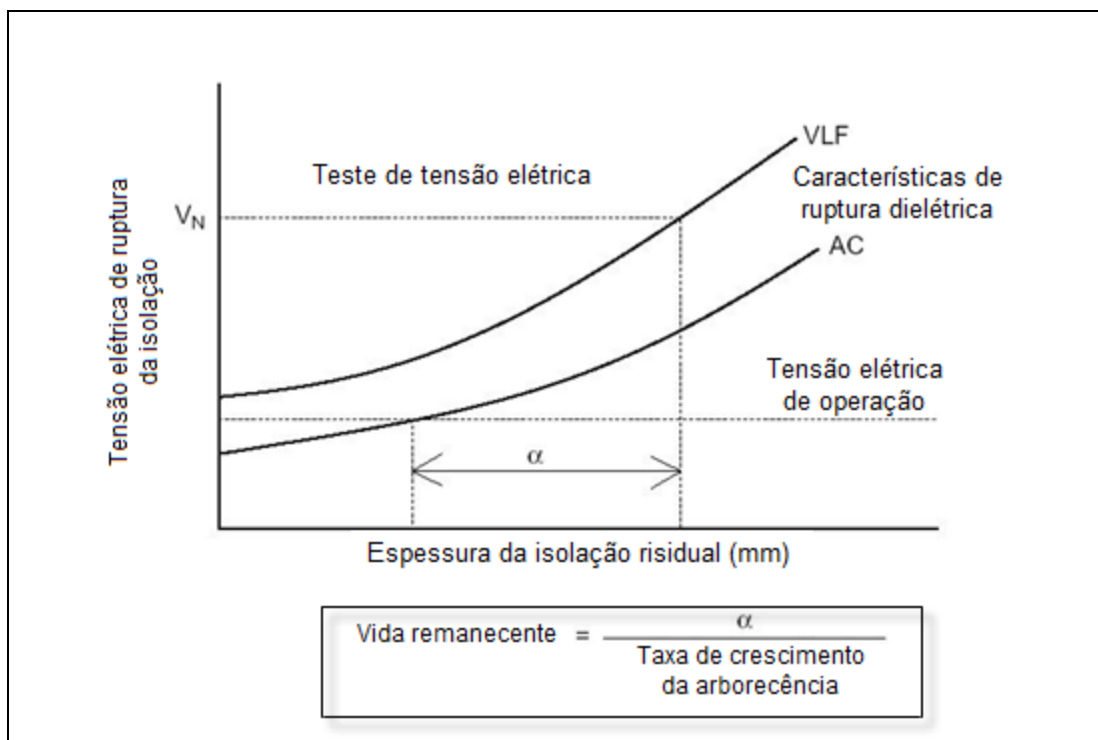


Figura 58 - Valores do ensaio de ruptura dielétrica por tensão aplicada em degraus escalonados
 Fonte: (UCHIDA, Y., NAKADE, INOUE, SAKAKIBARA, & TANAKA, 2001).

4.2.2 ARBORESCÊNCIAS ANALISADAS POR MICROSCOPIA ÓPTICA E CORTES PERPENDICULARES SEM IMPREGNAÇÃO DE CONTRASTE

As análises das arborescências por microscopia óptica foram realizadas em torno da região de ruptura dielétrica das amostras selecionadas de cabos isolados em XLPE, percorrendo uma distância de 100 mm anterior e posterior do local de ruptura, efetuando-se cortes perpendiculares a amostra de 300 μm , com o aparelho de corte Letica ilustrada na Figura 33.

Foram selecionadas a amostra 01 devido a ocorrência da ruptura dielétrica em um tempo muito abaixo das outras amostras, e a amostra 05 por ser a amostra que mais demorou na ocorrência da ruptura dielétrica frente as amostras de cabo XLPE. A Figura 59 e a Figura 60 ilustram o momento do fatiamento das amostras.



Figura 59 - Imagem na posição frontal do fatiamento da amostra 05.



Figura 60 - Imagem na posição diagonal do fatiamento da amostra 05.

Os corpos de prova foram limpos com álcool isopropílico e posteriormente foi realizada uma busca por arborescências elétricas no entorno da região de ruptura das amostras selecionadas.

Na amostra 01 não foi observadas arborescências devido à queima muito grande do local de ruptura. Essa queima foi provocada devido à demora de atuação da proteção da fonte de aplicação de tensão do ensaio de ruptura dielétrica.

Com relação à amostra 05, foi possível visualizar ramos da arborescência elétrica na região de ruptura da amostra. A Figura 61 mostra as arborescências elétricas geradas pelo ensaio de ruptura dielétrica. As imagens foram adquiridas em cada fatia da amostra na região de ruptura num total de 06 fatias.

Foram feitos cortes nas outras amostras buscando visualizar o formato da ruptura dielétrica como ilustra a Figura 62.

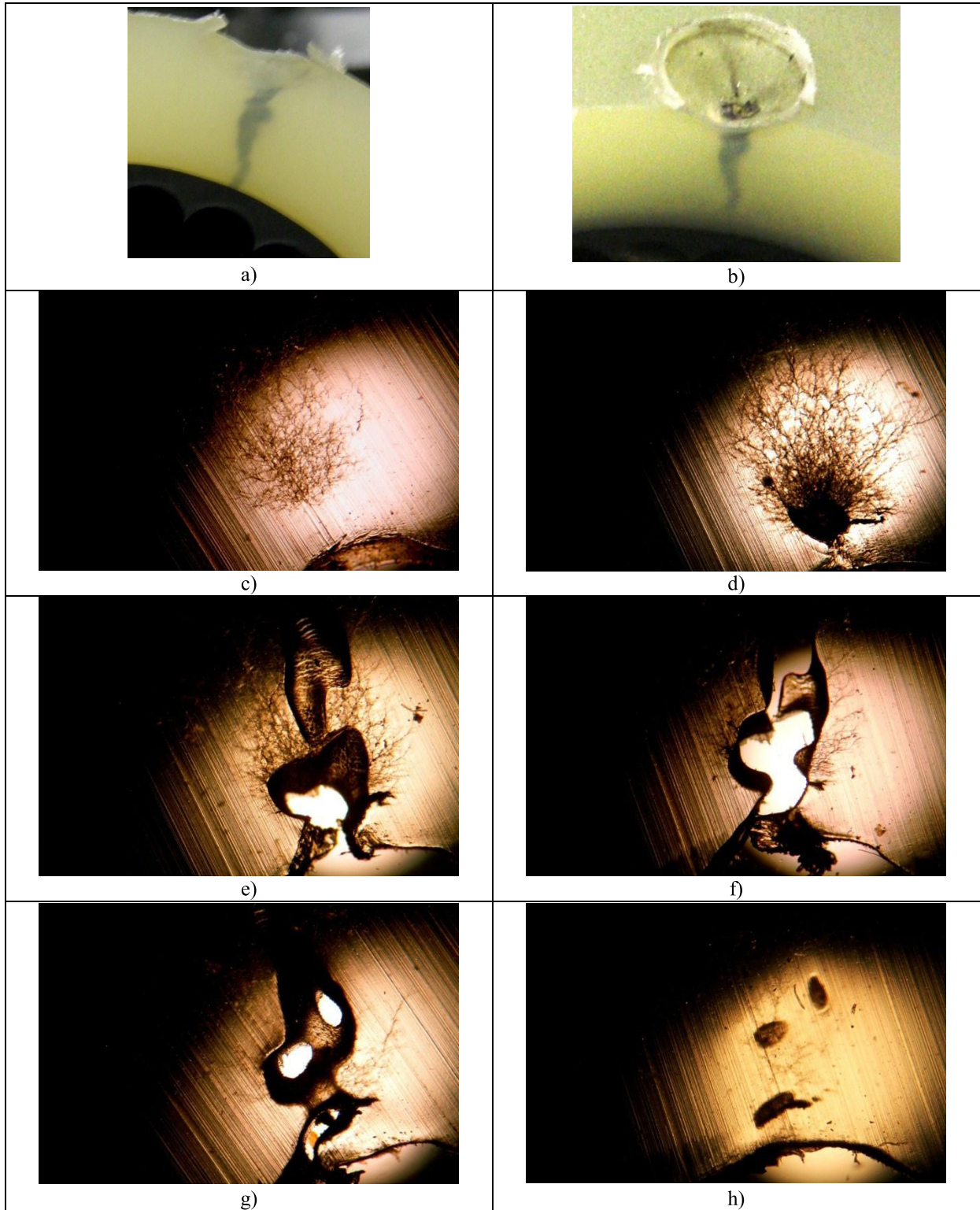


Figura 61 - Imagens das fatias na amostra 05 entre a região de ruptura dielétrica, a) vista frontal, b) vista diagonal, c) primeira fatia, d) segunda fatia, e) terceira fatia, f) quarta fatia, g) quinta fatia, h) sexta fatia.

A Figura 62 mostra todo o caminho de ruptura dielétrica na amostra 5 em relação a terceira fatia adquirida.

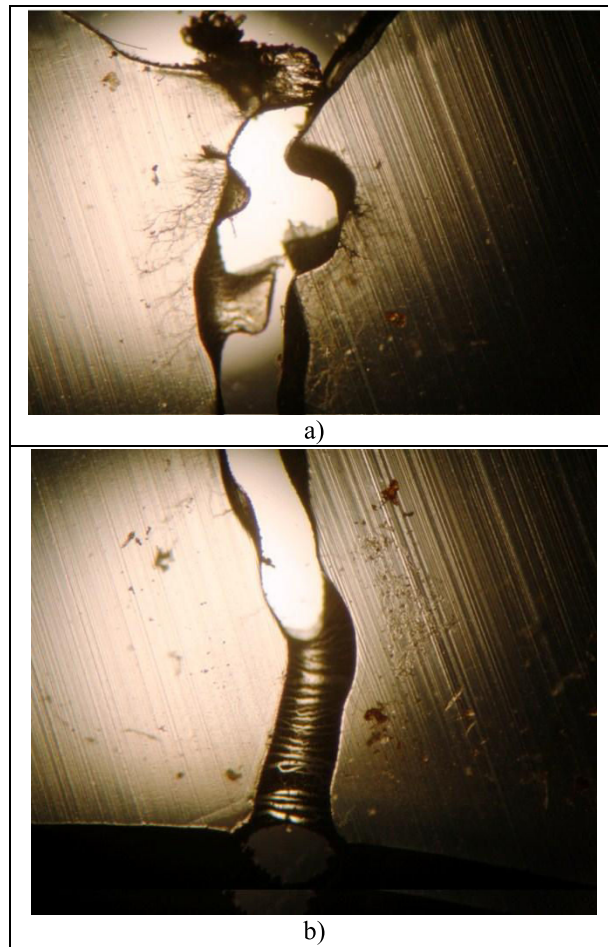


Figura 62 - Imagens da quarta fatia da amostra 05 entre a região de ruptura dielétrica, a) região de cima da área de ruptura, b) região de baixo da área de ruptura.

Para avaliações por contraste de fase de raios X, amostras de cabo isolado em XLPE foram preparadas com cortes perpendiculares as amostras, como demonstra a Figura 63 e a Figura 64.



Figura 63 - Amostra 4 de cabo isolado com XLPE.

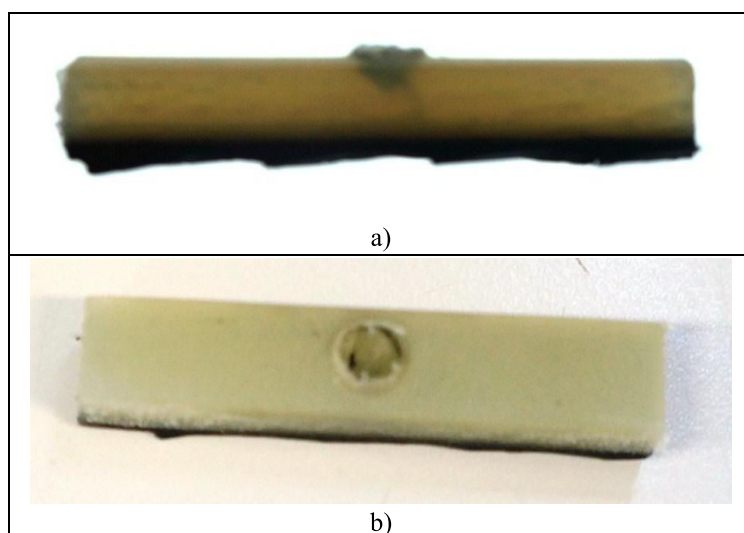


Figura 64 - Amostra 03 de cabo isolado com XLPE, a) vista lateral, b) vista superior.

Com relação às amostras de cabo com isolamento em EPR, verificou-se que essas são opacas e de difícil corte quando utilizado o aparelho de corte Letica ilustrada na Figura 33. As amostras foram cortadas utilizando uma faca manual (estilete), sendo os cortes feitos próximos a região de ruptura dielétrica, visando diminuir a área da amostra.

Na Figura 65 está demonstrada a amostra 07 na qual a ruptura ocorreu de forma perpendicular entre o ponto de aplicação de tensão elétrica ao terra.



Figura 65 - Amostra 7 de cabo com isolamento em EPR, a) vista diagonal, b) visão diagonal da retirada dos corpos de prova, c) corpo de prova com caminho de ruptura inicial, d) corpo de prova com caminho de ruptura final.

Na Figura 66 esta ilustrada a amostra 08, na qual a ruptura ocorreu de forma aleatória entre o ponto de aplicação de tensão elétrica ao terra, pois uma pequena variação no início da região de ruptura dielétrica, os resultados são completamente diferentes, resultando em um estado caótico (FIEDLER-FERRARA & CINTRA DO PADRO, 1995).

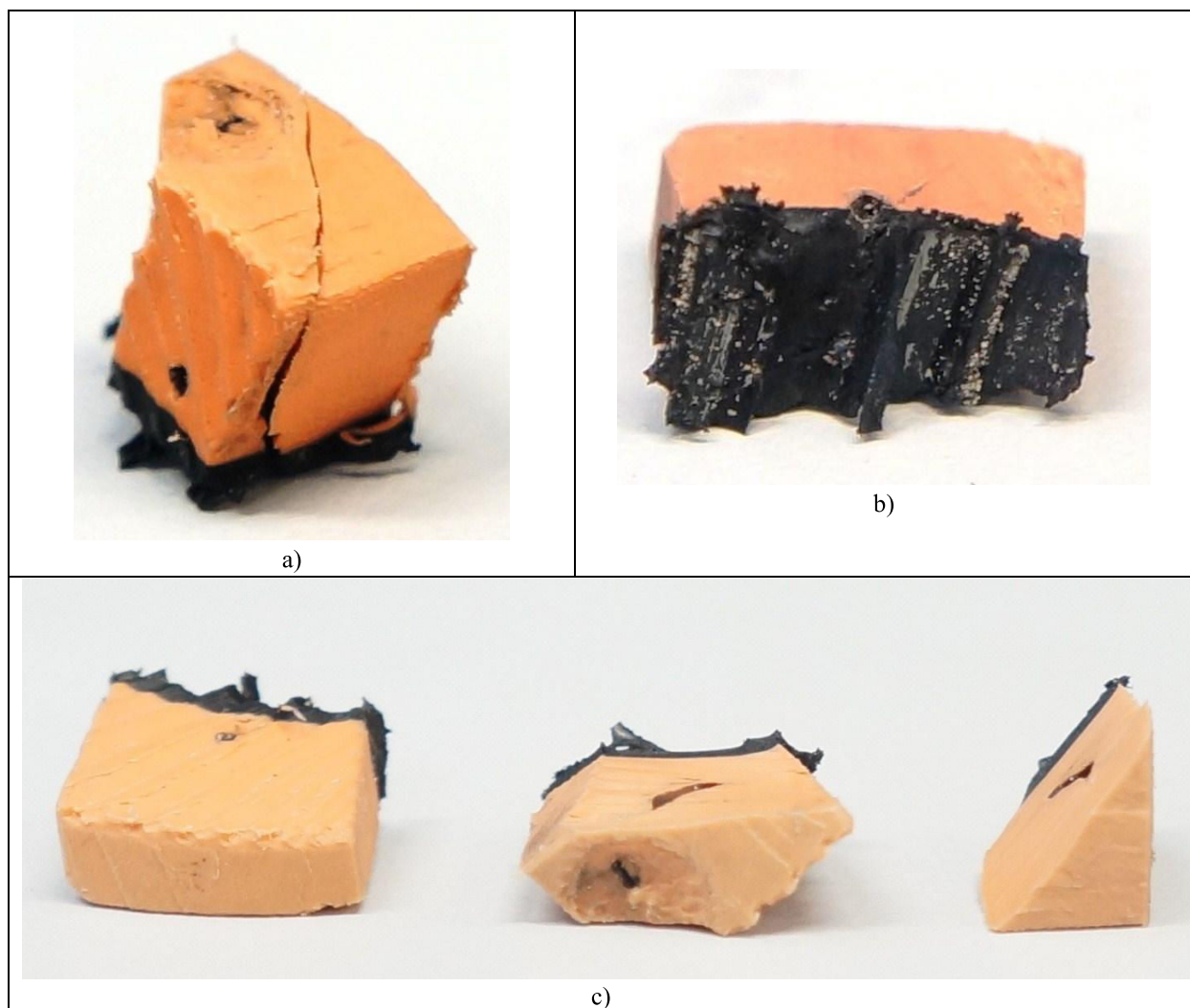


Figura 66 - Amostra 8 de cabo com isolamento em EPR, a) vista diagonal, b) corpo de prova com caminho de ruptura final, c) corpo de prova cortado com caminho de ruptura inicial.

4.3 AVALIAÇÃO DE ARBORESCÊNCIA POR CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X

A radiografia convencional de raios X é baseada na detecção de diferenças de atenuação do feixe de raios X em um objeto. Em objetos com coeficiente de atenuação semelhantes oferecem imagens de baixo contraste. O reforço do contraste de raios X em uma imagem pode ser conseguido por meio da técnica de aquisição de imagem pelo método da propagação PBI.

Inicialmente para uma adequação da distância entre fonte objeto R_1 e objeto detector R_2 ilustrados na Figura 4, foram realizados os cálculos de ampliação da resolução espacial e os cálculos da penumbra geométrica para um ponto focal da fonte de 12 μm .

A Figura 67 ilustra os cálculos feitos da ampliação da resolução espacial e os cálculos da penumbra geométrica para o gerador de raios X microfoco.

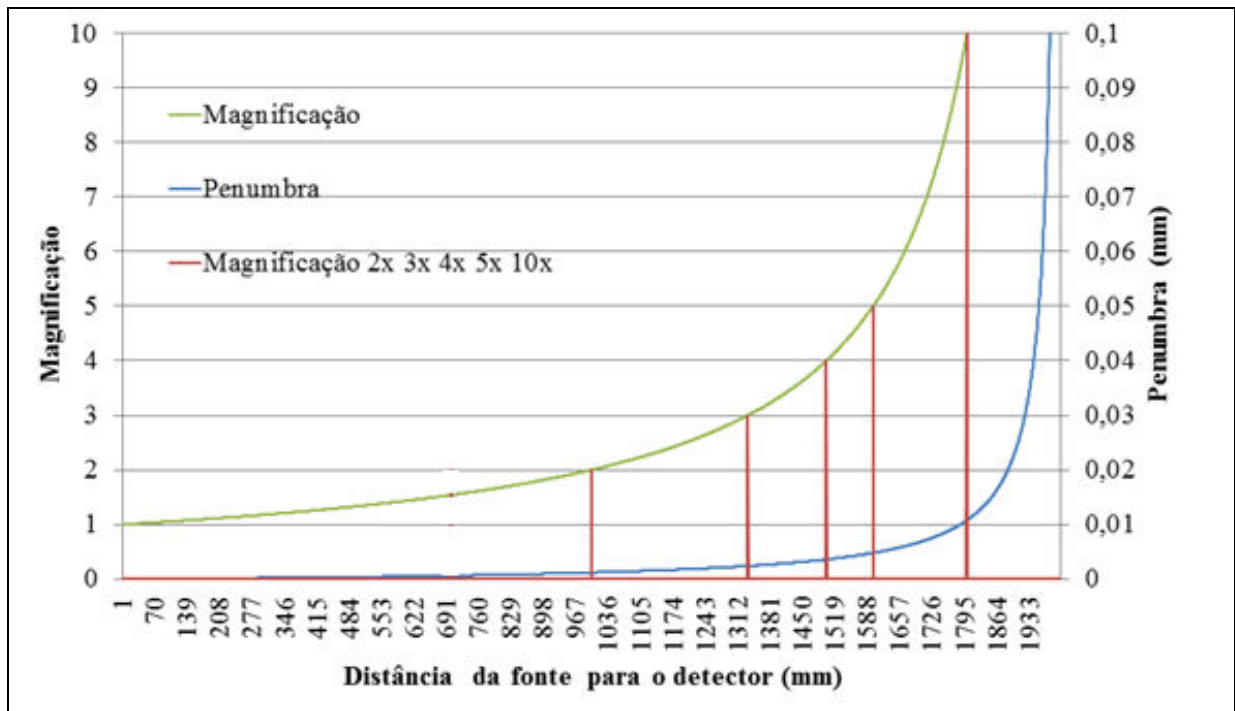


Figura 67 - Cálculos da ampliação da resolução espacial e os cálculos da penumbra geométrica para a fonte microfoco utilizada.

Para o cálculo da coerência espacial foram definidos e calculados os seguintes valores:

- E (eV) = 20000;
- E_{ef} (eV) = 12000;
- c (m/s) = 299.792.458;
- h (eVs) = $4,13566733 \times 10^{-15}$;
- λ (m) = $1,0332 \times 10^{-10}$.

A Tabela 4 mostra os valores calculados dos fatores que influenciam na produção de radiografias por contraste de fase e a Figura 68 ilustra imagens geradas utilizando diferente tipos de geradores de raios X.

Tabela 4 - Calculo dos fatores que influenciam na radiografias por contraste de fase para o gerador de raios X microfoco.

M	U_g (mm)	d (mm)	R_1 (mm)	R_2 (mm)
2	0,0012	0,0603	700	701
3	0,0024	0,0402	467	934
4	0,0036	0,0301	350	1051
5	0,0048	0,0241	280	1121
10	0,0108	0,0121	140	1261

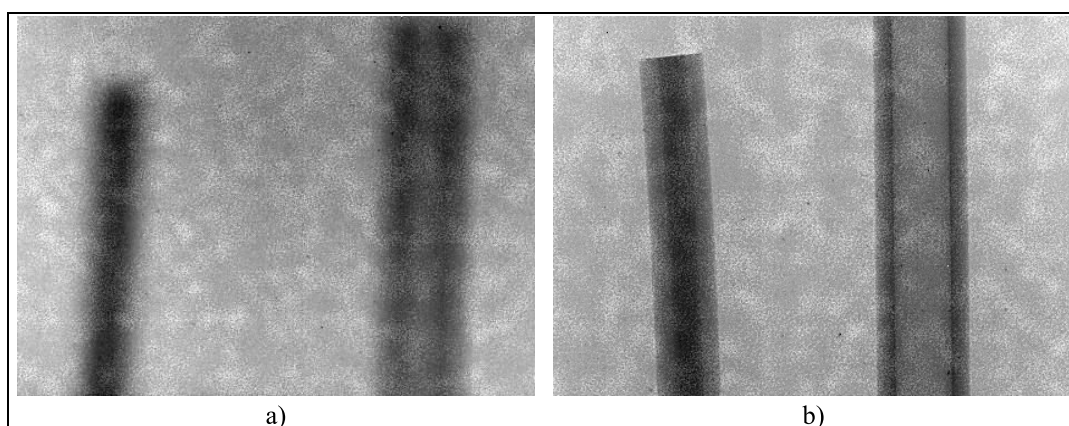


Figura 68 - Radiografia de amostra de tubo plástico e fibra óptica com ampliação de 05 vezes, a) imagem radiográfica com gerador de raios X milifoco b) imagem radiográfica com gerador de raios X microfoco.

Com estes fatores foi feita a comparação das radiografias por contraste de fase com diferentes distâncias, materiais, geradores de raios X e detectores de raios X, a fim de

apresentar a versatilidade da técnica de contraste de raios X frente a diferentes arranjos experimentais.

4.3.1 AVALIAÇÃO DE ARBORESCÊNCIA POR CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X DETECTOR COM TECNOLOGIA CMOS

Para verificar em que situações entre a fonte microfoco e o detector de raios X seria possível visualizar o efeito de contraste de fase, foram realizadas as comparações das radiografias por contraste de fase de raios X com diferentes distâncias e tensões em diferentes amostras e padrões.

4.3.1.1 AVALIAÇÃO DO CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X ALTERANDO A TENSÃO DO GERADOR DE RAIOS X COM DETECTOR DE TECNOLOGIA CMOS.

Para a comparação dos efeitos de contraste de fase de raios X alterando os níveis de tensões do gerador de raios X, foram realizados testes com amostras conhecidas a uma distância entre gerador de raios X e detector de 800 mm com ampliação da resolução espacial de 03 e 05 vezes.

A Figura 69 mostra as imagens radiográficas adquiridas com ampliação da resolução espacial de 03 vezes e a Figura 70 ilustra o gráfico das atenuações dos raios X detectados pela média das regiões demonstradas na Figura 69.

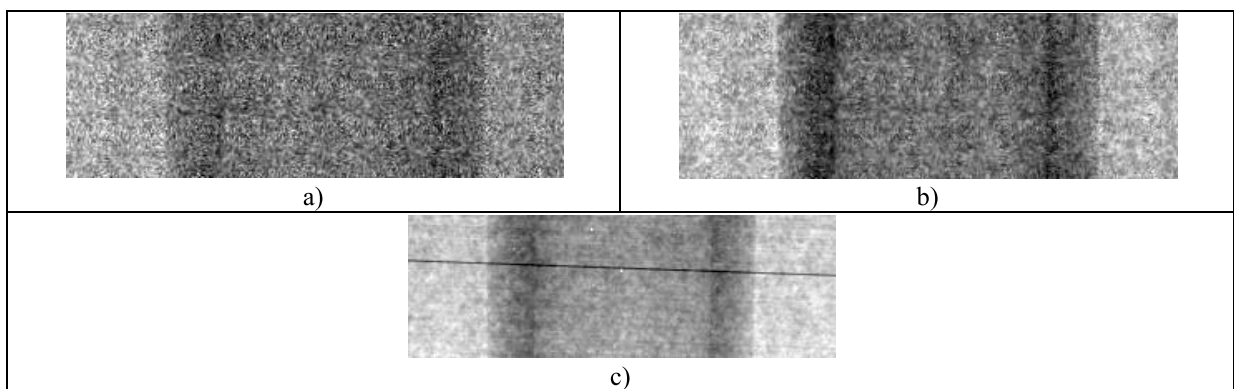


Figura 69 - Radiografia por contraste de fase em tubo plástico com ampliação da resolução espacial de 03 vezes, a) radiografia com tensão de 30 kVp, b) radiografia com tensão de 50 kVp, c) radiografia com tensão de 70 kVp.

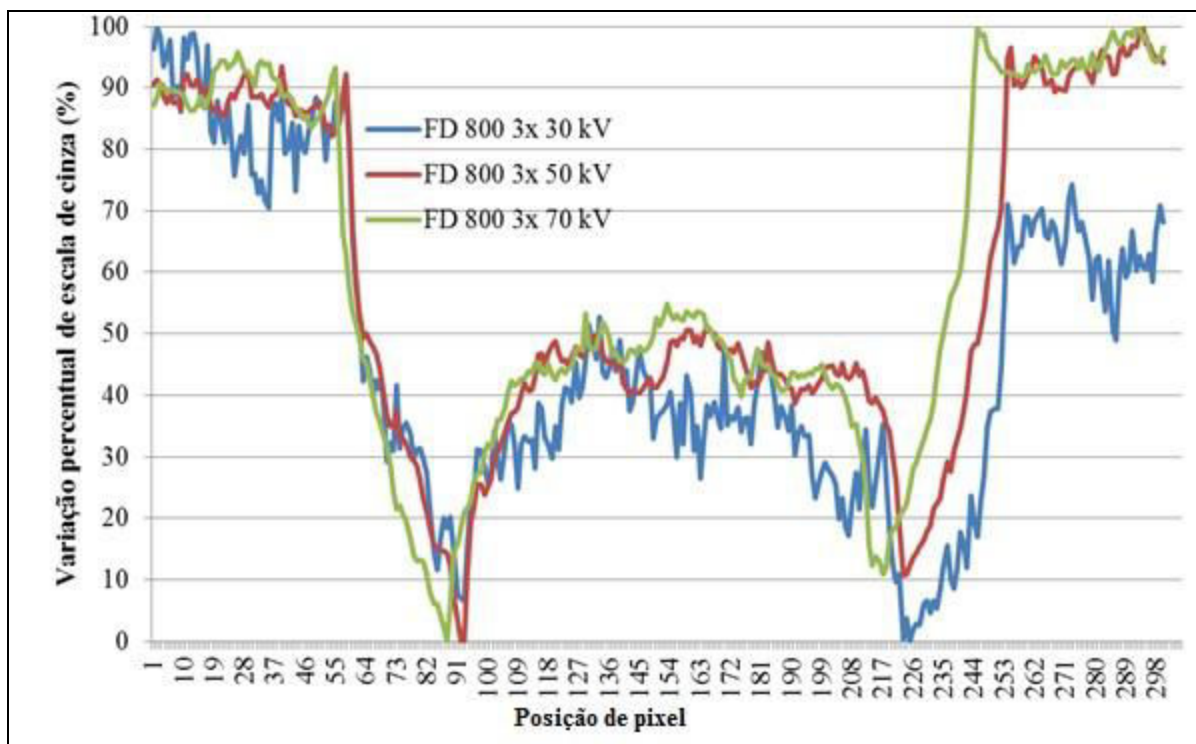


Figura 70 - Gráfico das atenuações dos raios X detectados para amostra de tubo plástico com ampliação da resolução espacial de 03 vezes.

A Figura 71 mostra as imagens radiográficas adquiridas com ampliação da resolução espacial de 03 vezes e a Figura 72 ilustra o gráfico das atenuações dos raios X detectados pela média das regiões demonstradas na Figura 71.

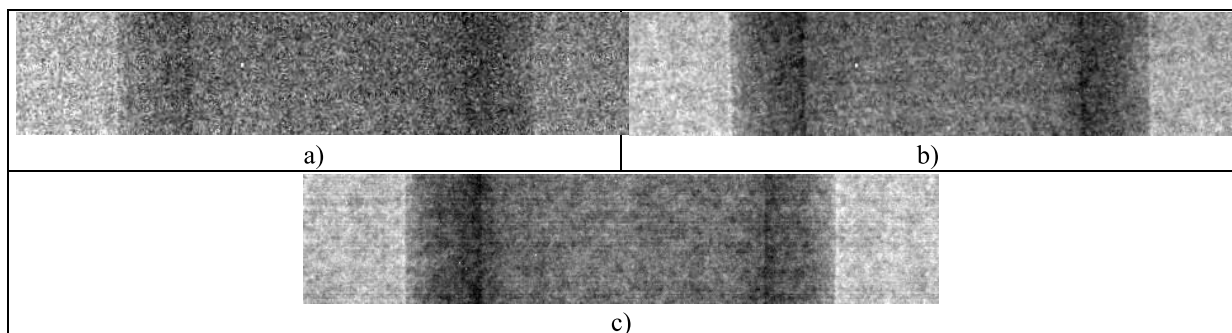


Figura 71 - Radiografia por contraste de fase em tubo plástico com ampliação da resolução espacial de 05 vezes, a) radiografia com tensão de 30 kVp, b) radiografia com tensão de 50 kVp, c) radiografia com tensão de 70 kVp.

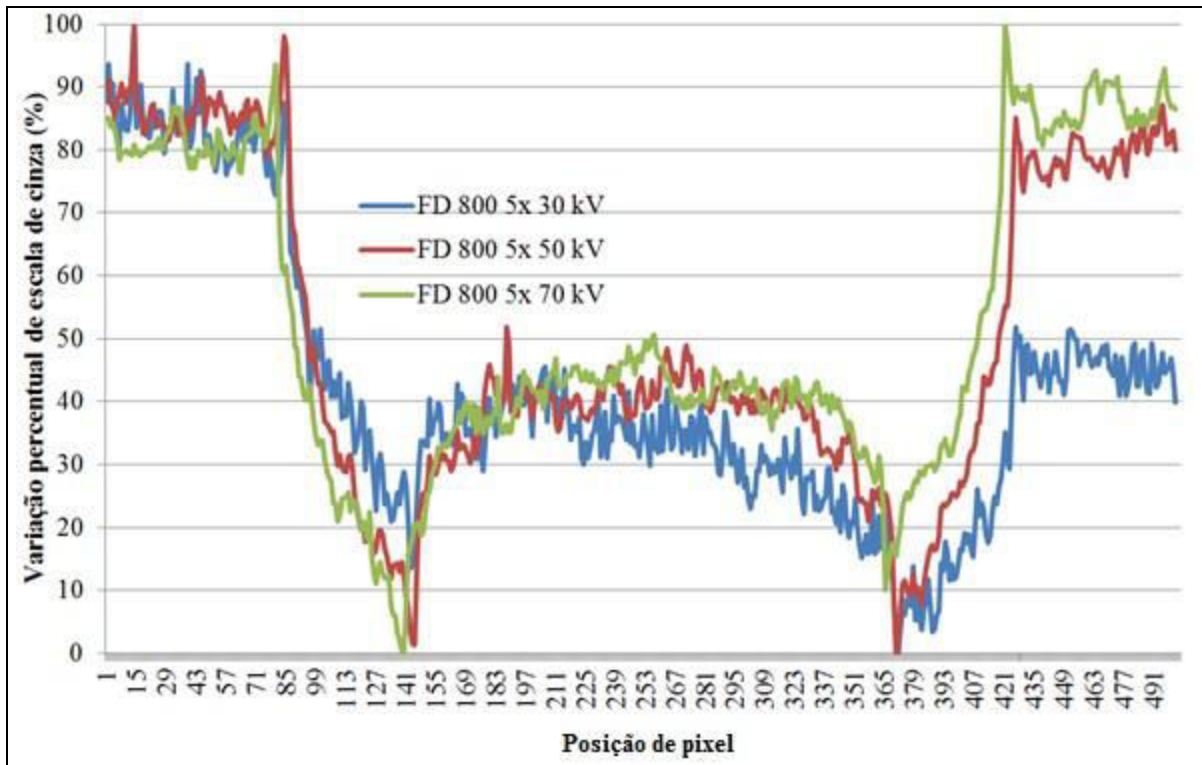


Figura 72 - Gráfico das atenuações dos raios X detectados para amostra de tubo plástico com ampliação da resolução espacial de 05 vezes.

4.3.1.2 AVALIAÇÃO DO CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X ALTERANDO A DISPOSIÇÃO DO SISTEMA COM DETECTOR DE TECNOLOGIA CMOS.

Para a comparação das distâncias dos efeitos de contraste de fase de raios X foram realizados diversos testes em amostras padrões alterando a distância R_2 ilustrada na Figura 4.

Primeiramente foram feitas avaliações com uma tensão de 70 kVp por 100 μ A, aumentando o tempo de integração conforme fosse aumentando a distância entre a fonte e o detector. O aumento do tempo de integração foi feito até que os níveis de absorção das radiografias fossem semelhantes. A Figura 73, Figura 74 e Figura 75 mostram as absorções adquiridas pelo detector digital à uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes, em diferentes distâncias para amostras de cabo isolado com EPR.

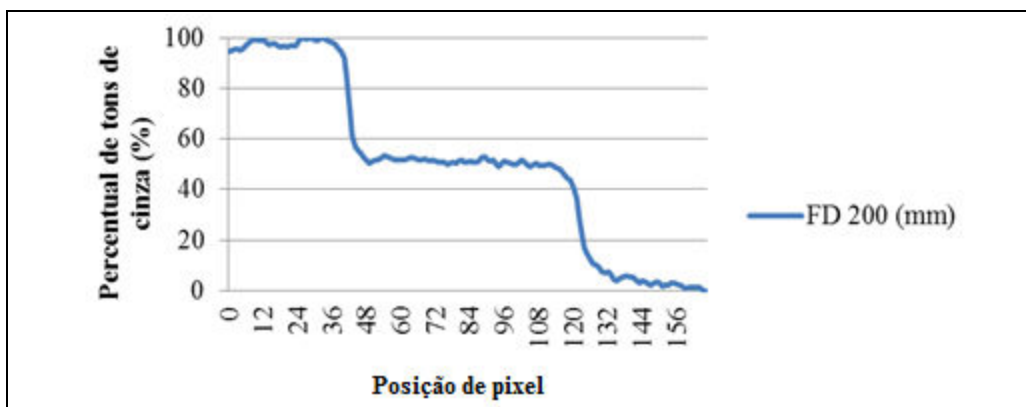


Figura 73 - Absorção adquirida pelo detector digital com ampliação da resolução espacial de 03 vezes e uma distância entre a fonte e o detector de 200 mm em amostra de cabo EPR.

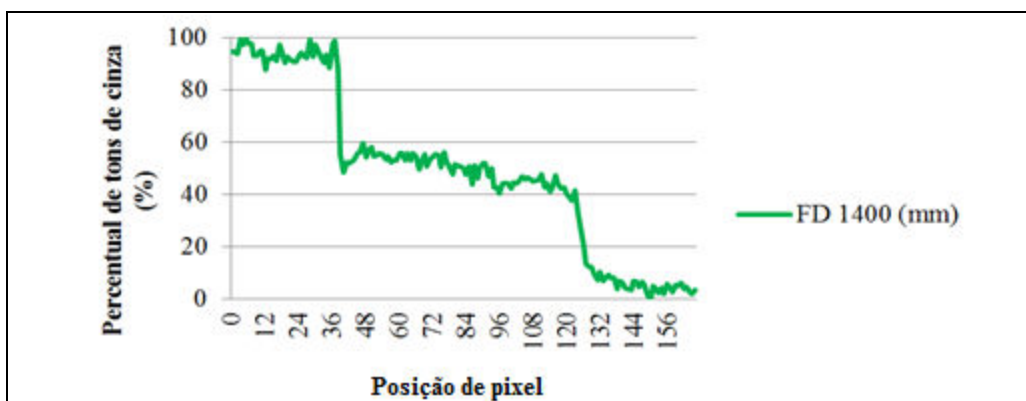


Figura 74 - Absorção adquirida pelo detector digital com ampliação da resolução espacial de 03 vezes e uma distância entre a fonte e o detector de 1400 mm em amostra de cabo EPR.

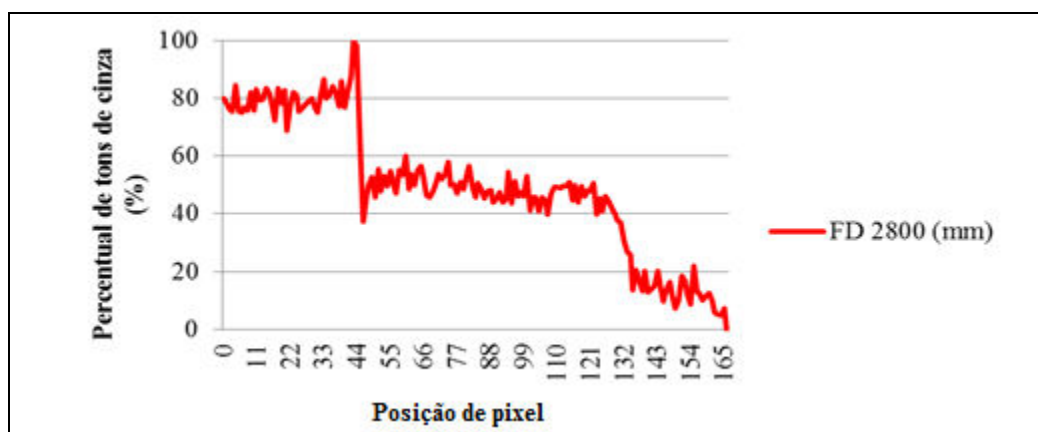


Figura 75 - Absorção adquirida pelo detector digital com ampliação da resolução espacial de 03 vezes e uma distância entre a fonte e o detector de 2800 mm em amostra de cabo EPR.

A Figura 76, Figura 77 e Figura 78 mostra as absorções adquiridas pelo detector digital a uma ampliação da resolução espacial de 05 vezes em diferentes distâncias para amostra de cabo isolado com EPR.

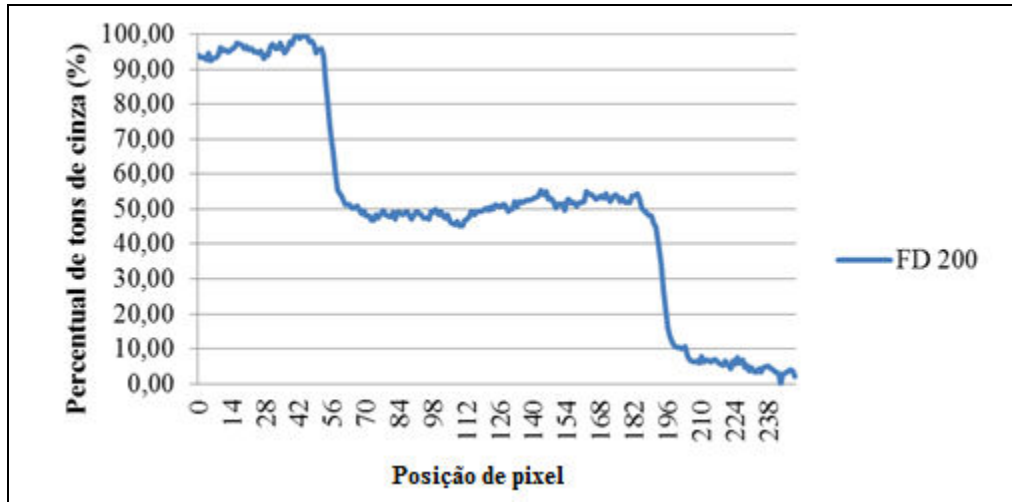


Figura 76 - Absorção adquirida pelo detector digital com ampliação da resolução espacial de 05 vezes e uma distância entre a fonte e o detector de 200 mm em amostra de cabo EPR.

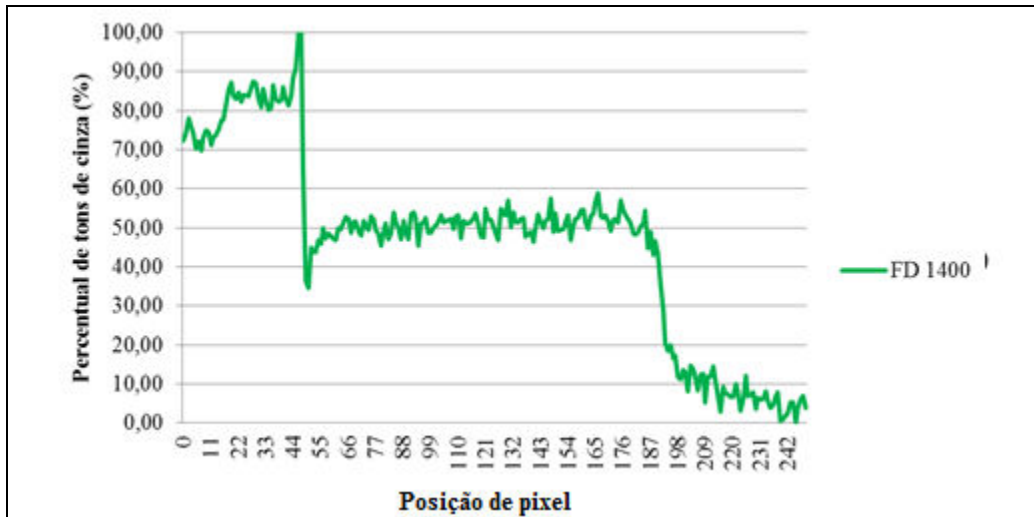


Figura 77 - Absorção adquirida pelo detector digital com ampliação da resolução espacial de 05 vezes e uma distância entre a fonte e o detector de 1400 mm em amostra de cabo EPR.

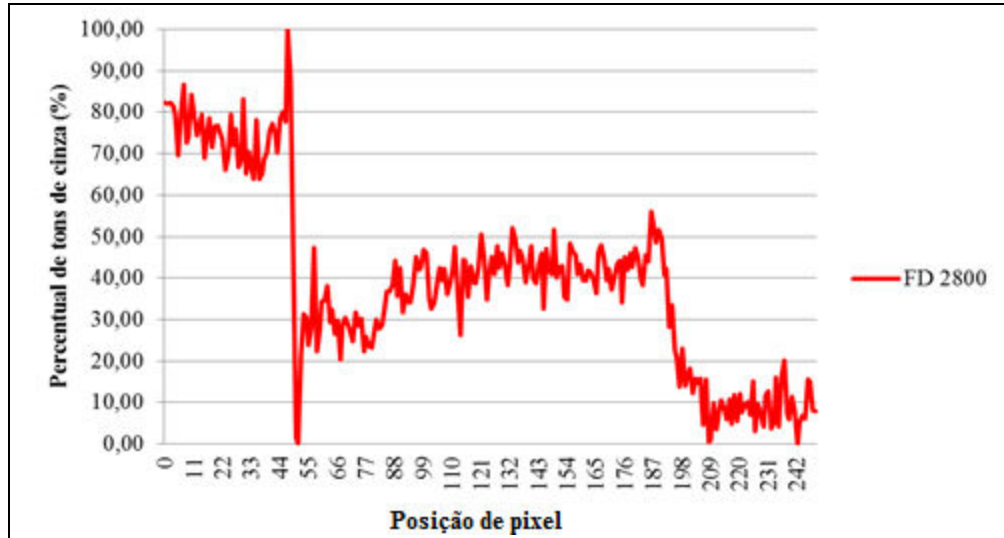


Figura 78 - Absorção adquirida pelo detector digital com ampliação da resolução espacial de 015 vezes e uma distância entre a fonte e o detector de 2800 mm em amostra de cabo EPR.

A Figura 79 mostra radiografias por contraste com ampliação espacial de 3 e 5 vezes.

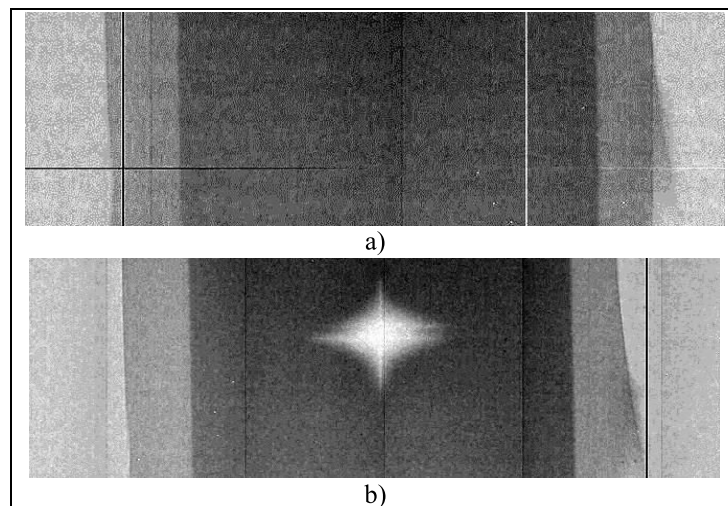


Figura 79 - Radiografias por contraste em amostra de cabo EPR, a) ampliação espacial de 03 vezes e b) ampliação espacial de 05 vezes.

A Figura 80 mostra as imagens radiográficas adquiridas em amostra de tubo plástico com uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes com diferentes distâncias e a Figura 81 mostra as absorções adquiridas pelo detector digital à uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes com média entre 100 linhas da imagem em diferentes distâncias para amostras de tubo plástico.

A Figura 82 mostra as imagens radiográficas adquiridas em amostra de tubo plástico com uma ampliação da resolução espacial de 05 vezes com diferentes distâncias e a Figura 83

mostra as absorções adquiridas pelo detector digital à uma ampliação da resolução espacial de 05 vezes com média entre 100 linhas da imagem em diferentes distâncias para amostras de tubo plástico.

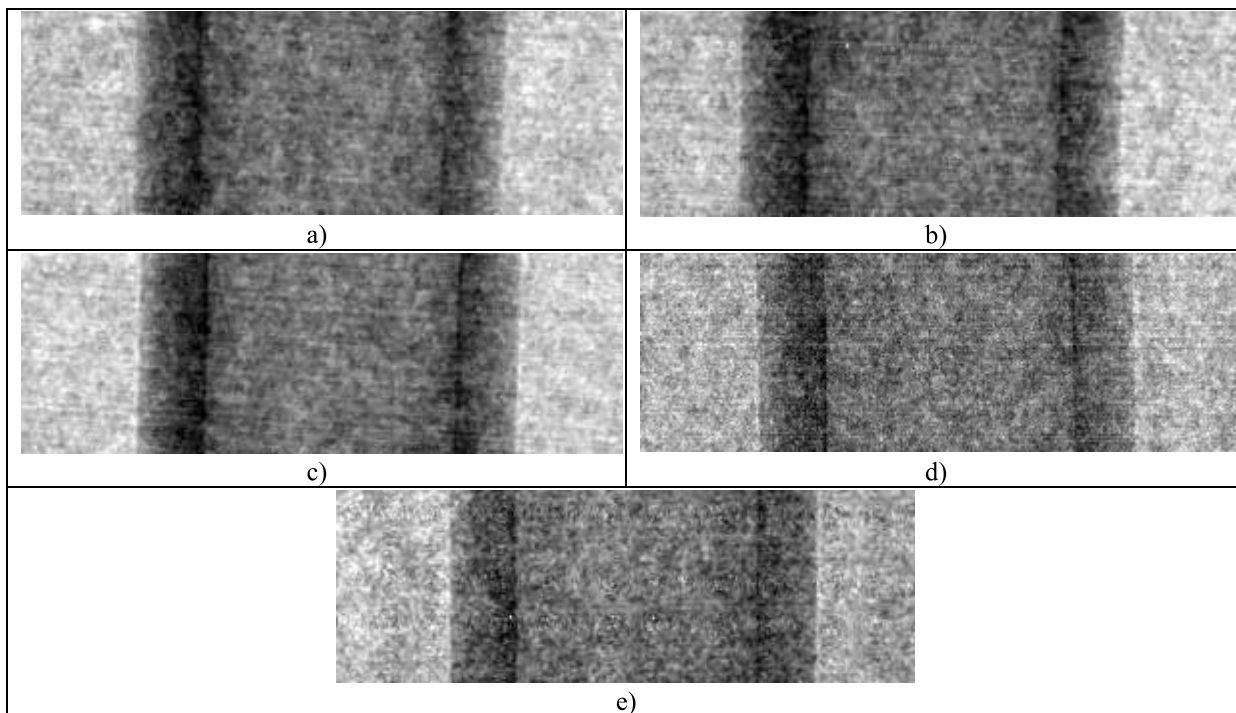


Figura 80 - Radiografia por contraste de fase em tubo plástico com ampliação da resolução espacial de 03 vezes, a) distância FD de 500 mm, b) distância FD de 800 mm, b) distância FD de 1000 mm, b) distância FD de 1500 mm, b) distância FD de 2000 mm.

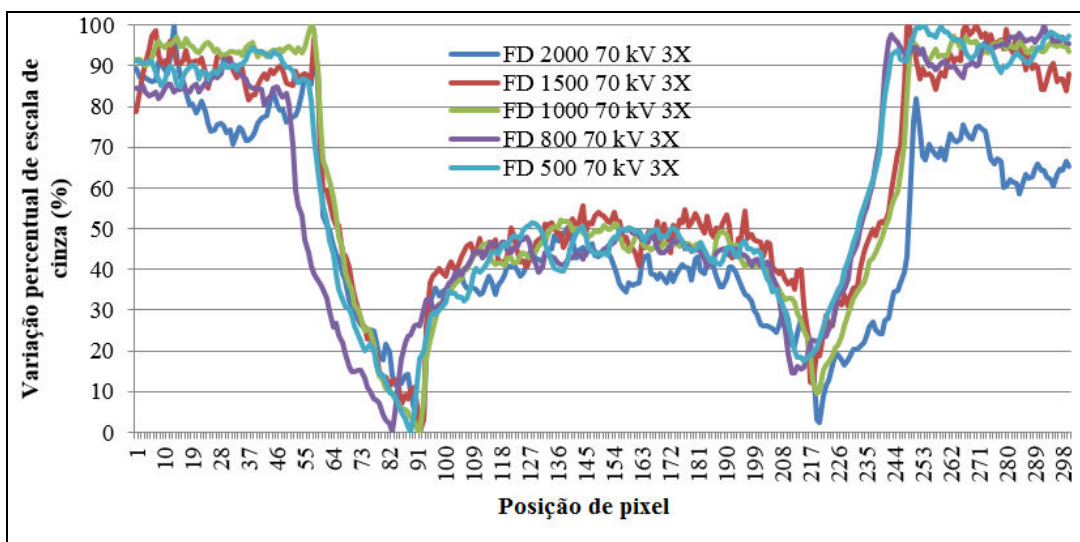


Figura 81 - Gráfico das atenuações dos raios X detectados para amostra de tubo plástico com ampliação da resolução espacial de 03 vezes.

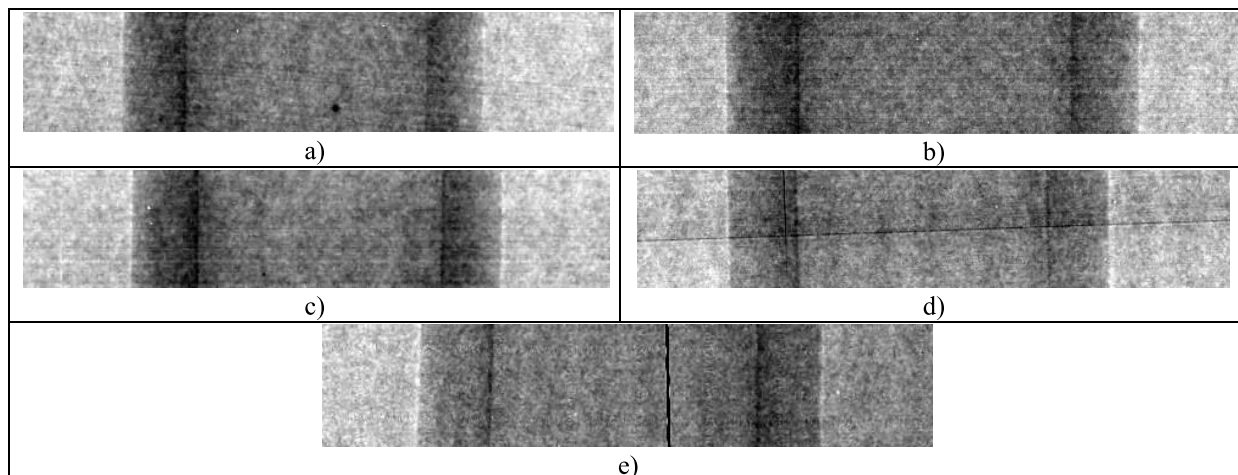


Figura 82 - Radiografia por contraste de fase em tubo plástico com ampliação da resolução espacial de 05 vezes, a) distância FD de 500 mm, b) distância FD de 800 mm, b) distância FD de 1000 mm, b) distância FD de 1500 mm, b) distância FD de 2000 mm.

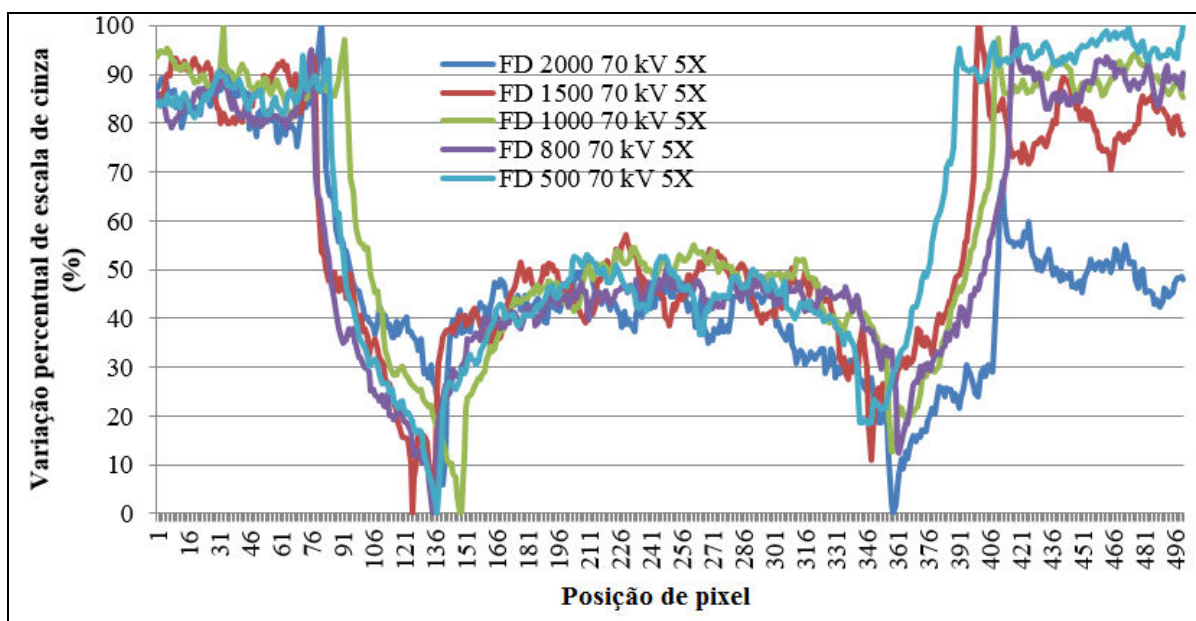


Figura 83 - Gráfico das atenuações dos raios X detectados para amostra de tubo plástico com ampliação da resolução espacial de 05 vezes.

Deve ser ressaltado que as variações de penumbra geométrica provocadas pelo contraste de fase por raios X encontrados nas radiografias foram retiradas nas bordas do corpo de prova, onde é fácil a percepção do contraste de fase devido a diferença de densidade da amostra e o ar.

4.3.1.3 AVALIAÇÃO DO CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X EM DEFEITOS SUPERFICIAIS COM DETECTOR DE TECNOLOGIA CMOS.

Para avaliar o contraste de fase no meio de um material, foi adquirido um tubo plástico com características semelhantes da isolação das amostras de cabo isolados, que possui um dimensional de 4 mm e com uma espessura de parede de 1 mm aproximadamente. Foi feito um pequeno corte na superfície deste tubo sem perfurá-lo, a fim de provocar um micro defeito que seria uma primeira avaliação de contraste de fase por raios X no meio de um material.

Por fim foi realizada a aquisição da imagem radiográfica utilizando uma energia de 40 kVp com 100 μ A, a uma distância entre o detector e a fonte de 800 mm e uma ampliação da resolução espacial de 5 vezes com tempo de integração de 10 s.

A Figura 84 mostra a radiografia de contraste de fase adquirida sem equalização do histograma, a Figura 85 (a) mostra a radiografia com equalização do histograma e a Figura 85 (b) ilustra a média de 100 linhas na região selecionada na Figura 85 (c).

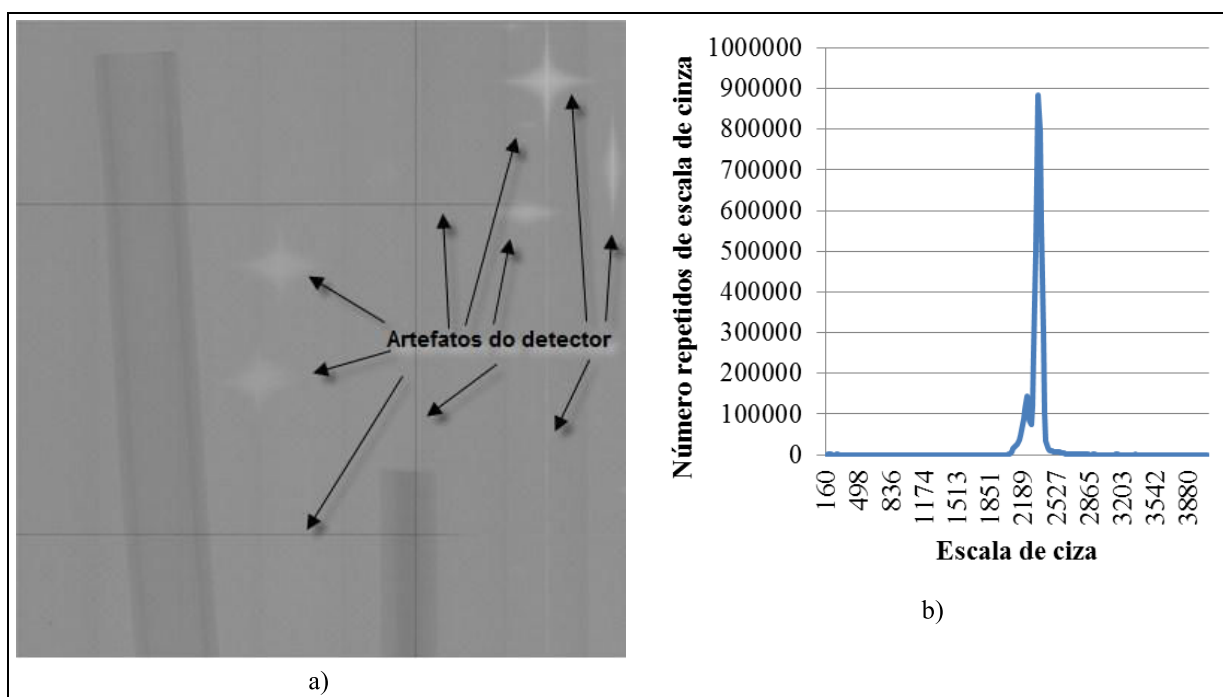


Figura 84 - Radiografia por contraste de fase em tubo plástico, a) sem equalização do histograma, b) histograma da imagem.

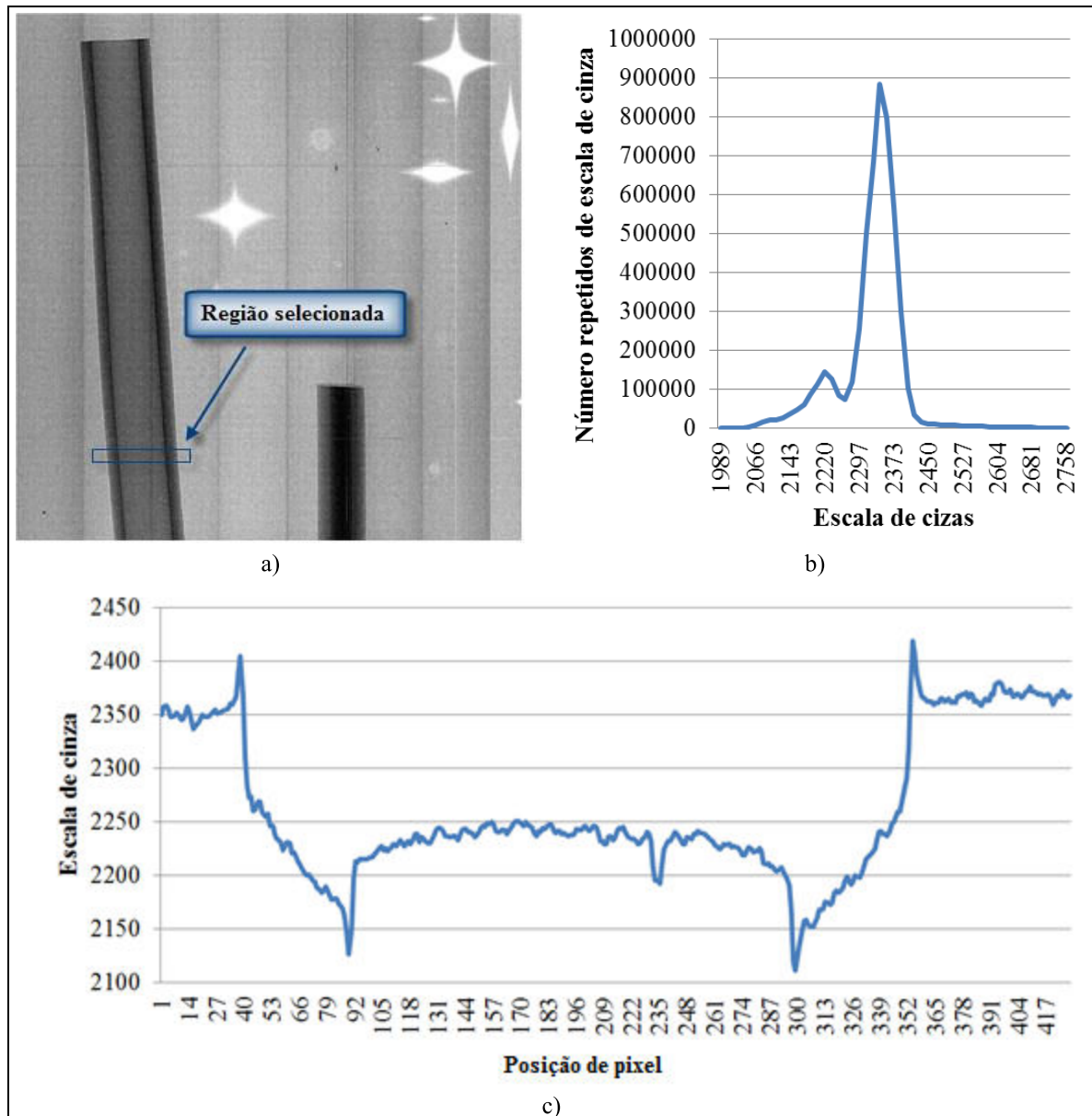


Figura 85 - Radiografia por contraste de fase em tubo plástico, a) com equalização do histograma, b) histograma equalizado da imagem, c) distribuição da média de pixels na região selecionada na imagem (a).

A Figura 86 (a) mostra a região do tubo onde ocorreram os efeitos do contraste de fase e o realce do pequeno corte do tubo provocado a fim de verificar a eficiência da técnica neste tipo de defeito, e a Figura 86 (b) ilustra a região selecionada para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X.

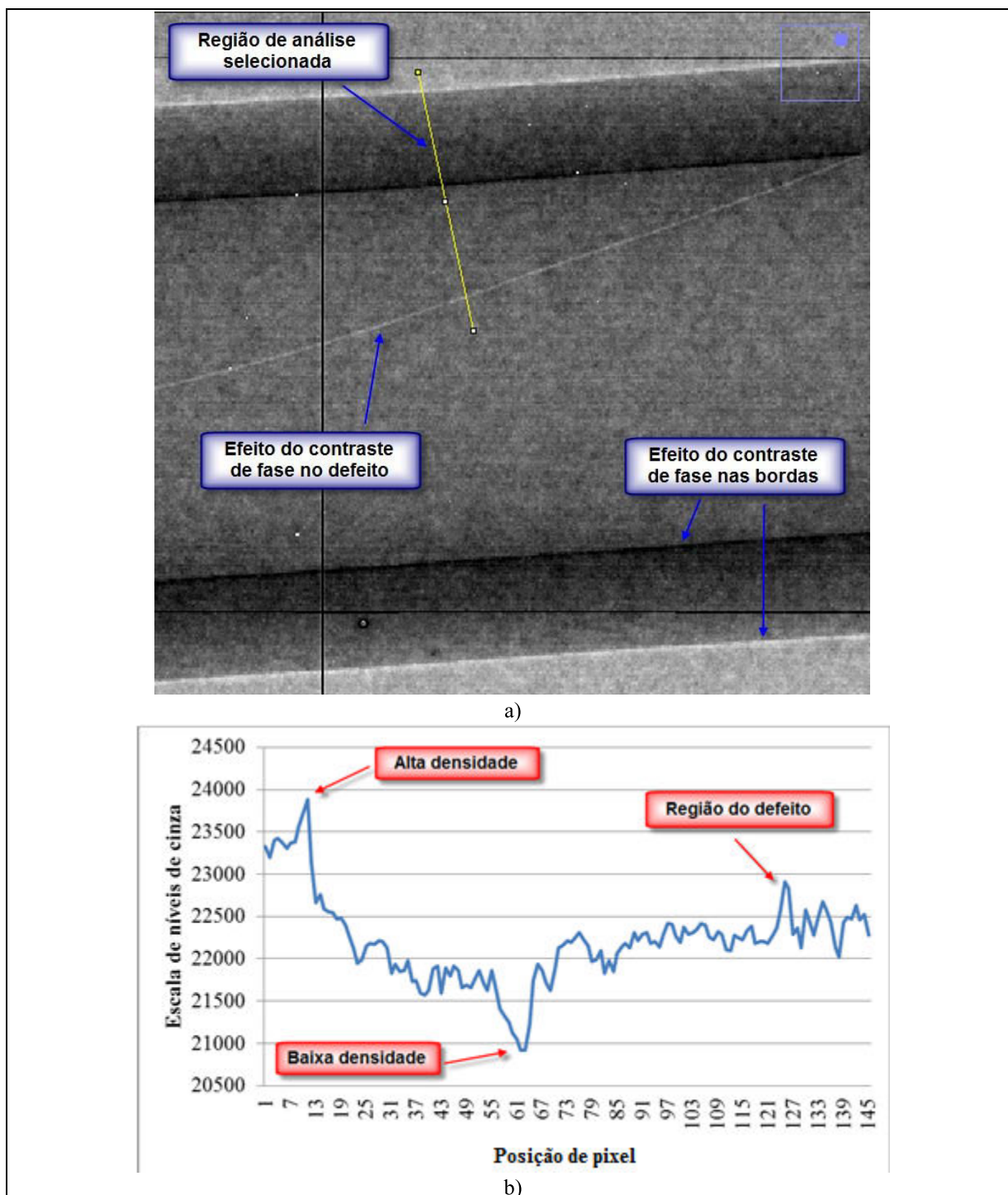


Figura 86 - Radiografia por contraste de fase em tubo plástico, a) radiografia com indicações dos efeitos de contraste de fase e região de análise, b) região selecionada para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X.

4.3.1.4 AVALIAÇÃO DO CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X EM AMOSTRAS DE CABO ISOLADO EM XLPE IMPREGNADAS COM CONTRASTE QUÍMICO COM DETECTOR DE TECNOLOGIA CMOS.

Para início das avaliações do contraste de fase de raios X em amostras de cabo isolado em XLPE, foram utilizados filmes destes cabos. Para visualização de arborescências foram feitos cortes perpendiculares nas amostras de 100 a 150 μm , com o aparelho de corte Letica ilustrada na Figura 33. Os corpos de prova foram limpos com álcool isopropílico e mergulhados em uma solução corante com uma temperatura próxima de 80 °C durante um período de 4 horas para uma melhor visualização das arborescências.

Diferente da metodologia convencional de avaliação de arborescência por microscopia óptica, ao invés de ser utilizado o material corante azul de metileno, foram acrescentados outros materiais a fim de ajudar nesta fase inicial na visualização da arborescência por contraste de fase de raios X.

Três materiais foram utilizados para melhorar o contraste nas radiografias, são eles:

- Azul de metileno ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{ClN}_3\text{S}$), Solubilidade de 2 g/100 ml;
- Cloreto de bário (BaCl_2), Solubilidade de 37,5 g/100 ml;
- Sulfato de cobre (CuO_4S) Solubilidade de 203,3 g/100 ml.

Levando em consideração a solubilidade destes materiais, as concentrações utilizadas foram as seguintes:

- Azul de metileno 0,5 g/250 ml
- Cloreto de bário 9,4 g/250 ml;
- Sulfato de cobre 50,8 g/250 ml.

Após a preparação das amostras com coloração de azul de metileno, foram feitas radiografias com contraste de fase de raios X. A Figura 87 mostra radiografia feita em amostra com azul de metileno, podendo ser observado que não foi possível realizar um contraste que possibilitasse a visualização das arborescências nas amostras.

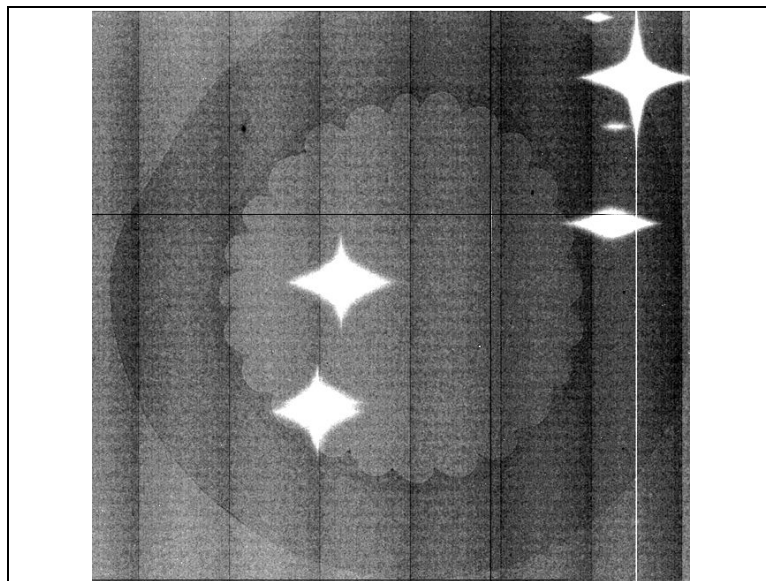


Figura 87 - Radiografia de amostra impregnada com azul de metileno, utilizando uma energia de 35 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 50 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes.

Após a preparação das amostras com a impregnação de cloreto de bário e azul de metileno, foram feitas radiografias com contraste de fase de raios X. A Figura 88 à Figura 90 mostram radiografia feitas em amostra com azul de metileno. Pode ser observado que não foi possível realizar um contraste que possibilitasse a visualização das arborescências nas amostras.

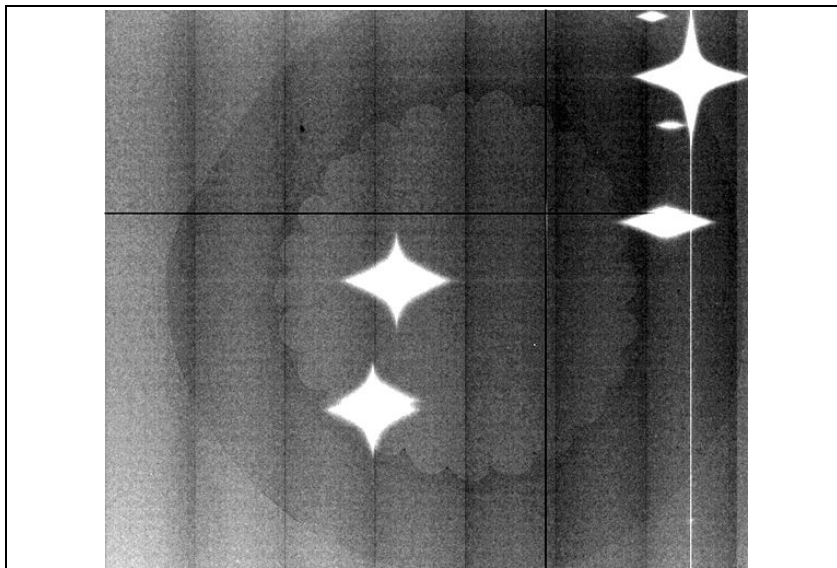


Figura 88 - Radiografia de amostra impregnada com cloreto de bário e azul de metileno, utilizando uma energia de 25 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 50 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes.

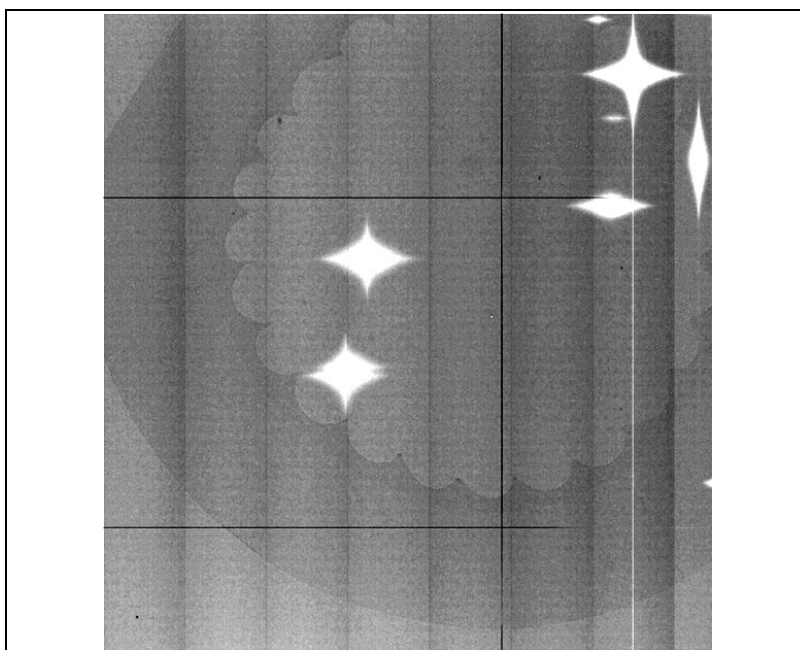


Figura 89 - Radiografia de amostra impregnada com cloreto de bário e azul de metileno, utilizando uma energia de 30 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 50 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 05 vezes

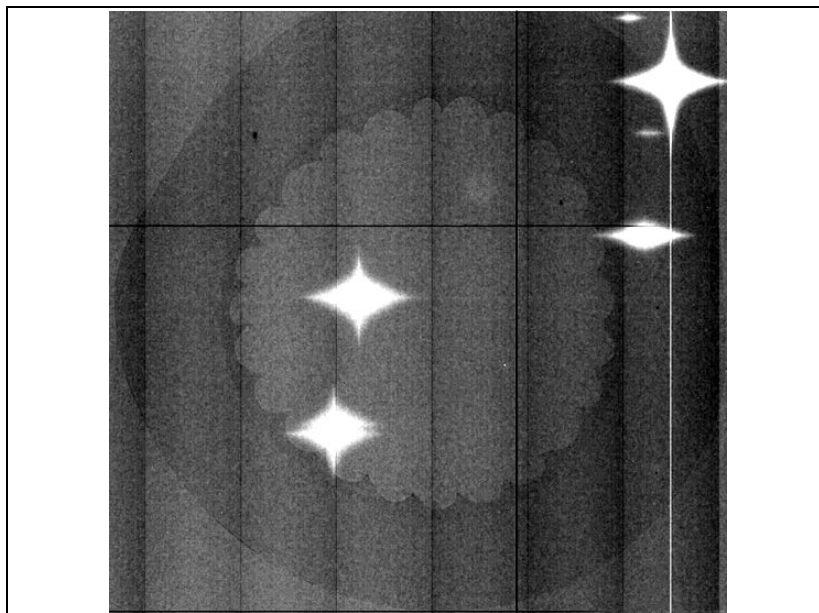


Figura 90 - Radiografia de amostra impregnada com cloreto de bário e azul de metileno, utilizando uma energia de 40 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 20 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes.

Após a preparação das amostras com a impregnação de sulfato de cobre e azul de metileno, foram feitas radiografias com contraste de fase de raios X. A Figura 91 a Figura 93 mostra radiografia feitas em amostra com azul de metileno. Pode ser observado que não foi possível realizar um contraste que possibilitasse a visualização das arborescências nas amostras.

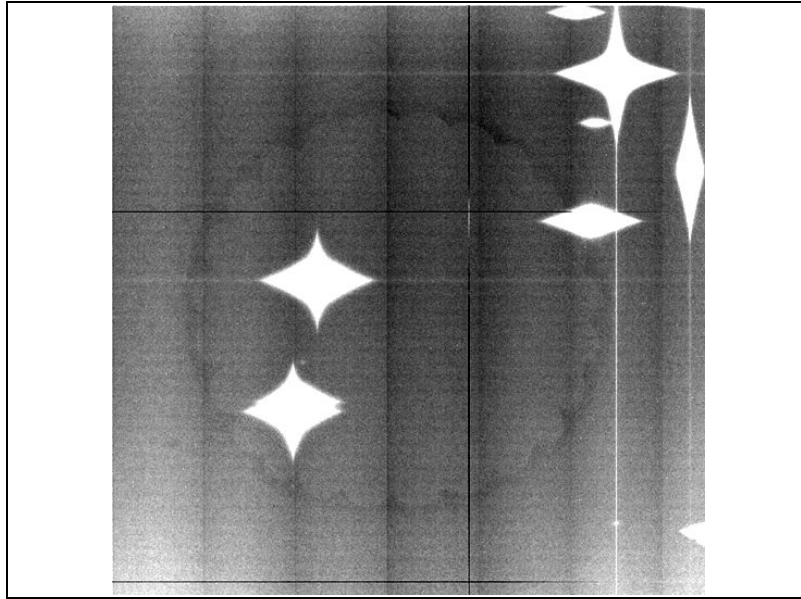


Figura 91 - Radiografia de amostra impregnada com sulfato de cobre e azul de metileno, utilizando uma energia de 20 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 60 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes.

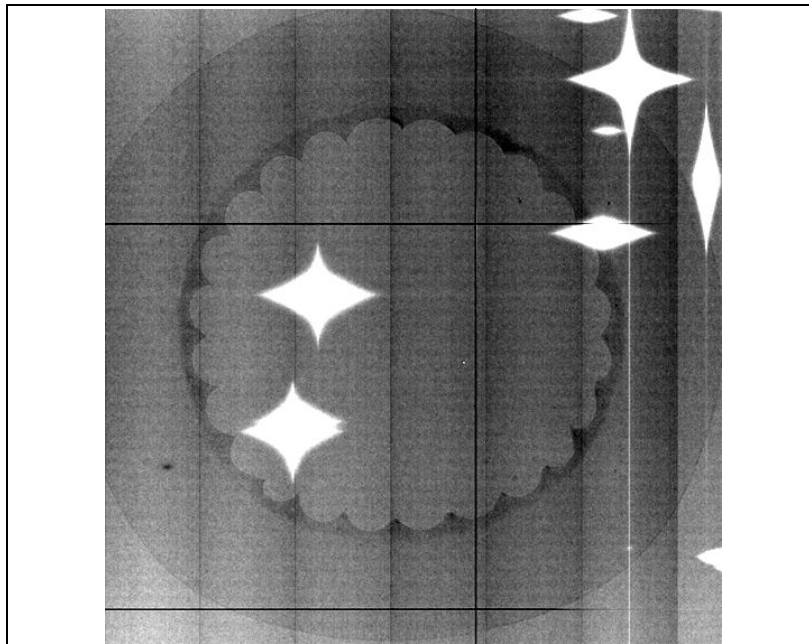


Figura 92 - Radiografia de amostra impregnada com sulfato de cobre e azul de metileno, utilizando uma energia de 30 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 50 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes.

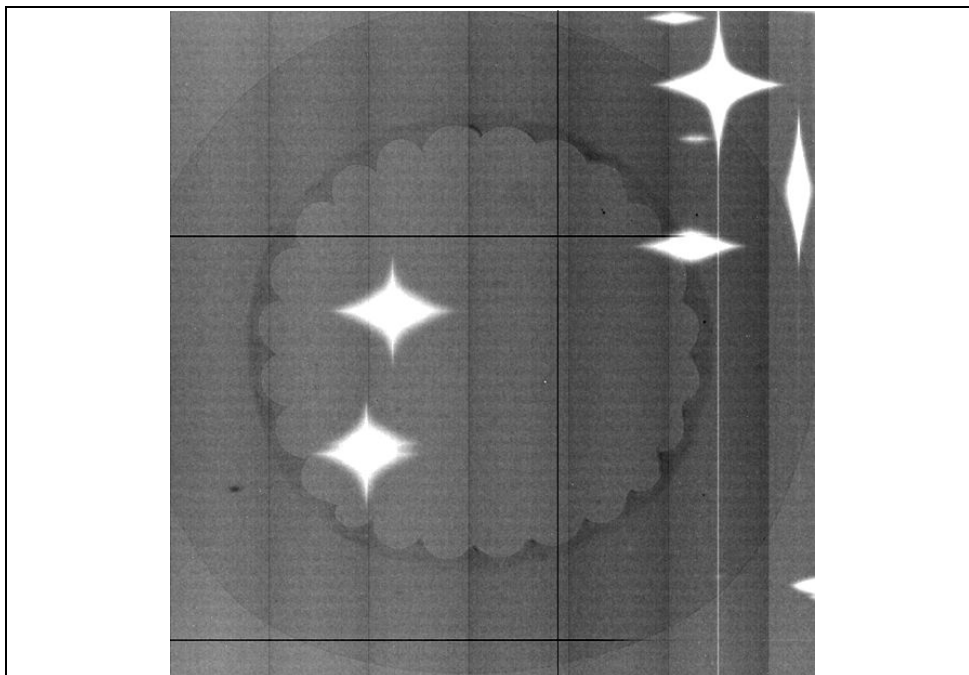


Figura 93 - Radiografia de amostra impregnada com sulfato de cobre e azul de metileno, utilizando uma energia de 40 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 18 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes.

4.3.1.5 AVALIAÇÃO DO CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X EM AMOSTRAS DE CABO ISOLADO EM EPR COM DETECTOR DE TECNOLOGIA CMOS.

Com relação às amostras de cabo com isolamento em EPR, essas foram cortadas utilizando uma faca manual (estilete), sendo que os cortes foram feitos próximos a região de ruptura dielétrica visando diminuir a área da amostra para, diminuir a intensidade de raios X e o tempo de integração.

A Figura 94 (a) mostra a imagem radiográfica com contraste de fase da amostra 07, utilizando a média de 08 imagens adquiridas com tensão de 16 kVp, com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 10 segundos, uma distância entre fonte e detector de 800 mm e uma ampliação da resolução espacial de 05 vezes. Para uma melhor visualização da região de ruptura foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra a Figura 94 (b).

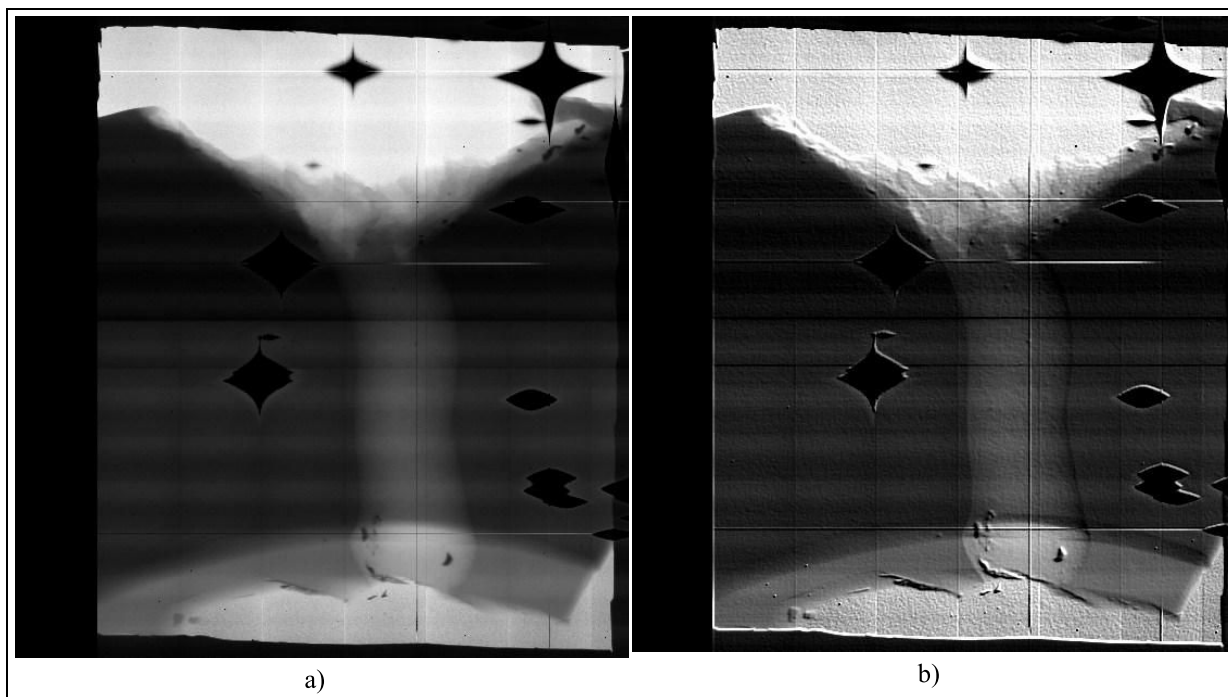


Figura 94 - Radiografia de amostra 07 de cabo isolado em EPR, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

A Figura 95 (a) e Figura 96 (a) mostra a imagem radiográfica com contraste de fase da amostra 09, utilizando a média de 11 imagens adquiridas com energia de 18 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 09 segundos, uma distância entre fonte e detector de 800 mm e uma ampliação da resolução espacial de 05 vezes. Para uma melhor visualização da região de ruptura foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra a Figura 95 (b) e Figura 96 (b).

A Figura 95 e Figura 96 mostra uma possível região com arborescência elétrica visualizada pela técnica de contraste de fase de raios X.

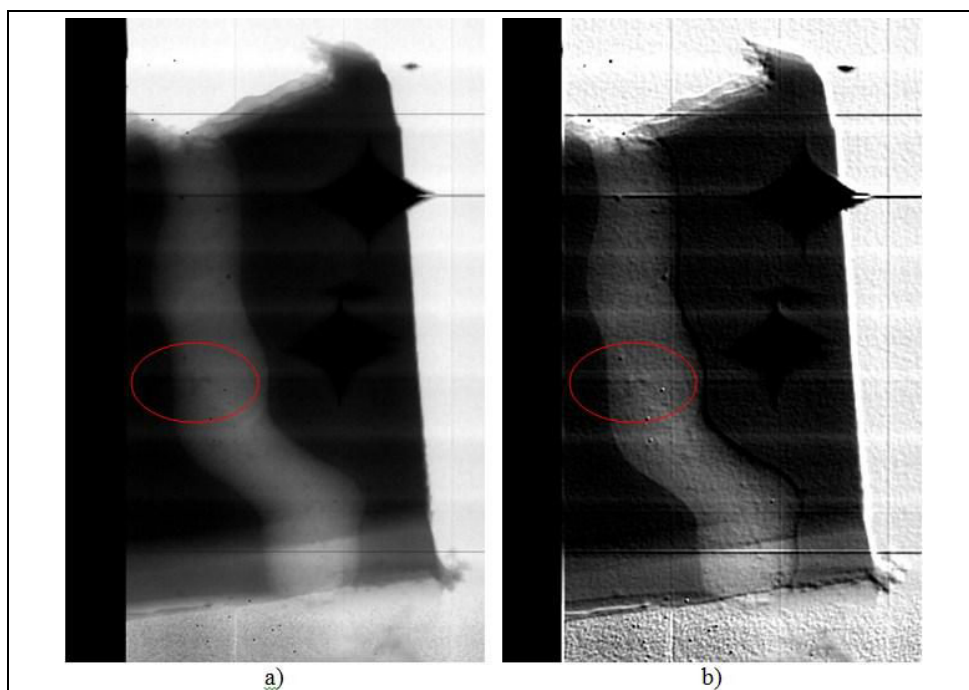


Figura 95 - Radiografia de amostra 09 de cabo isolado em EPR possível região com arborescência elétrica, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

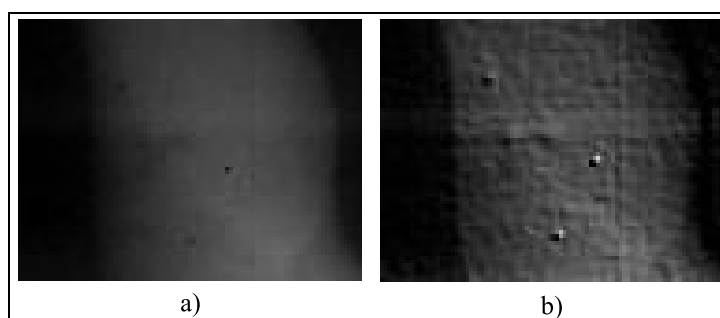


Figura 96 - Radiografia da amostra 09 ampliada na possível região com arborescência elétrica, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

Na Figura 97 a Figura 99 temos a imagem radiográfica com contraste de fase da amostra 08 com variação na distância entre o gerador de raios X e o detector de raios X, buscando sempre deixar a mesma ampliação da resolução espacial. Essa variação foi feita para verificar como o efeito de contraste de fase se comportaria na variação destas distâncias.

A Figura 97 mostra a imagem radiográfica com contraste de fase da amostra 08, utilizando a média de 10 imagens adquiridas com energia de 16 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 06 segundos, uma distância entre fonte e detector de 200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 05 vezes.

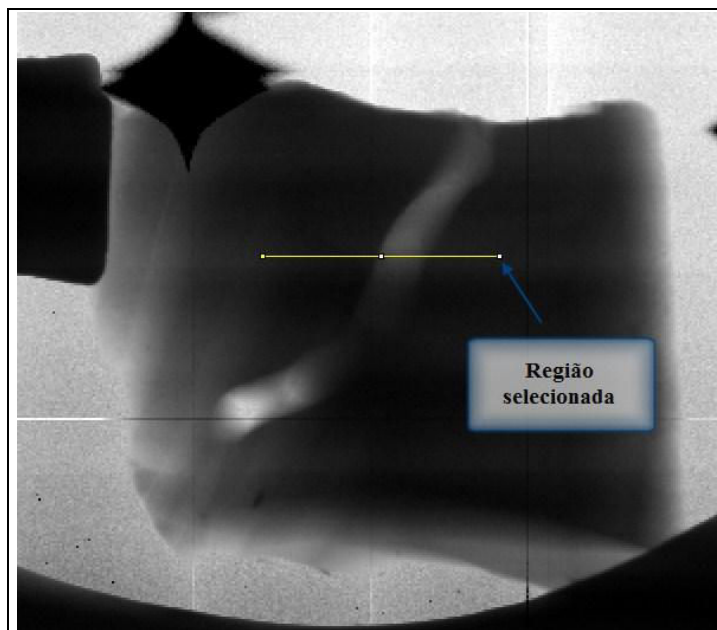


Figura 97 - Radiografia de amostra 08 de cabo isolado em EPR a uma distância de 200 mm da fonte ao detector.

A Figura 98 mostra a imagem radiográfica com contraste de fase da amostra 08, utilizando a média de 11 imagens adquiridas com energia de 18 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 06 segundos, uma distância entre fonte e detector de 400 mm e uma ampliação da resolução espacial de 05 vezes.

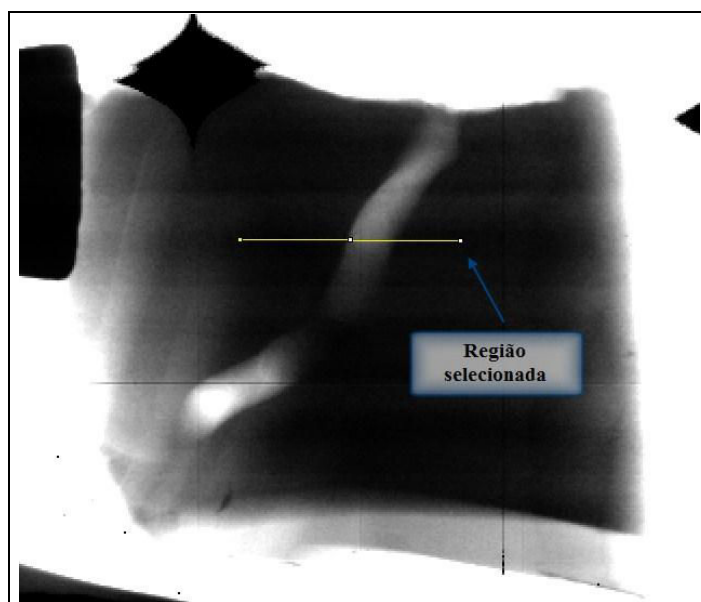


Figura 98 - Radiografia da amostra 08 de cabo isolado em EPR a uma distância de 400 mm da fonte ao detector.

A Figura 99 mostra a imagem radiográfica com contraste de fase da amostra 08, utilizando a média de 11 imagens adquiridas com energia de 20 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 10 segundos, uma distância entre fonte e detector de 800 mm e uma ampliação da resolução espacial de 05 vezes.

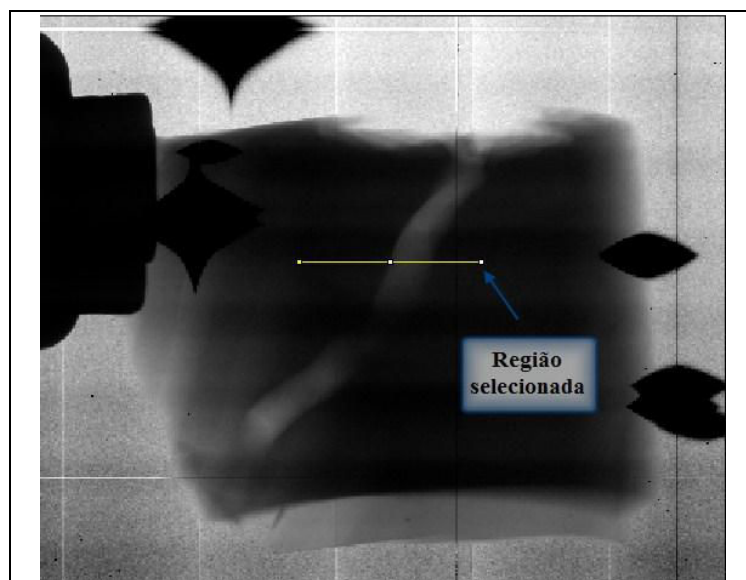


Figura 99 - Radiografia de amostra 08 de cabo isolado em EPR a uma distância de 800 mm da fonte ao detector.

A Figura 100 ilustra a região selecionada para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X com a variação da distância entre o gerador de raios X e o detector de raios X.

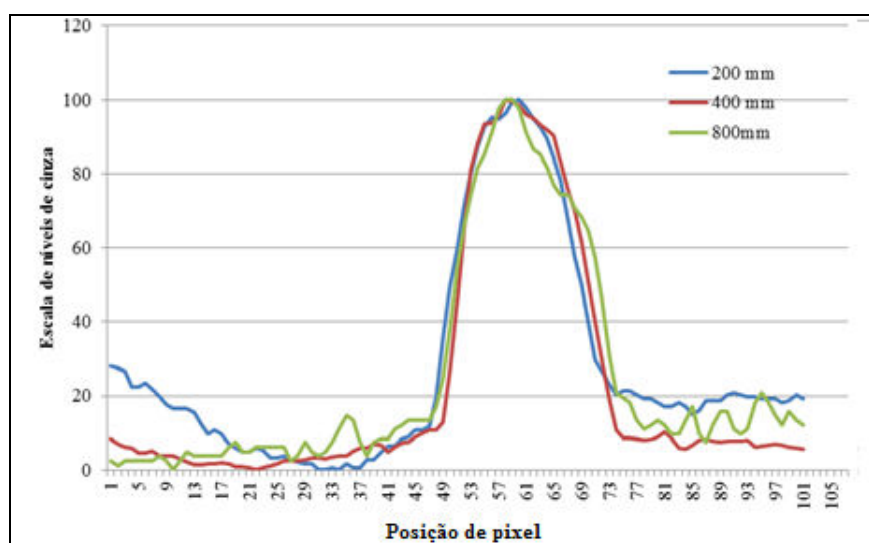


Figura 100 - Região selecionada para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X da Figura 97, Figura 98 e Figura 99.

4.3.1.6 AVALIAÇÃO DO CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X EM AMOSTRAS DE LENÇÓIS DE BORRACHA NATURAL EPR COM DETECTOR DE TECNOLOGIA CMOS.

Com relação às amostras de lençóis de borracha natural EPR, as amostras são opacas e de difícil avaliação por métodos não destrutivos. Para melhor adaptação ao experimento, às amostras foram cortadas utilizando uma faca manual (estilete) sem alterar a região onde ocorreu a ruptura dielétrica e foram limpas com álcool isopropílico como demonstra a Figura 54.

Após a preparação das amostras foram feitas radiografias dessas utilizando a técnica de contraste de fase de raios X. A Figura 101 (a) mostra a imagem radiográfica com contraste de fase de raios X, com energia de 30 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 07 segundos, uma distância entre fonte e detector de 800 mm e uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes. Para uma melhor visualização da região de ruptura foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra a Figura 101 (b).

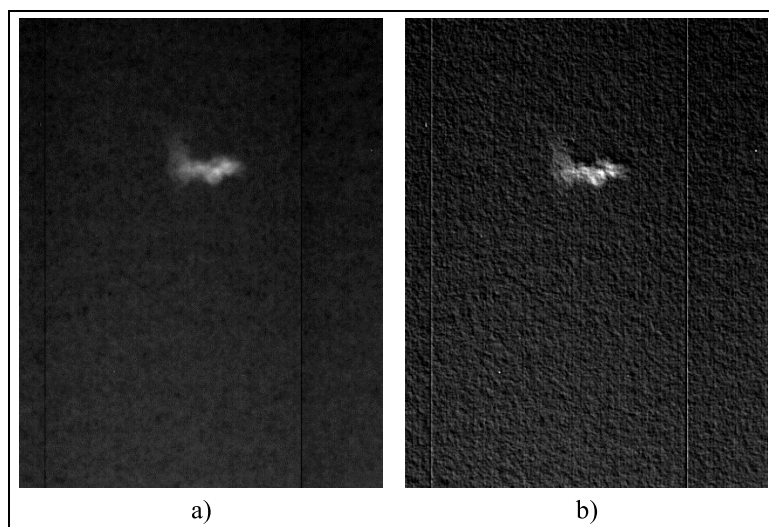


Figura 101 - Radiografia de amostra de lençol de borracha natural EPR com ampliação de 03 vezes e tempo de integração de 07, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

A Figura 102 (a) mostra a imagem radiográfica com contraste de fase de raios X, com energia de 35 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 05 segundos, uma distância entre fonte e detector de 800 mm e uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes. Para uma melhor visualização da região de ruptura foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra a Figura 102 (b).

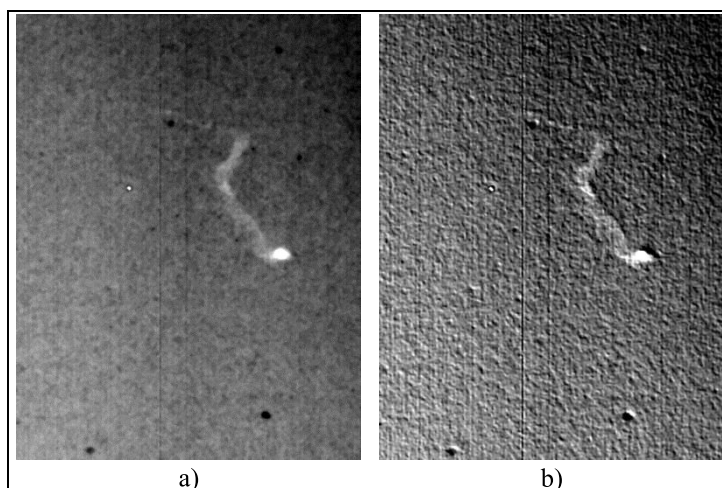


Figura 102 - Radiografia de amostra de lençol de borracha natural EPR com ampliação de 03 vezes e tempo de integração de 05, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

A Figura 103 (a) mostra a imagem radiográfica com contraste de fase de raios X, com energia de 32 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 07 segundos, uma distância entre fonte e detector de 800 mm e uma ampliação da resolução espacial de 05 vezes, para uma melhor visualização da região de ruptura foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra a Figura 103 (b).

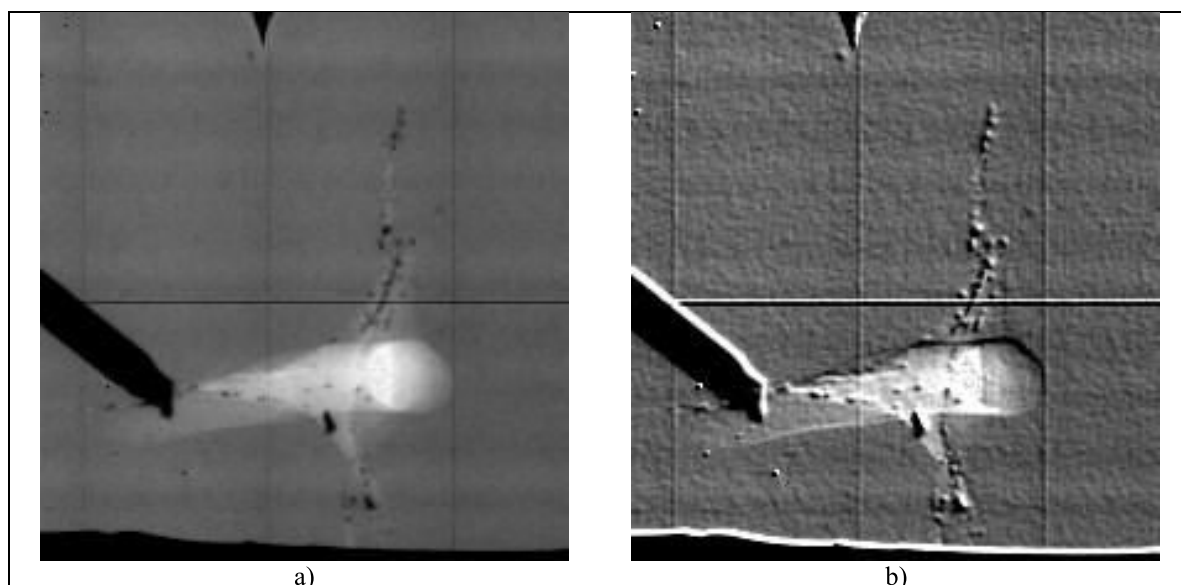


Figura 103 - Radiografia de amostra de lençol de borracha natural EPR com ampliação de 05 vezes e tempo de integração de 07, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

4.3.2 AVALIAÇÃO DE ARBORESCÊNCIA POR CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X DETECTOR TECNOLOGIA DE SILÍCIO AMORFO

Para avaliar o contraste de fase de raios X no detector de raios X da Perkinelmer, o gerador de raios X microfoco de 70 kVp e o gerador de raios X milifoco de 225 kVp foram utilizados para verificação da sua eficiência frente ao detector, com diferentes distâncias, tensões e em diferentes amostras e padrões.

4.3.2.1 AVALIAÇÃO DO CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X EM AMOSTRA PADRÃO COM DETECTOR TECNOLOGIA DE SILÍCIO AMORFO

Foi adquirido um tubo plástico com características semelhantes da isolação das amostras de cabo isolado, que possui um dimensional de 4 mm, com uma espessura de parede de 1 mm aproximadamente, bem como uma fibra óptica plástica que possui 1,40 mm de diâmetro interno e 2,20 mm de diâmetro externo. Estes testes foram realizados com o gerador de raios X microfoco.

Inicialmente foi feita a aquisição da imagem radiográfica utilizando a média de 40 imagens adquiridas com tempo de integração de 30 s a uma energia de 40 kVp com 100 μ A, com distância entre o detector e o gerador de raios X de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 03 vezes como ilustra a Figura 104 (a). Para uma melhor visualização dos efeitos de contraste de fase foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra Figura 104 (b).

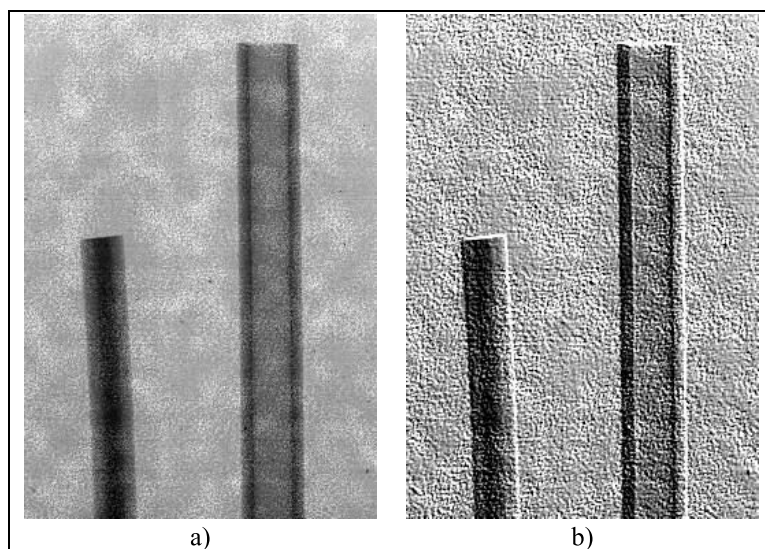


Figura 104 - Radiografia de amostra padrão de tubo plástico e fibra óptica com ampliação de 03 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

A Figura 105 ilustra a região selecionada na Figura 104 (a), para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X com a variação da distância entre o gerador de raios X e o detector de raios X

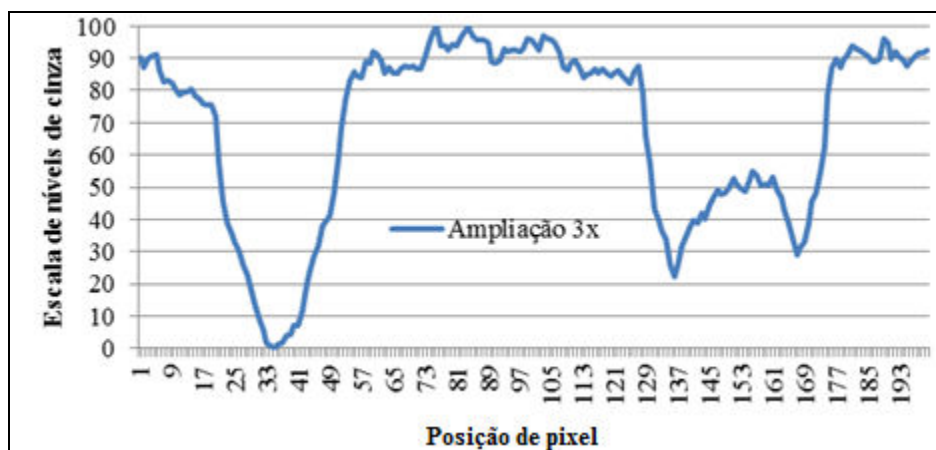


Figura 105 - Região selecionada para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X da amostra padrão de tubo plástico e fibra óptica com ampliação de 03 vezes.

A seguir foi feita a aquisição da imagem radiográfica utilizando a média de 40 imagens adquiridas com tempo de integração de 30 s a uma energia de 40 kVp com 100 μ A, com distância entre o detector e a gerador de raios X de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 05 vezes como ilustra a Figura 106 (a). Para uma melhor visualização dos efeitos de contraste de fase foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra Figura 106 (b).

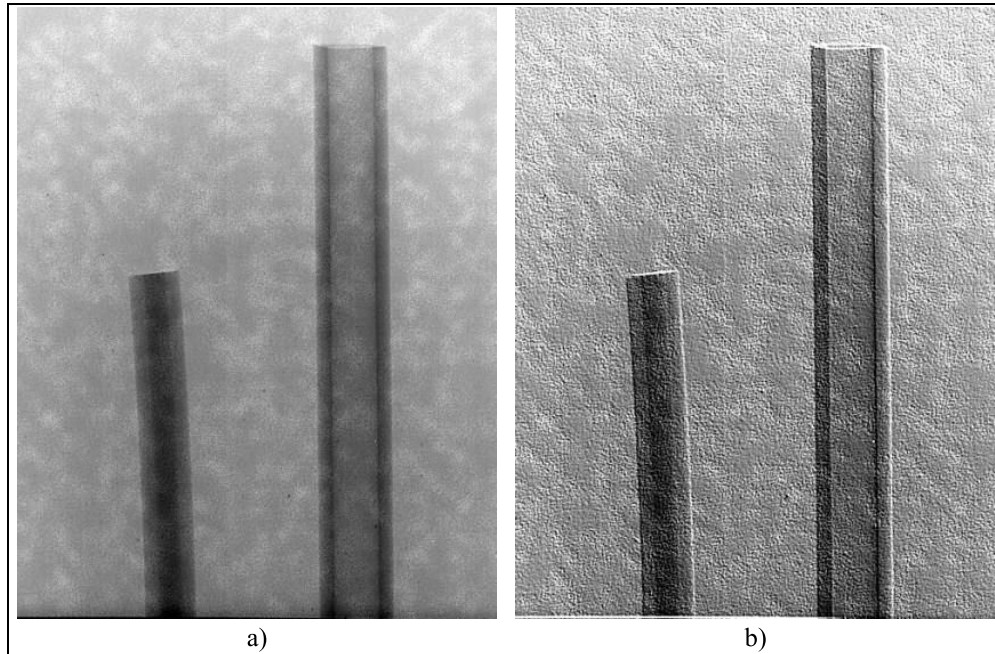


Figura 106 - Radiografia de amostra padrão de tubo plástico e fibra óptica com ampliação de 05 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

A Figura 107 ilustra a região selecionada na Figura 106 (a), para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X, com a variação da distância entre o gerador de raios X e o detector de raios X.

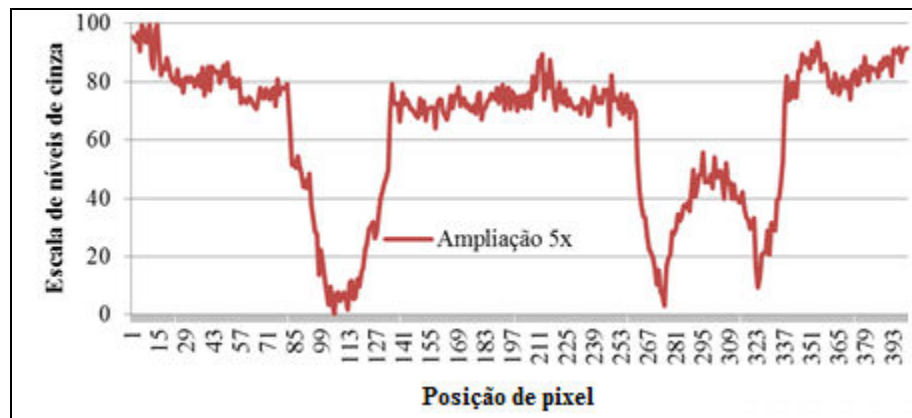


Figura 107 - Região selecionada para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X da amostra padrão de tubo plástico e fibra óptica com ampliação de 05 vezes.

Por fim foi feita a aquisição da imagem radiográfica utilizando a média de 40 imagens adquiridas, com tempo de integração de 30 s a uma energia de 40 kVp com 100 μ A, com distância entre o detector e o gerador de raios X de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 10 vezes como ilustra a Figura 108 (a). Para uma melhor visualização dos efeitos de contraste de fase foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra Figura 108 (b).

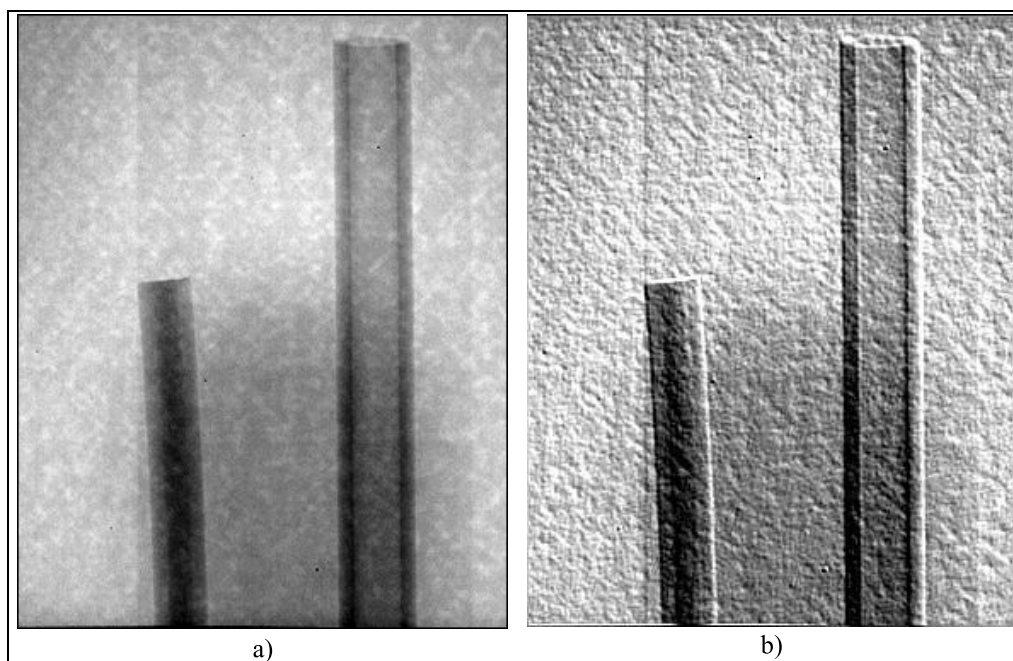


Figura 108 - Radiografia de amostra padrão de tubo plástico e fibra óptica com ampliação de 10 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

A Figura 109 ilustra a região selecionada na Figura 108 (a), para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X, com a variação da distância entre o gerador de raios X e o detector de raios X.

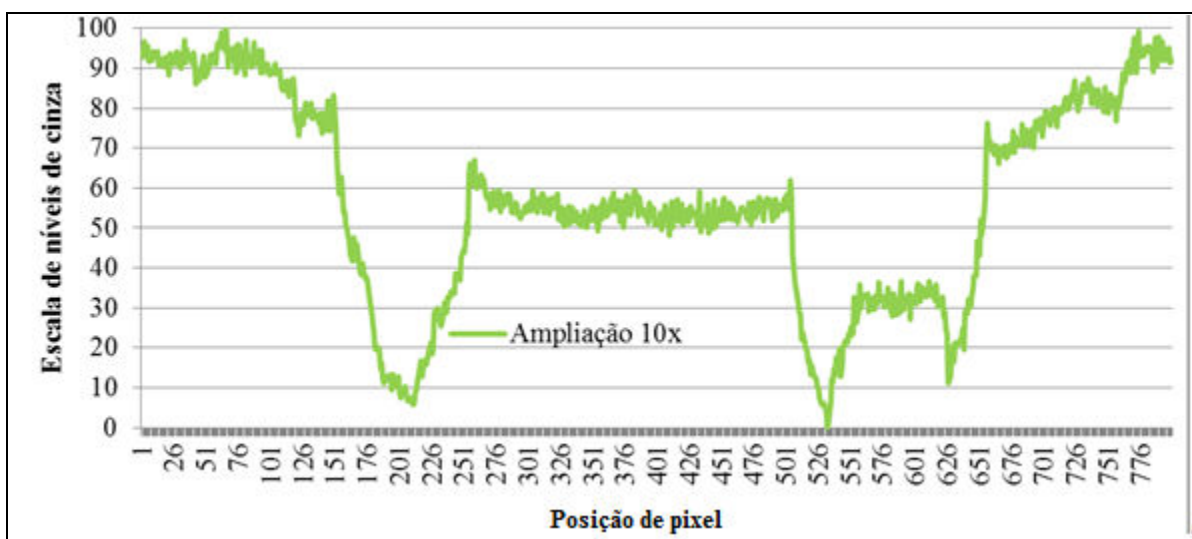


Figura 109 - Região selecionada para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X da amostra padrão de tubo plástico e fibra óptica com ampliação de 10 vezes.

4.3.2.2 AVALIAÇÃO DO CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X EM AMOSTRAS DE CABO ISOLADO EM XLPE COM DETECTOR TECNOLOGIA DE SILÍCIO AMORFO

Para avaliações por contraste de fase de raios X, amostras de cabo isolado em XLPE foram preparadas com cortes perpendiculares a amostras como ilustrada Figura 64.

A Figura 110 (a) mostra a imagem radiográfica com contraste de fase na amostra ilustrada na Figura 64, utilizando a média de 22 imagens adquiridas com energia de 30 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 30 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de aproximadamente 45 vezes. Para uma melhor visualização da região de ruptura foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra a Figura 110 (b) e o filtro no domínio da frequência como ilustra a Figura 111 (b).

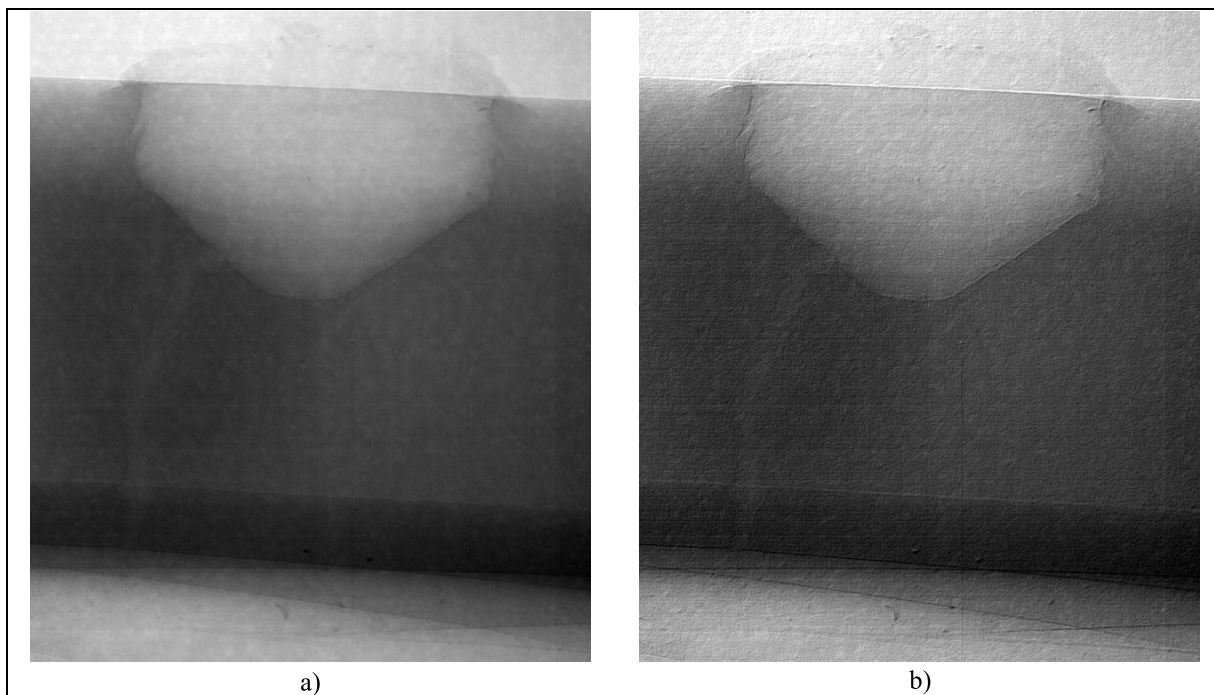


Figura 110 - Radiografia da Amostra 03 com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

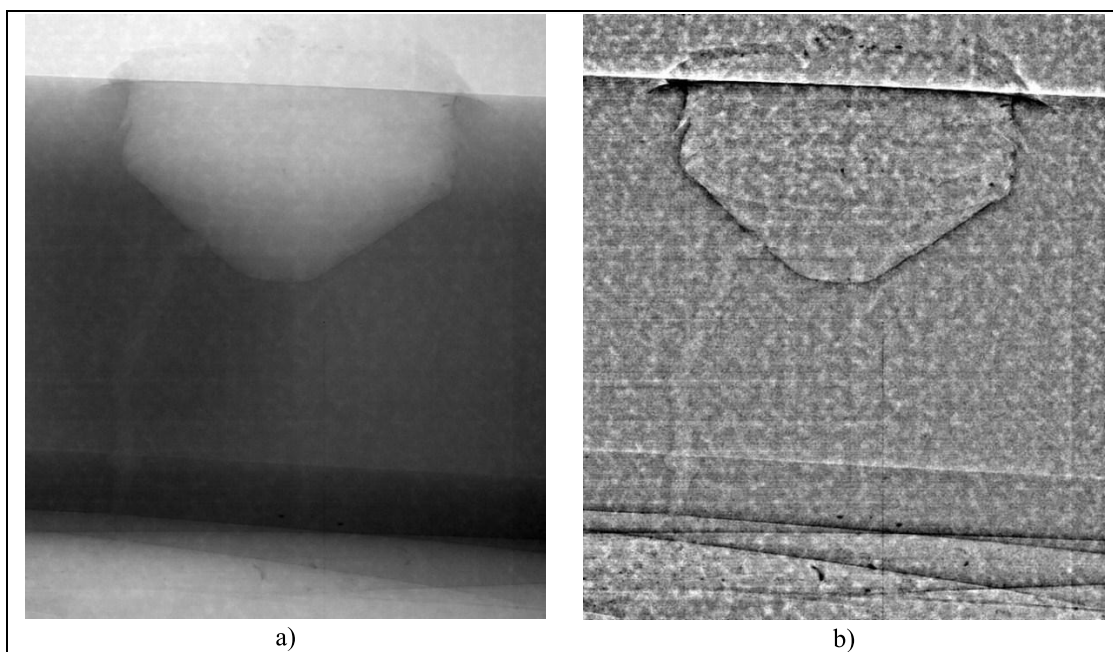


Figura 111 - Radiografia da Amostra 03 com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.

A Figura 112 (a) mostra a imagem radiográfica com contraste de fase na amostra demonstrada na Figura 64, utilizando a média de 60 imagens adquiridas com energia de 25 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 10 segundos, uma distância entre fonte e detector de 800 mm e uma ampliação da resolução espacial de aproximadamente 40 vezes. Para uma melhor visualização da região de ruptura foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra a Figura 112 (b) e o filtro no domínio da frequência como ilustra a Figura 113 (b).

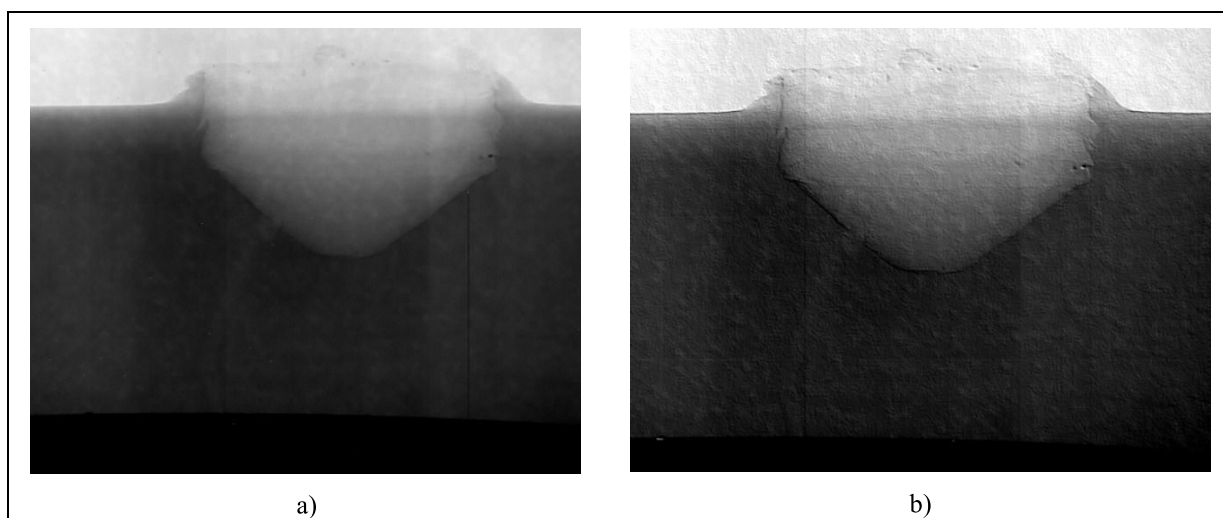


Figura 112 - Radiografia da Amostra 03 com ampliação de 40 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

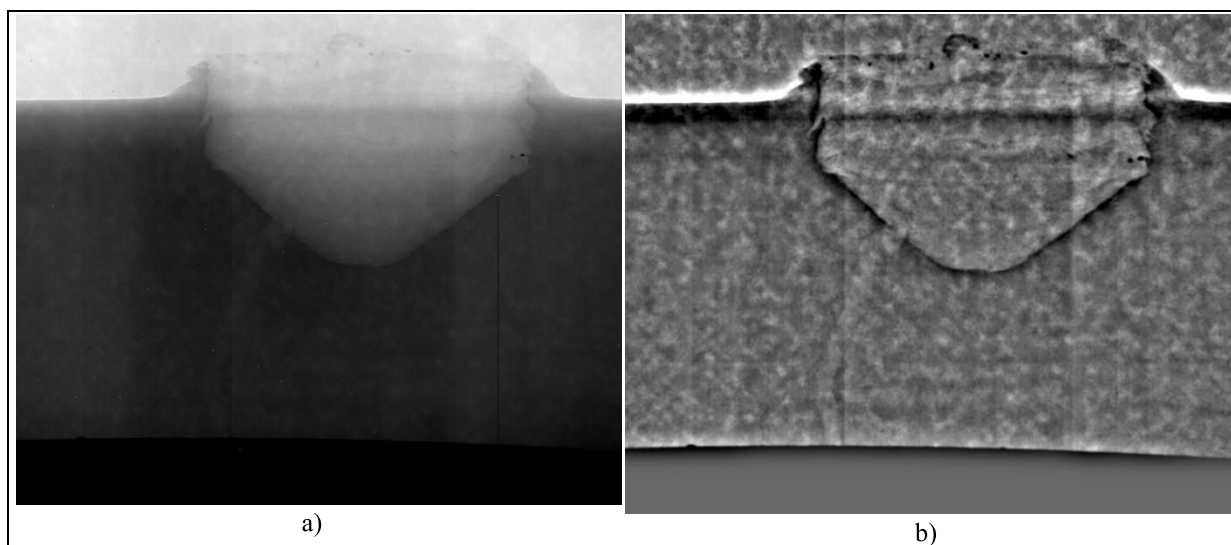


Figura 113 - Radiografia da Amostra 03 com ampliação de 40 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.

A Figura 114 (a) mostra a imagem radiográfica com contraste de fase na amostra demonstrada na Figura , utilizando a média de 40 imagens adquiridas com energia de 40 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 15 segundos, com distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de aproximadamente 45 vezes, para uma melhor visualização da região de ruptura foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra a Figura 114 (b) e o filtro no domínio da frequência como ilustra a Figura 115 (b).

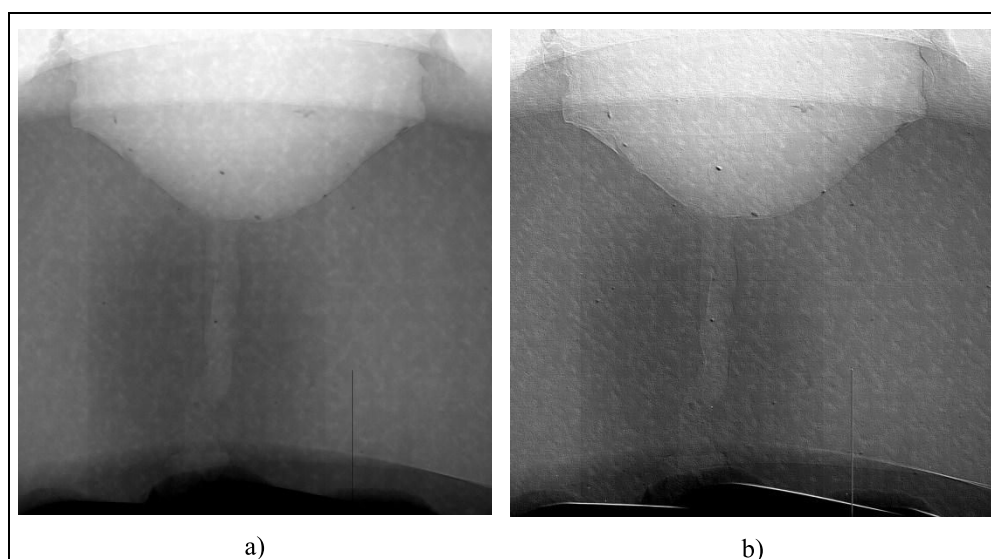


Figura 114 - Radiografia da Amostra 04 com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

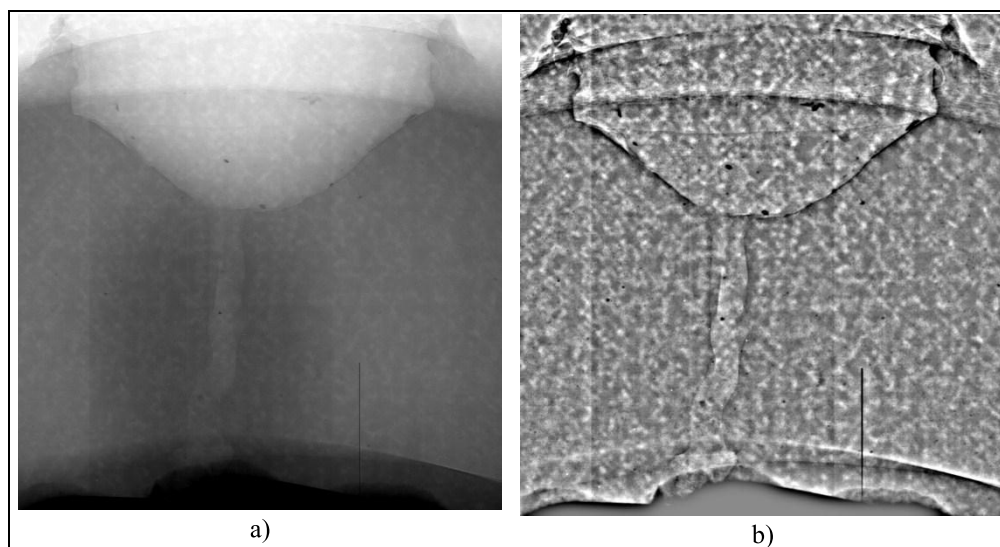


Figura 115 - Radiografia da Amostra 04 com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.

4.3.2.3 AVALIAÇÃO DO CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X EM AMOSTRAS DE CABO ISOLADO EM EPR COM DETECTOR TECNOLOGIA DE SILÍCIO AMORFO

Para a avaliação do contraste de fase de raios X em amostras de cabo isolado em EPR, cortes foram realizados próximos à região de ruptura dielétrica visando diminuir a área da amostra como ilustra amostra 07 na Figura 65, de forma que fosse utilizada menos energia para geração de raios X e diminui-se o tempo de integração nestas amostras.

A imagem radiográfica com contraste de fase de raios X da amostra 07 ilustrada na Figura 116 (a), foi feita utilizando a média de 40 imagens adquiridas com energia de 35 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 30 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de aproximadamente 45 vezes. Para uma melhor visualização da região de ruptura foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra a Figura 116 (b) e o filtro no domínio da frequência como ilustra a Figura 117 (b).

Podem ser verificadas na Figura 116 (b) e Figura 117 (b) possíveis regiões de arborescências elétricas com realce de contraste pela técnica de contraste de fase de raios X.

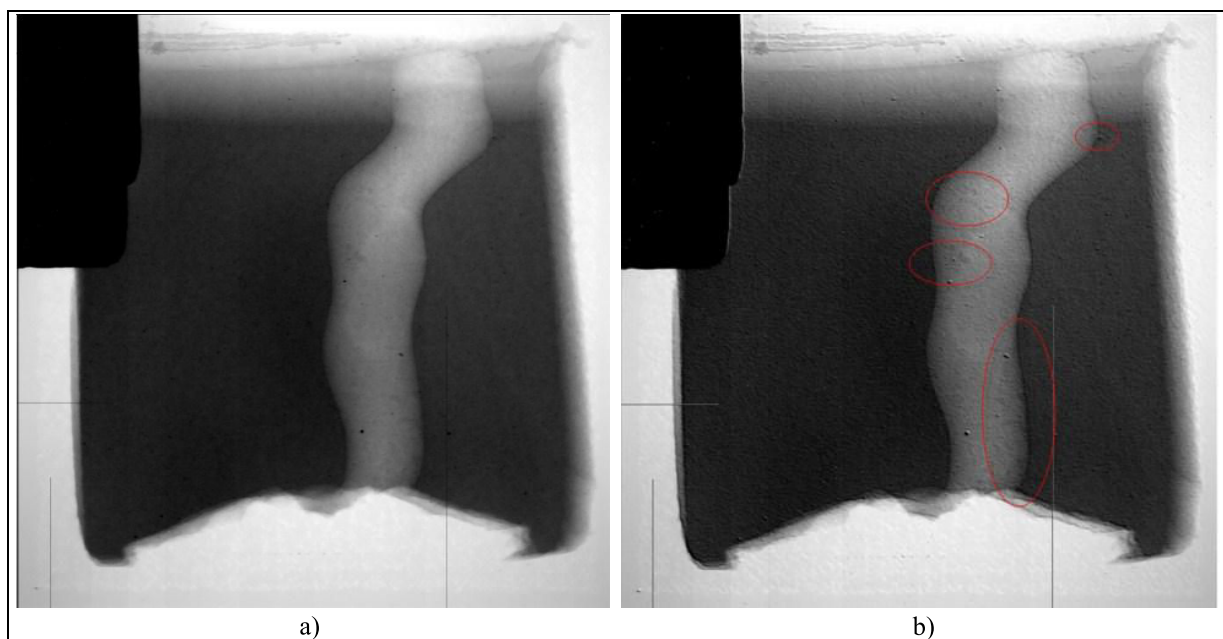


Figura 116 - Radiografia da Amostra 07 com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

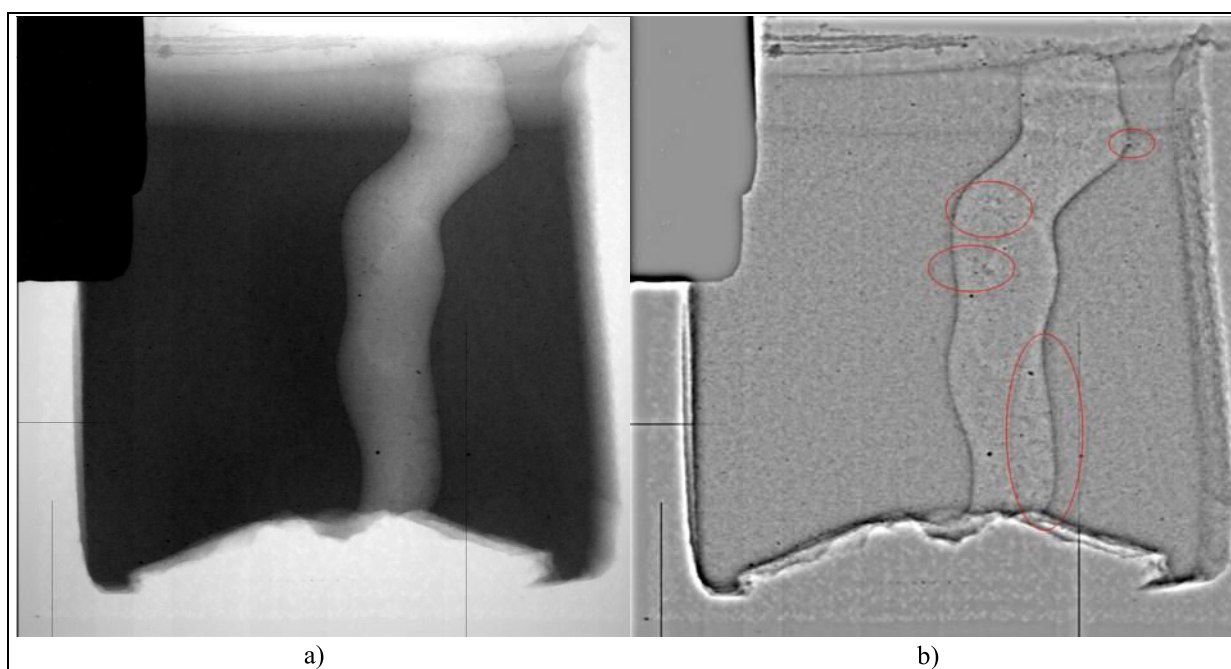


Figura 117 - Radiografia da Amostra 07 com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.

A imagem radiográfica ilustrada na Figura 118 (a) com contraste de fase de raios X em uma das partes da amostra 08 (a) ilustrada na Figura 66, foi feita utilizando a média de 40 imagens adquiridas com energia de 35 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 30 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de aproximadamente 45 vezes. Para melhor visualização da região de

ruptura foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra a Figura 118 (b) e o filtro no domínio da frequência como ilustra a Figura 119 (b).

A Figura 118 (b) e Figura 119 (b) indicam a região onde ocorreu degradação do material devido à ruptura dielétrica.

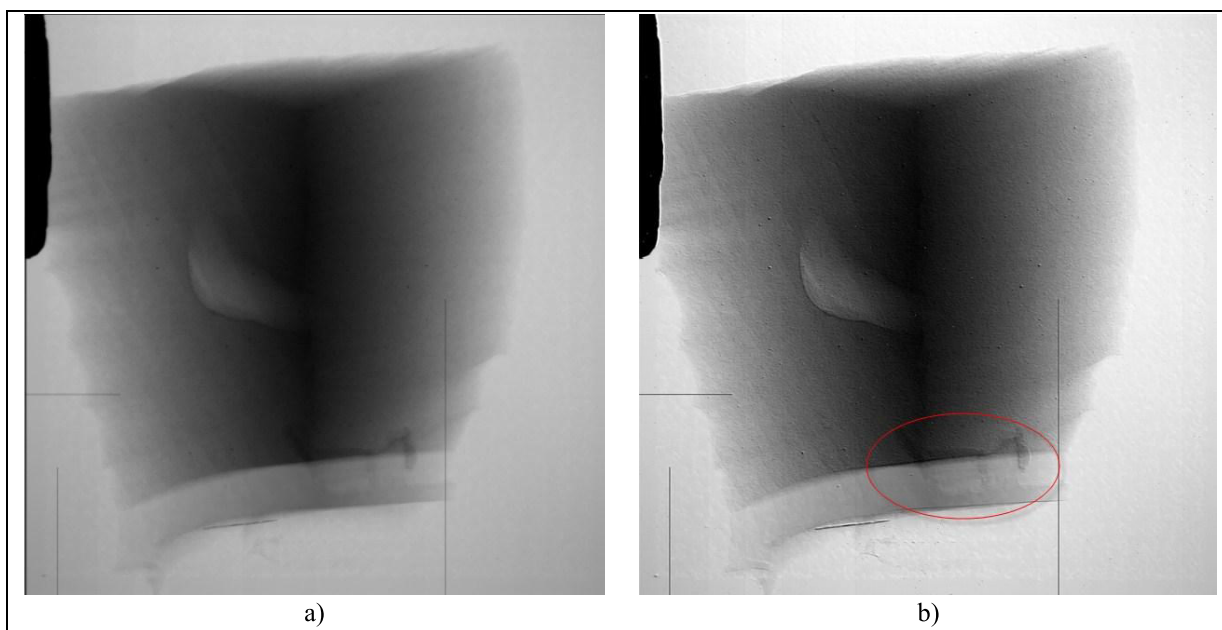


Figura 118 - Radiografia da Amostra 08 (a) com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

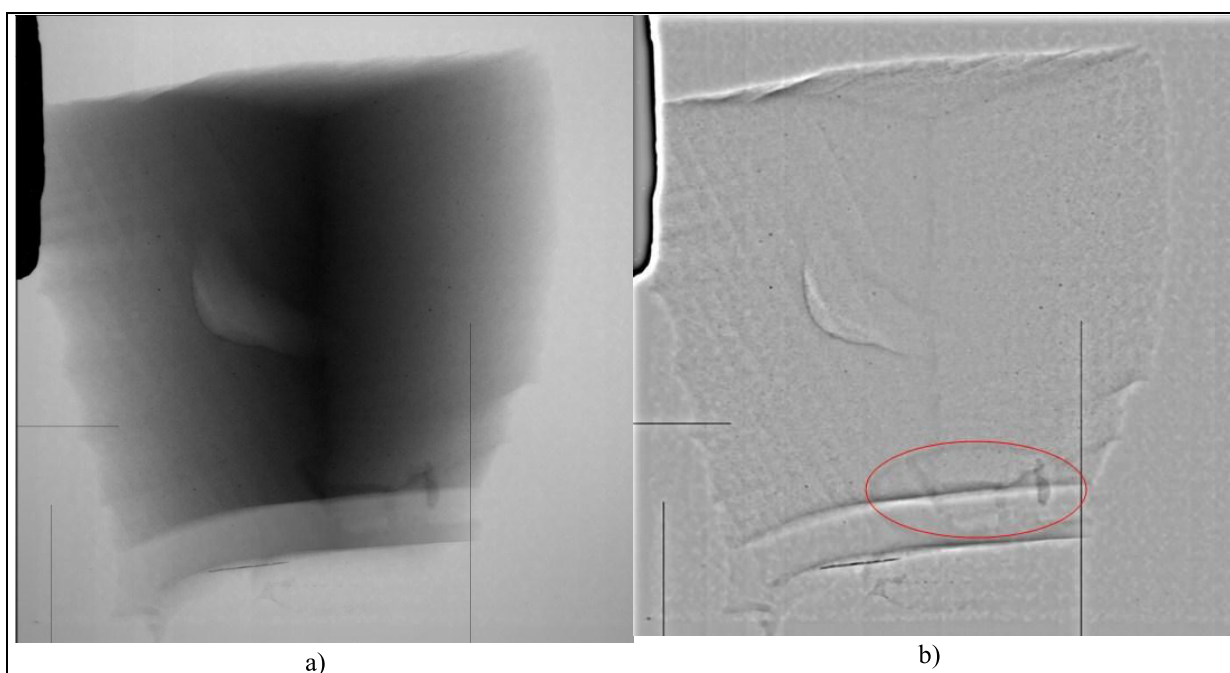


Figura 119 - Radiografia da Amostra 08 (a) com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.

Em outra parte de amostra 08 foram feitas avaliações da distância do detector ao gerador de raios X e variações na ampliação da resolução espacial. A Figura 120 ilustra imagens radiográficas com variações de distância entre o detector e o gerador de raios X de 200 mm, 400 mm, 800 mm e 1000 mm, com ampliação da resolução espacial de 10 vezes, média de 10 imagens, com tempo de integração de 5 segundos.

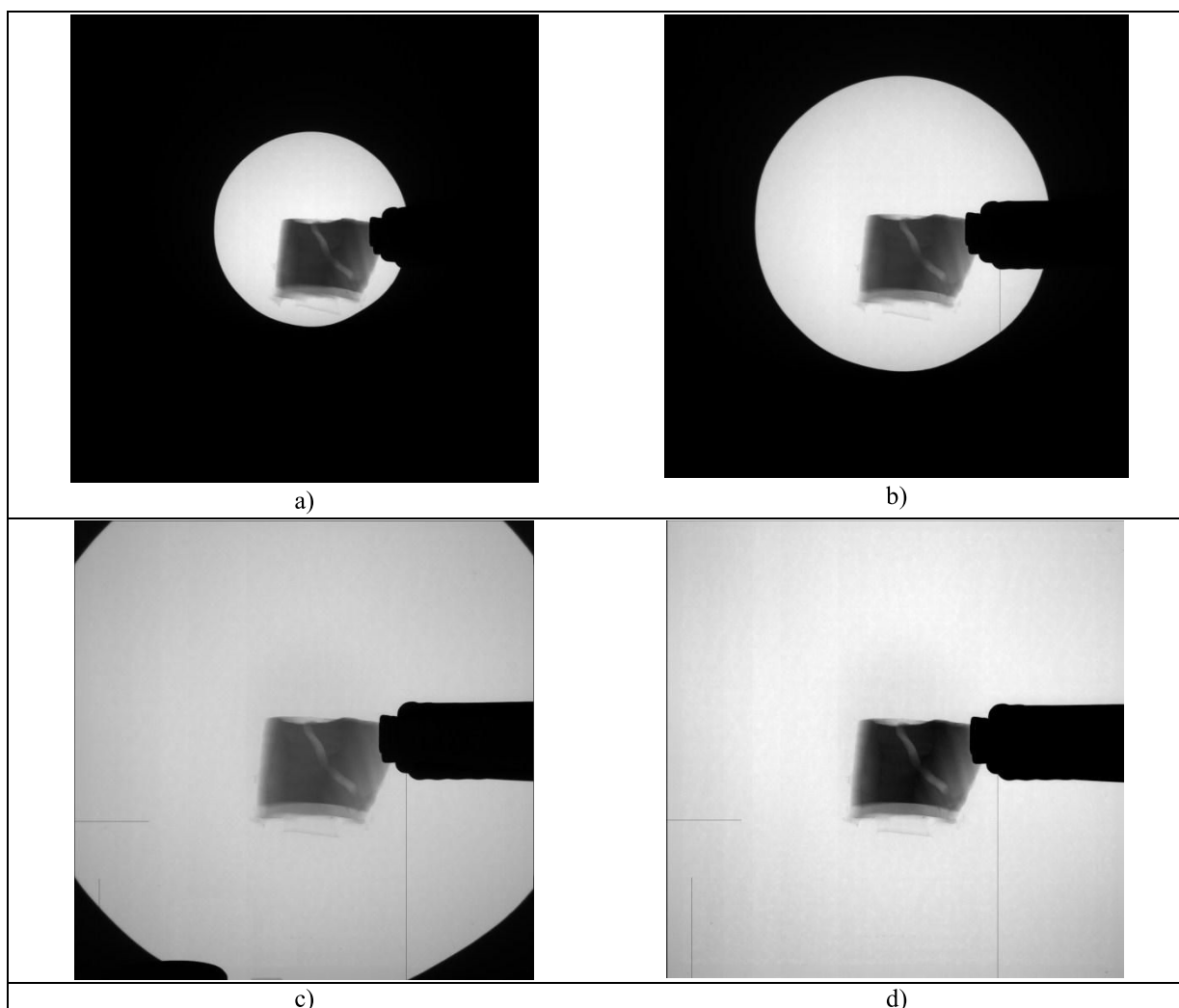


Figura 120 - Radiografia da Amostra 08 (b) com ampliação de 10 vezes, a) distância entre DF 200 mm e tensão de 26 kVp, b) distância entre DF 400 mm e tensão de 28 kVp, c) distância entre DF 800 mm e tensão de 36 kVp, d) distância entre DF 1000 mm e tensão de 39 kVp.

A Figura 121 ilustra imagens radiográficas com variações da ampliação da resolução espacial de 03 vezes, 05 vezes, 10 vezes e 40 vezes, com distância do gerador de raios X ao detector de 1000 mm, tensão de 39 kVp, média de 10 imagens com tempo de integração de 5 segundos.

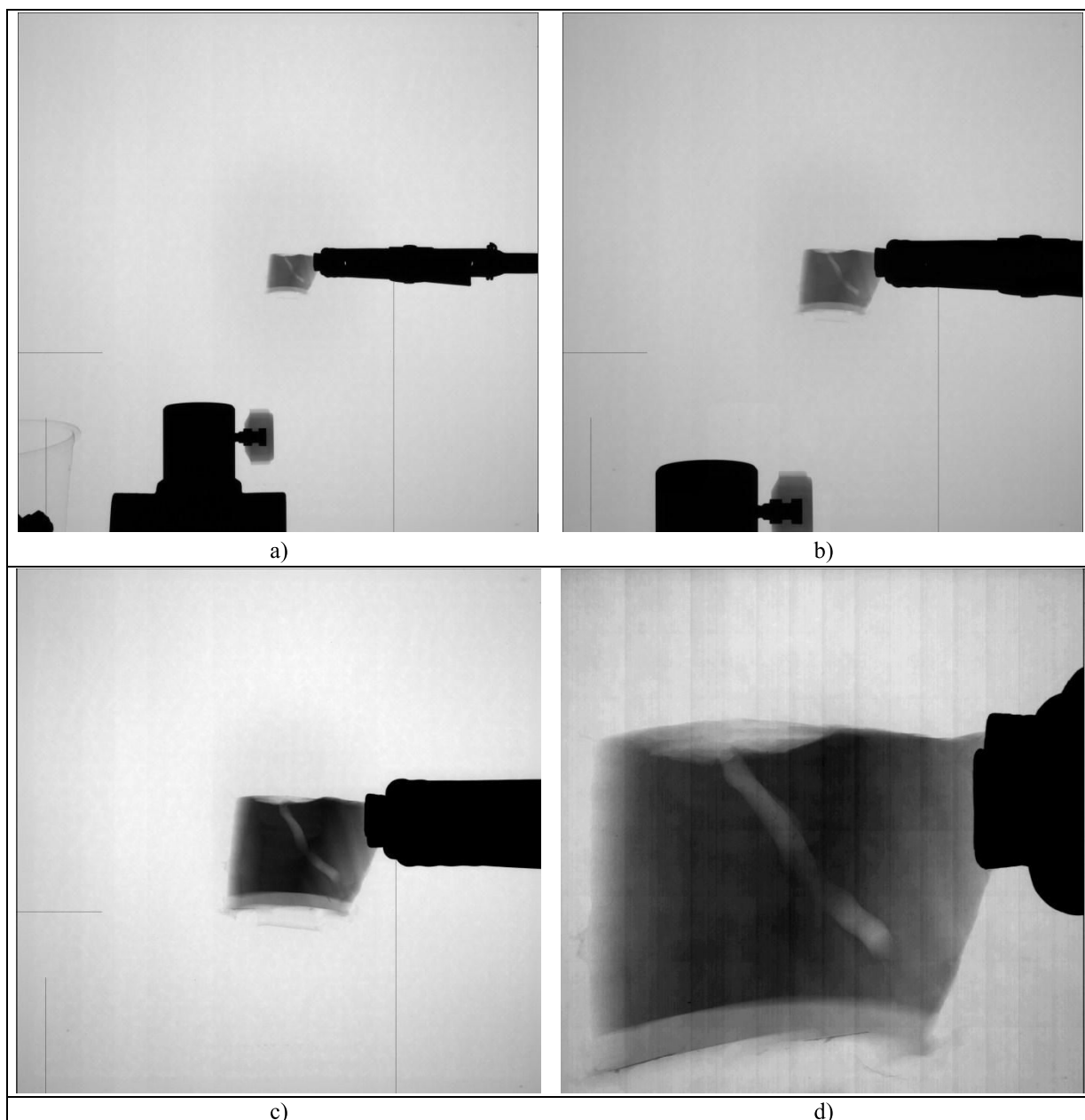


Figura 121 - Radiografia da Amostra 08 (b) com distância entre DF 1000 mm, a) ampliação da resolução espacial de 03 vezes, b) ampliação da resolução espacial de 05 vezes, c) ampliação da resolução espacial de 10 vezes, d) ampliação da resolução espacial de 40 vezes.

A imagem radiográfica ilustrada na Figura 122 (a) com contraste de fase de raios X em uma das partes da amostra 08 (b) ilustrada na Figura 66, foi feita utilizando a média de 40 imagens adquiridas com energia de 35 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 30 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de aproximadamente 45 vezes. Para melhor visualização da região de ruptura foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra a Figura 122 (b) e o filtro no domínio da frequência como ilustra a Figura 123 (b).

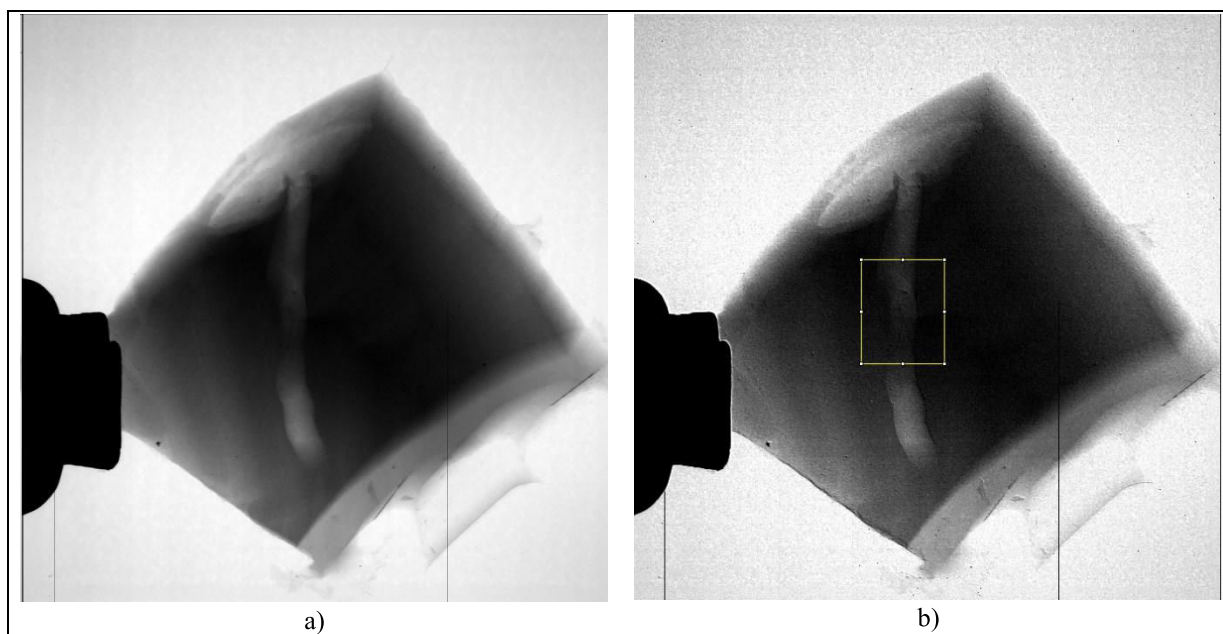


Figura 122 - Radiografia da Amostra 08 (b) com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

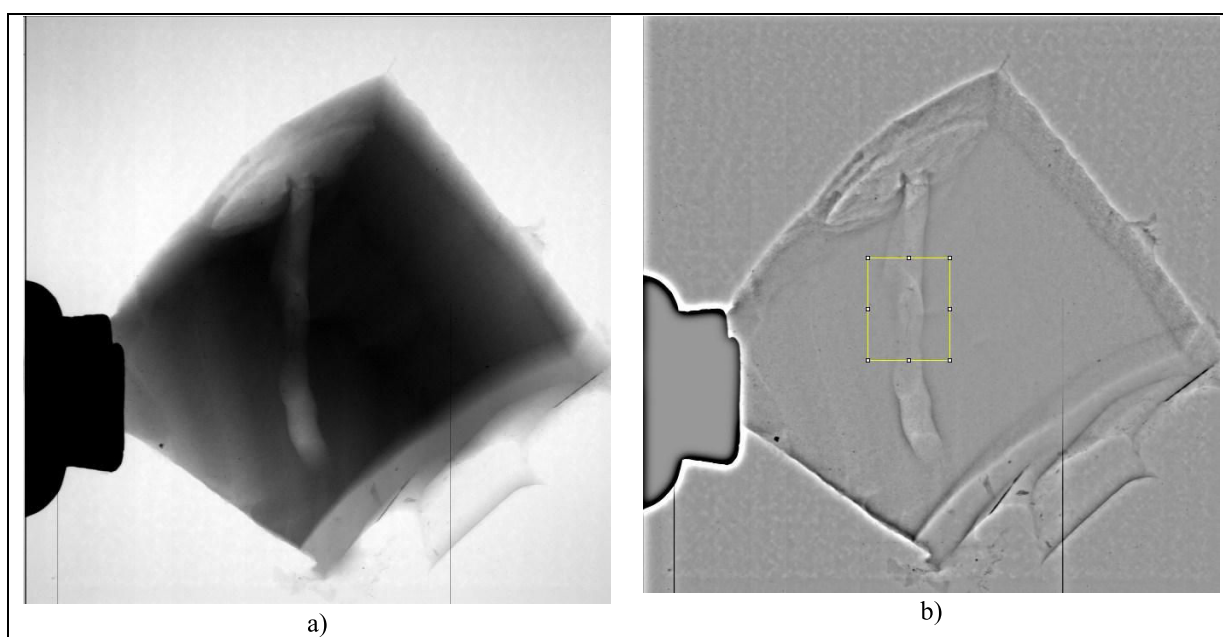


Figura 123 - Radiografia da Amostra 08 (b) com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.

A Figura 124 indica a região onde ocorreu degradação do material devido à ruptura dielétrica e o surgimento da arborescência elétrica.

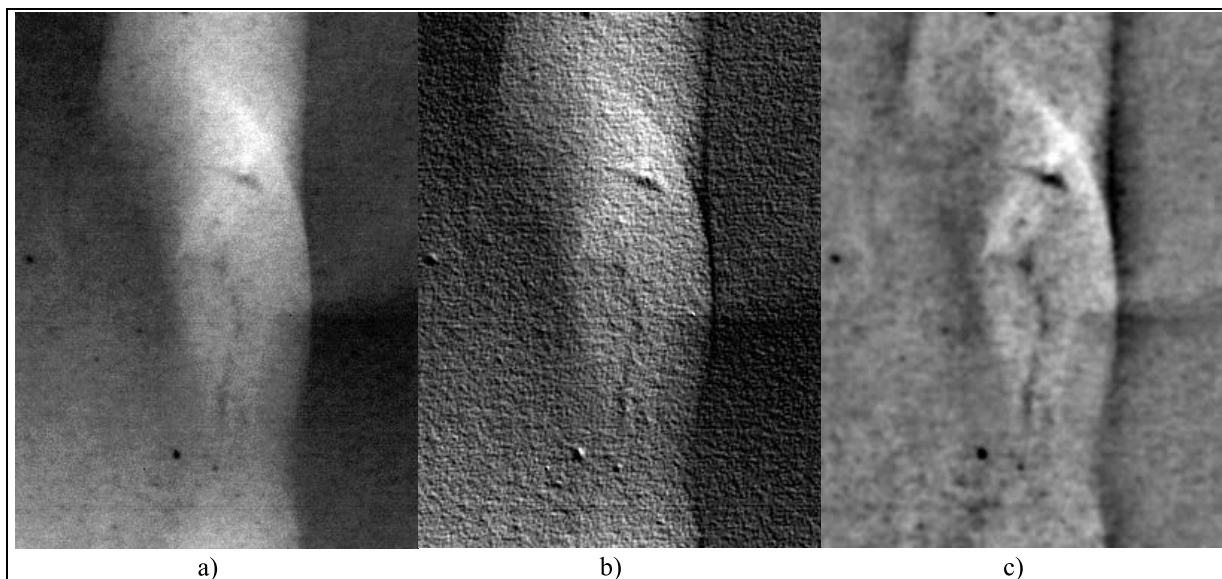


Figura 124 - Radiografia da Amostra 08 (b) com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas, c) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.

4.3.2.4 AVALIAÇÃO DO CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X EM AMOSTRAS DE LENÇÓIS DE BORRACHA NATURAL EPR COM DETECTOR TECNOLOGIA DE SILÍCIO AMORFO.

Após a preparação das amostras foram feitas radiografias utilizando a técnica de contraste de fase de raios X. A Figura 125 (a) mostra a imagem radiográfica com contraste de fase de raios X. A imagem foi produzida utilizando a média de 168 imagens adquiridas com energia de 40 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 20 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 45 vezes. Para melhor visualização da região de ruptura foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra a Figura 125 (b) e o filtro no domínio da frequência como ilustra a Figura 126 (b).

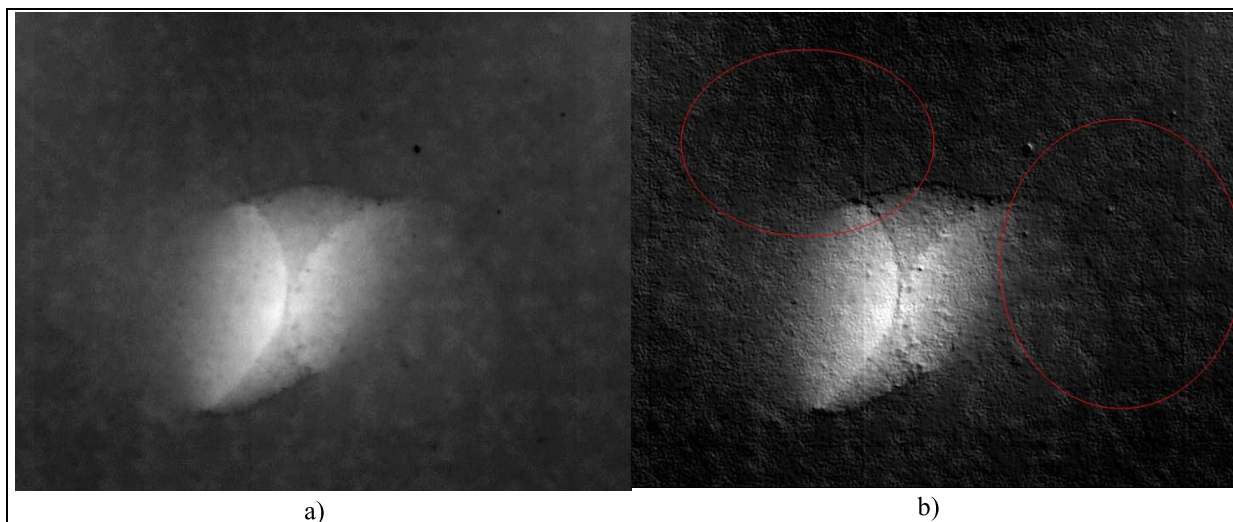


Figura 125 - Radiografia de amostra de lençol de borracha natural EPR com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

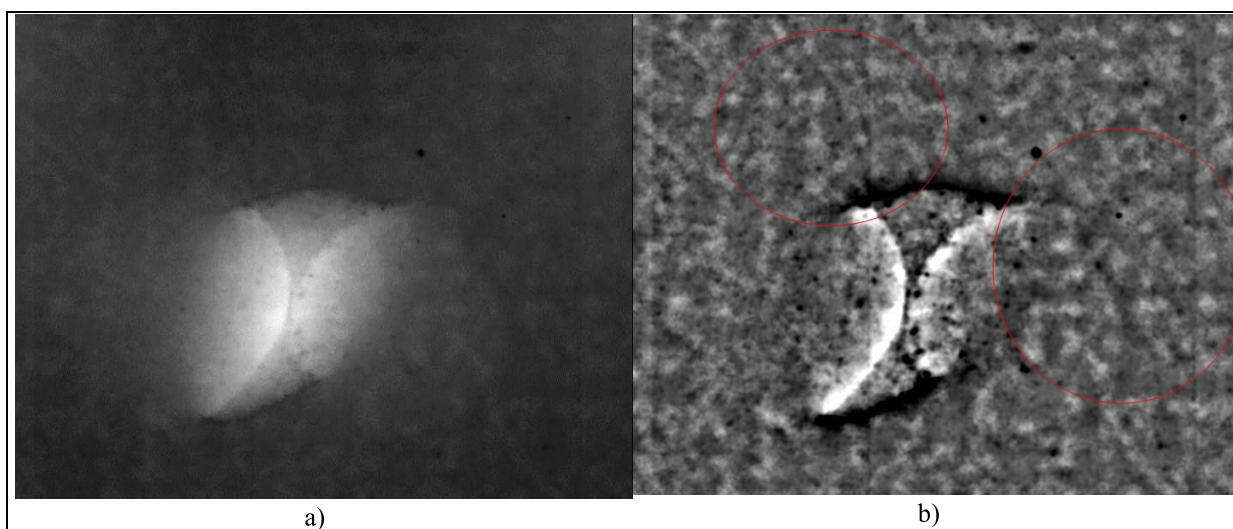


Figura 126 - Radiografia de amostra de lençol de borracha natural EPR com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.

A Figura 125 (b) e Figura 126 (b) indicam a região onde ocorreu degradação do material devido à ruptura dielétrica e o surgimento da arborescência elétrica.

A Figura 127 (a) mostra a imagem radiográfica com contraste de fase de raios X, sendo essa produzida utilizando a média de 168 imagens adquiridas com energia de 40 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 20 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 45 vezes. Para melhor visualização da região de ruptura foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra a Figura 127 (b) e o filtro no domínio da frequência como ilustra a Figura 128 (b).

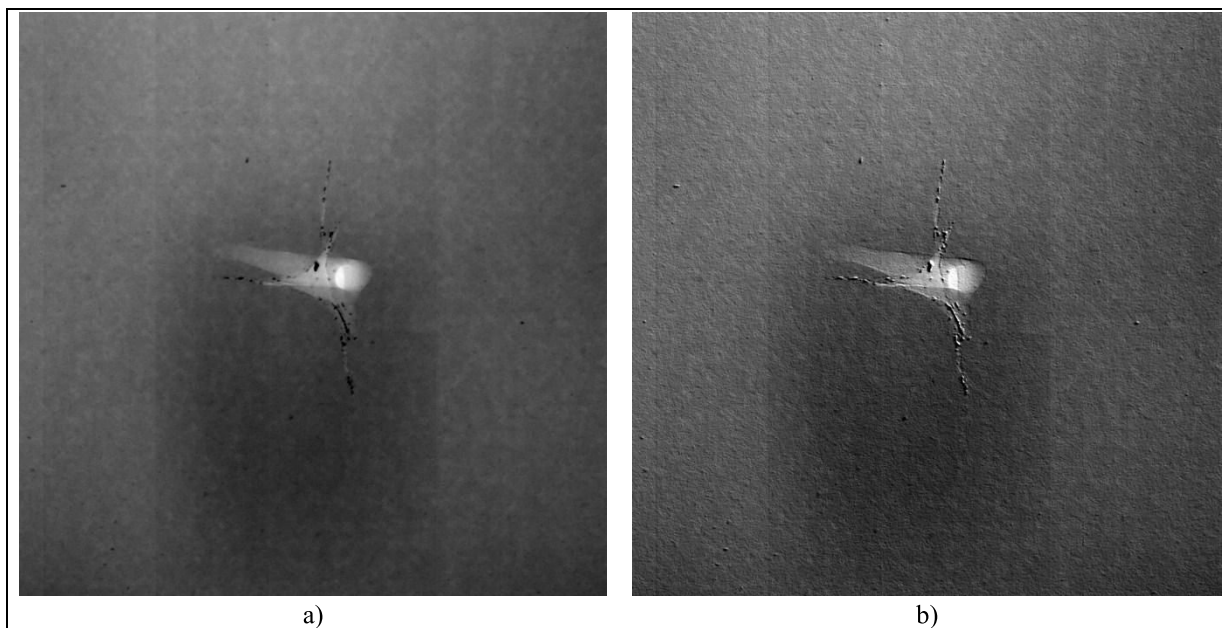


Figura 127 - Radiografia de amostra de lençol de borracha natural EPR com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas.

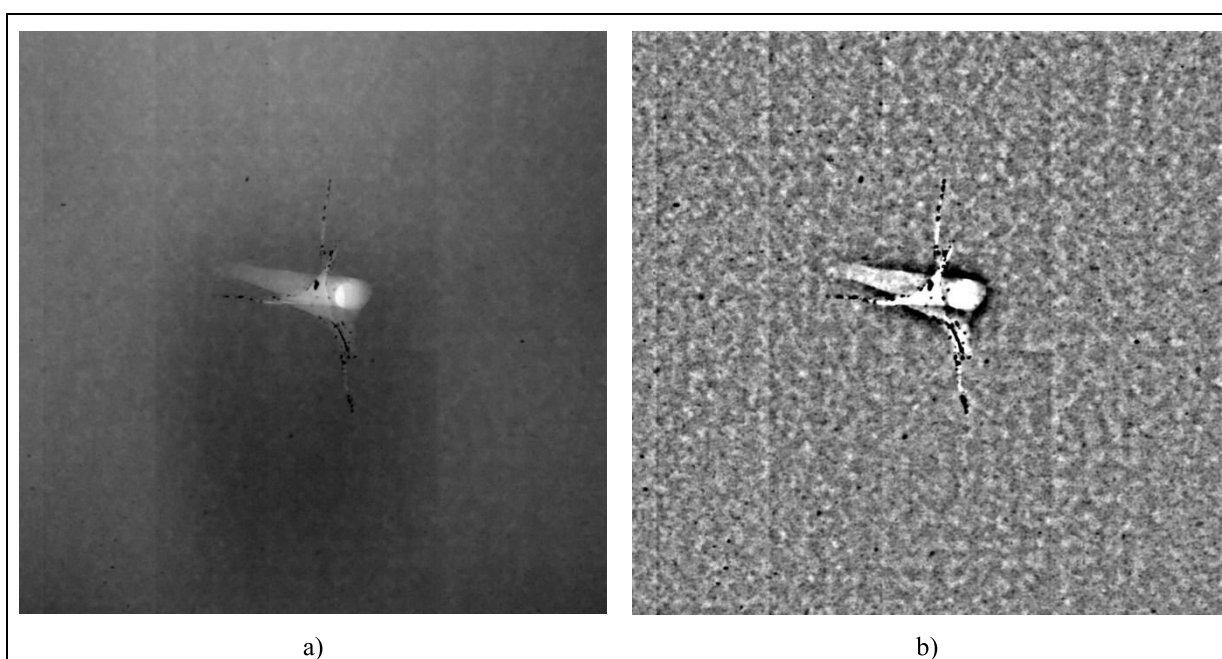


Figura 128 - Radiografia de amostra de lençol de borracha natural EPR com ampliação de 45 vezes, a) sem filtro, b) com filtro de detecção de bordas no domínio da frequência.

4.3.2.5 AVALIAÇÃO DE IMAGENS RADIOGRÁFICAS ENTRE GERADORES DE RAIOS X

DISTINTOS COM DETECTOR TECNOLOGIA DE SILÍCIO AMORFO

Inicialmente foram feitos os cálculos de ampliação da resolução espacial e os cálculos da penumbra geométrica para um ponto focal do gerador de raios X de 400 μm para as distâncias do gerador de raios X ao objeto R_1 e objeto detector R_2 , como ilustra a Figura 4.

A Figura 129 ilustra os cálculos feitos da ampliação da resolução espacial e os cálculos da penumbra geométrica para o gerador de raios X milifoco.

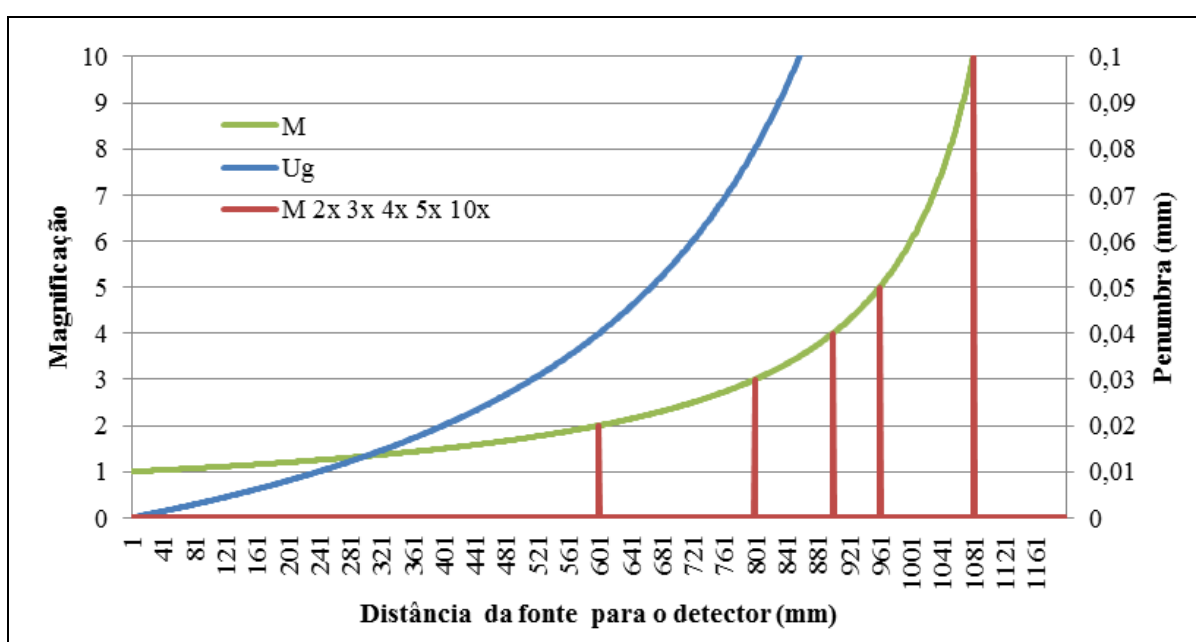


Figura 129 - Cálculos da ampliação da resolução espacial e os cálculos da penumbra geométrica para o gerador de raios X milifoco.

Para o cálculo da coerência espacial foi definido e calculado os seguintes valores:

- E (eV) = 20000;
- E_{ef} (eV) = 12000;
- c (m/s) = 299.792.458;
- h (eVs) = $4,13566733 \times 10^{-15}$;
- λ (m) = $1,0332 \times 10^{-10}$.

A Tabela 5 mostra os valores calculados dos fatores que influenciam na realização de radiografias por contraste de fase utilizando o gerador de raios X milifoco.

Tabela 5 - Calcula dos fatores que influenciam de radiografias por contraste de fase no gerador de raios X milifoco.

M	U_g (mm)	d (mm)	R₁ (mm)	R₂ (mm)
2	0,040	0,0026	600	601
3	0,080	0,0017	400	801
4	0,120	0,0013	300	901
5	0,160	0,0010	240	961
10	0,364	0,0005	119	1082

Com estes fatores foi realizada a comparação das radiografias com diferentes distâncias entre os geradores de raios X e o detector de raios X, a fim de demonstrar a técnica de contraste de raios X frente a diferentes arranjos experimentais.

A Figura 130 mostra a imagem radiográfica utilizando o gerador de raios X de milifoco, sendo essa feita com energia de 30 kVp com corrente de 3 mA, um tempo de integração de 02 segundos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e com ampliação da resolução espacial de 01 vez, 02 vezes, 03 vezes e 05 vezes.

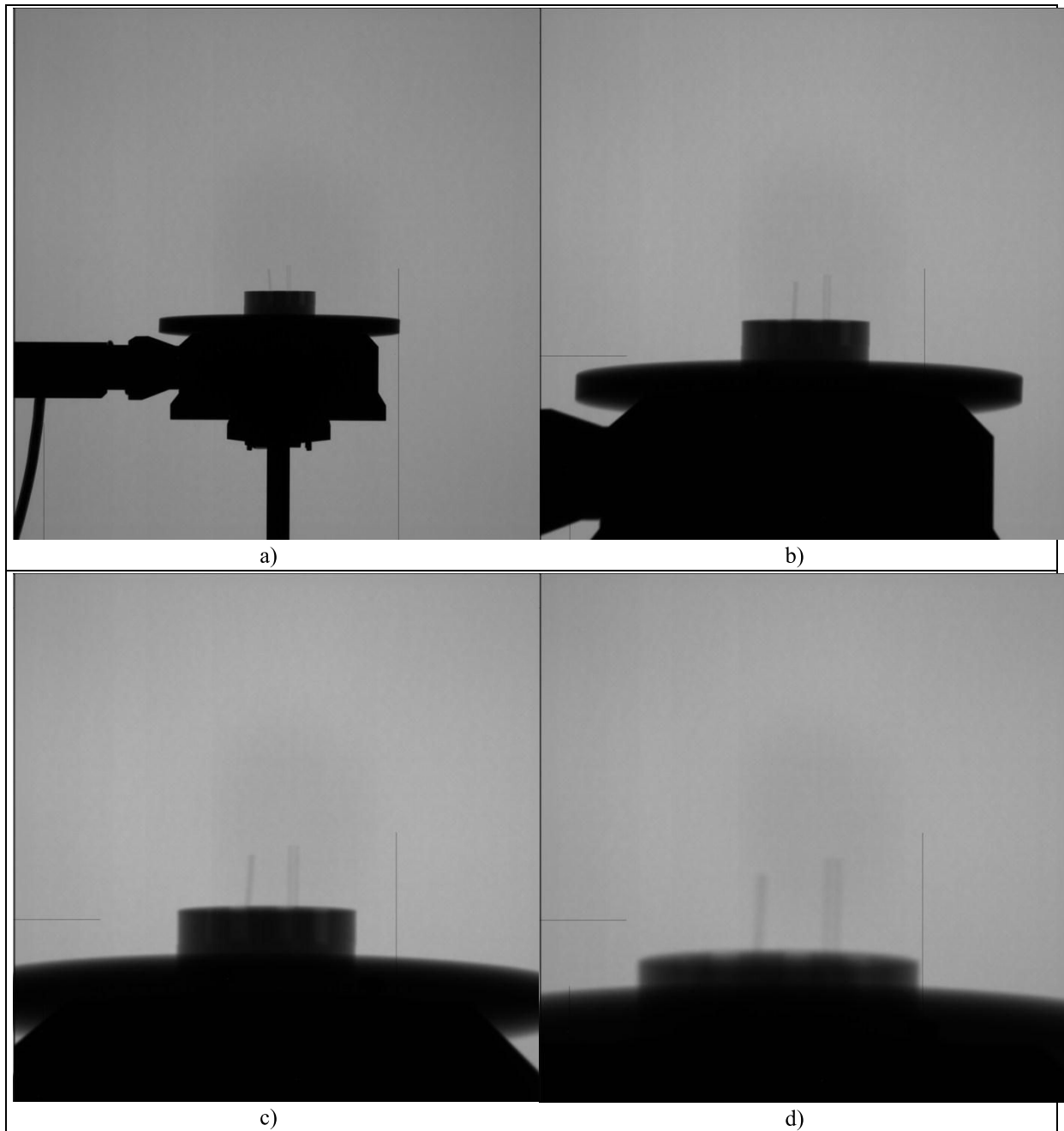


Figura 130 - Radiografia de amostra de tubo plástico e fibra óptica plástica, a) ampliação de 01 vez, b) ampliação de 02 vezes, b) ampliação de 03 vezes, b) ampliação de 05 vezes.

O gráfico ilustrado na Figura 131 mostra a comparação das imagens da Figura 130, as quais possuem ampliação da resolução espacial variadas com a mesma distancias entre o detector e o gerador de raios X. No gráfico da Figura 131 é possível visualizar a distorção das imagens provocadas pela penumbra geométrica do efeito dos raios X.

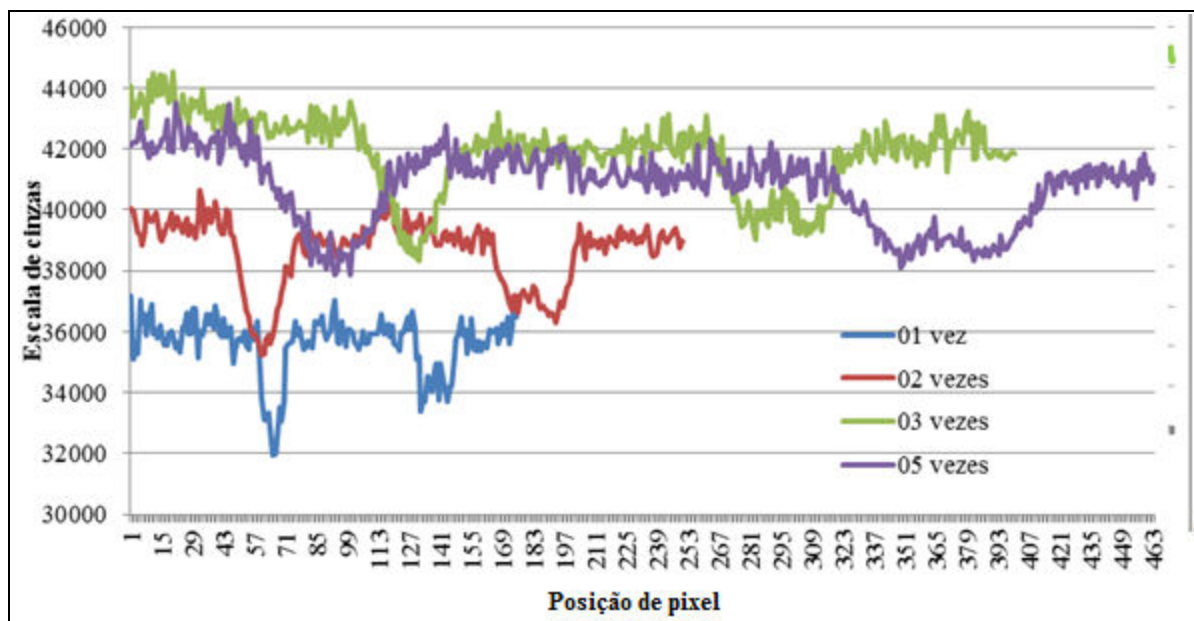


Figura 131 - Distorção das imagens provocadas pela penumbra geométrica.

A Figura 132 mostra a comparação das imagens da Figura 130 (d) com a imagem da Figura 106 (a), as quais possuem a mesma ampliação da resolução espacial com as mesmas distâncias entre o detector e o gerador de raios X, mas com geradores de raios X distintos. Nesta Figura 132 podemos perceber a diferença das imagens com ampliação da resolução espacial e a distorção que ocorre com a fonte com foco do gerador de raios X muito grande apresentada na Figura 132 (a).

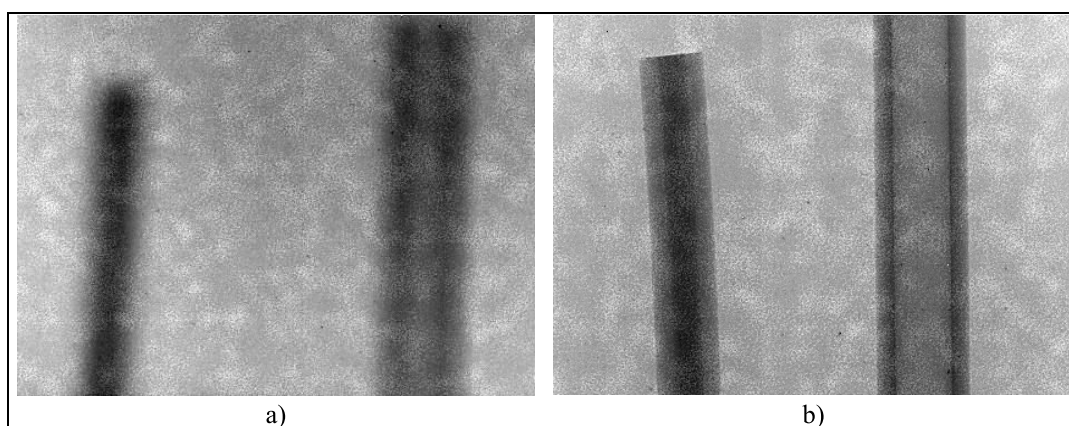


Figura 132 - Radiografia de amostra padrão de tubo plástico e fibra óptica com ampliação de 05 vezes, a) imagem radiográfica com gerador de raios X milifoco b) imagem radiográfica com gerador de raios X microfoco.

4.3.3 AVALIAÇÃO DE ARBORESCÊNCIA POR CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X UTILIZANDO FILMES RADIOGRÁFICOS

As avaliações de arborescência por contraste de fase de raios X utilizando filmes radiográficos de mamografia foram produzidas em amostras e fatias microtomadas de amostras de cabo isolado em XLPE, amostras de cabo isolado XLPE e amostra de lençol de borracha natural EPR.

4.3.3.1 AVALIAÇÃO DO CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X EM AMOSTRAS DE CABO ISOLADO EM XLPE UTILIZANDO FILMES RADIOGRÁFICOS

Nas avaliações foram utilizadas distâncias de 1200 mm a 700 mm do gerador de raios X ao filme radiográfico de mamografia. Foi observado que na distância de 1200 mm era necessário utilizar energias mais altas (40 kVp) para conseguir uma revelação do filme com tempo de integração abaixo de 10 minutos, sendo assim para energias mais baixas (12 kVp) o tempo de integração foi maior que 01 hora. Foi verificado que os filmes radiográficos ficavam mais escuros conforme o nível de corrente utilizado e o tempo de exposição, e por isso foram feitos testes alterando a corrente entre 100 μ A, 50 μ A, 40 μ A, 30 μ A e 10 μ A.

Na Figura 133 a Figura 140 são apresentados alguns dos resultados alcançados para distâncias de 700 mm e ampliação de 03 vezes.

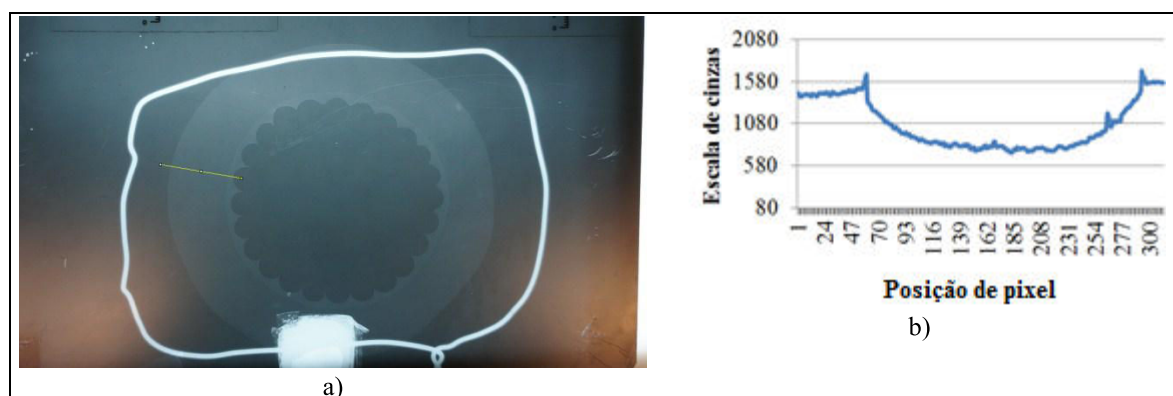


Figura 133 - Filme adquirido em distância de 700 mm ampliação da resolução espacial de 03 vezes 12 kVp 100 μ A e 10 minutos de integração, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.

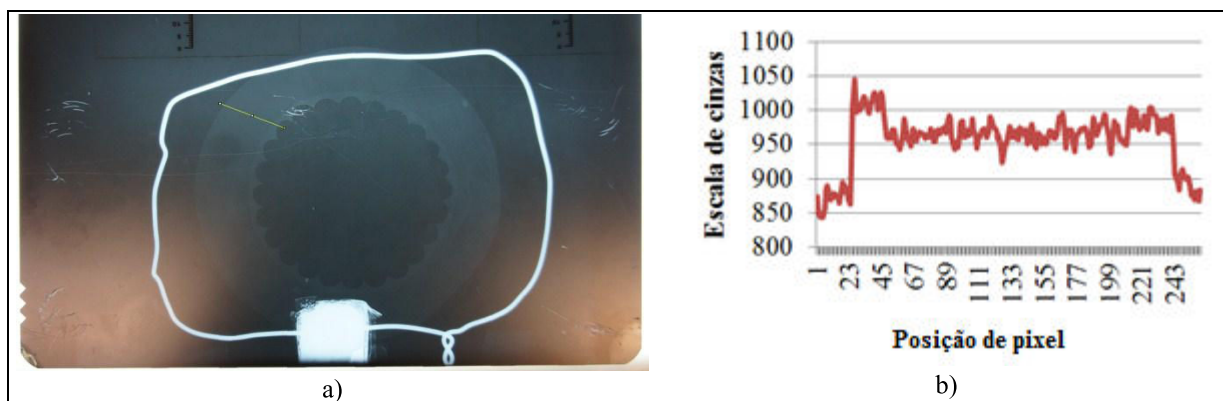


Figura 134 - Filme em distância de 700 mm ampliação da resolução espacial de 03 vezes 12 kVp 100 μ A e 20 minutos de integração, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.

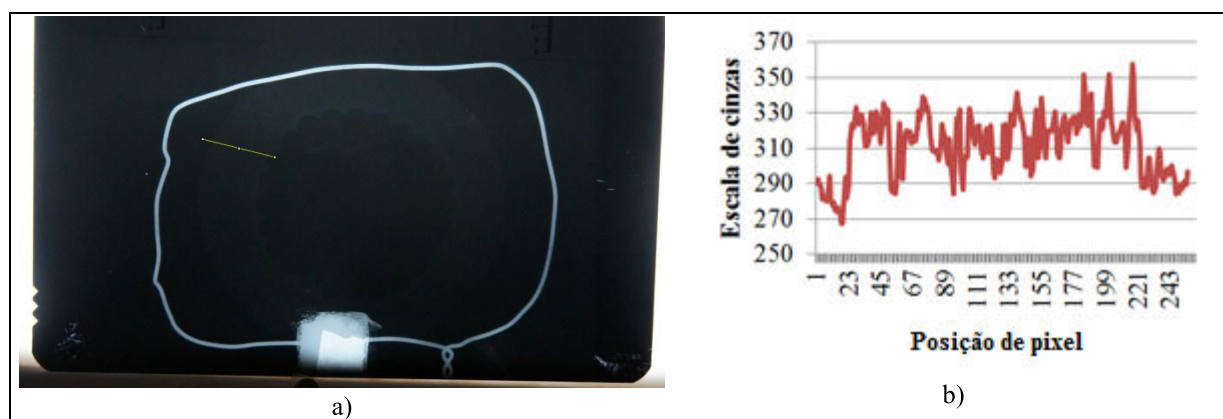


Figura 135 - Filme em distância de 700 mm ampliação da resolução espacial de 03 vezes 12 kVp 100 μ A e 30 minutos de integração, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.

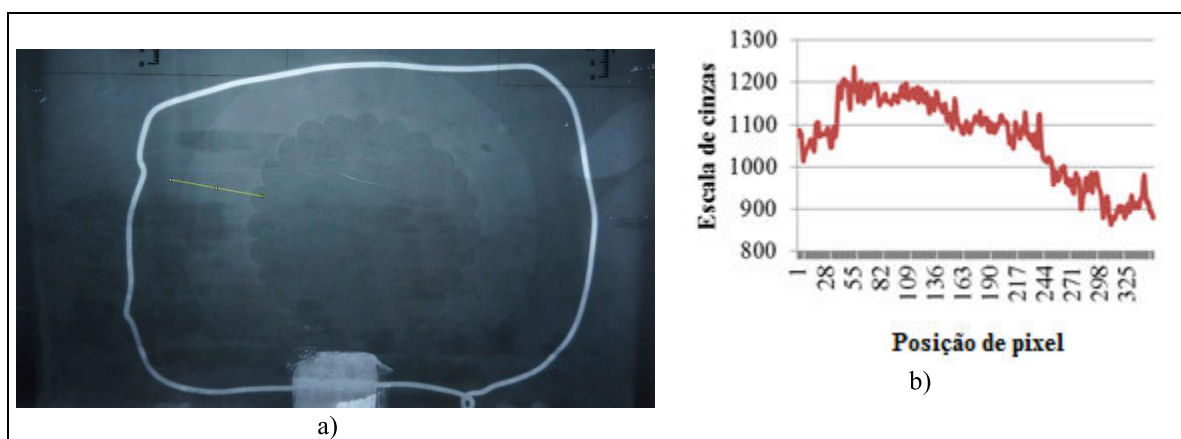


Figura 136 - Filme em distância de 700 mm ampliação da resolução espacial de 03 vezes 12 kVp 50 μ A e 30 minutos de integração, a) filme radiográfico, b) análise de uma região do filme.

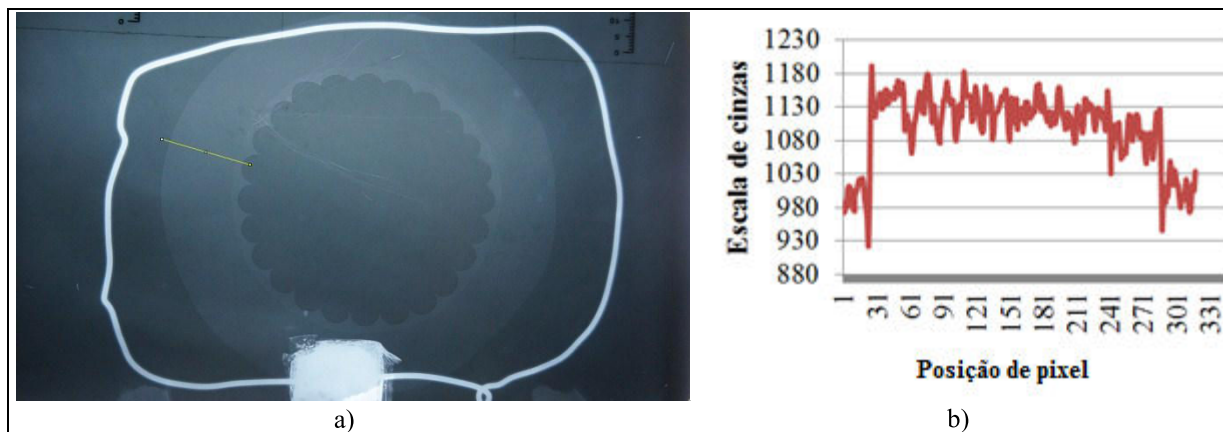


Figura 137 - Filme em distância de 700 mm ampliação da resolução espacial de 03 vezes 12 kVp 40 μ A e 40 minutos de integração, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.

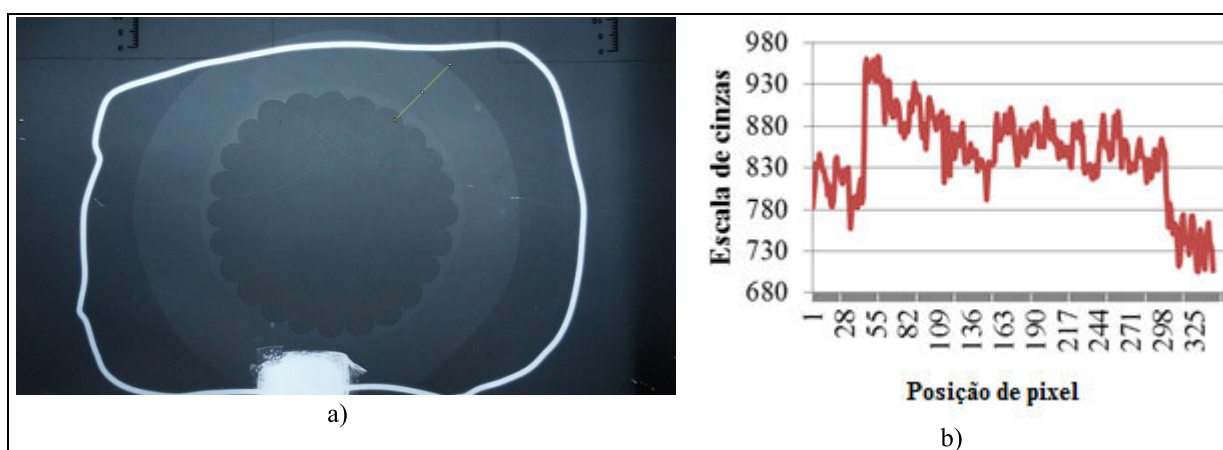


Figura 138 - Filme em distância de 700 mm ampliação da resolução espacial de 03 vezes 12 kVp 40 μ A e 50 minutos de integração, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.

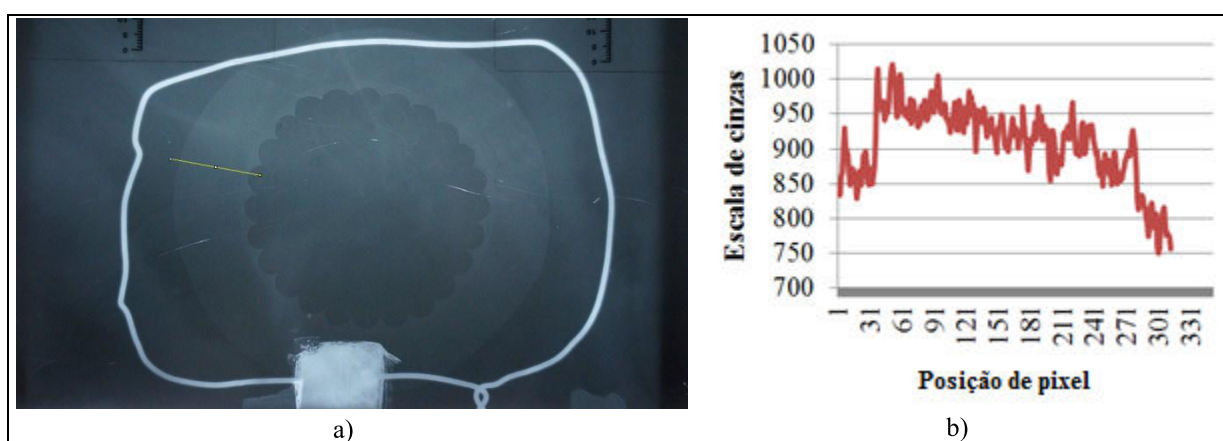


Figura 139 - Filme em distância de 700 mm ampliação da resolução espacial de 03 vezes 12 kVp 30 μ A e 01 hora de integração, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.

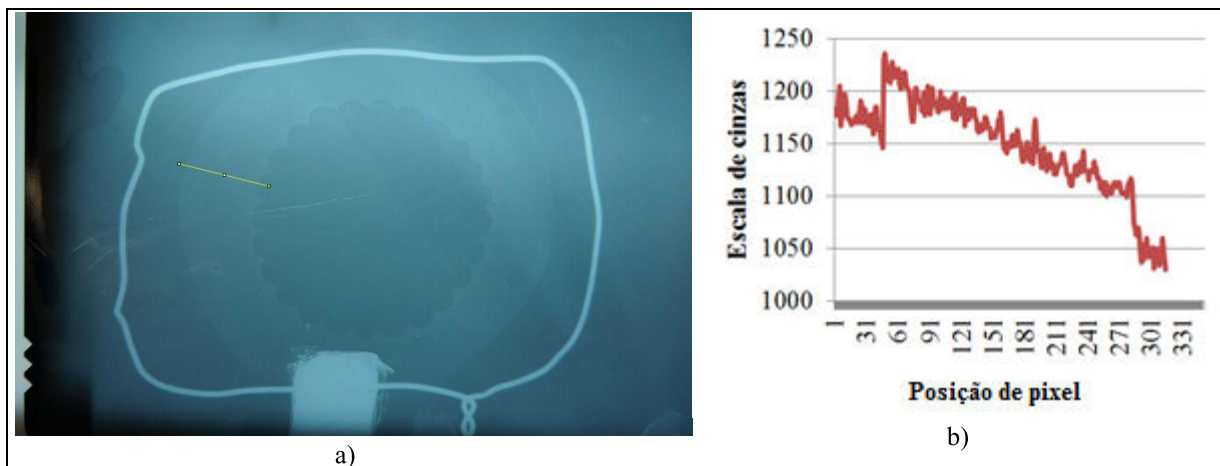


Figura 140 - Filme em distância de 700 mm ampliação da resolução espacial de 03 vezes 12 kVp 10 μ A e 01 hora de integração, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.

A Figura 141 (a) mostra o filme radiográfico com contraste de fase de raios X, que foi feito utilizando uma energia de 40 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 5 minutos, uma distância entre fonte e detector de 1000 mm e uma ampliação da resolução espacial de 5 vezes. A amostra analisada possui quatro furos paralelos ao furo com a ruptura principal, sendo eles de 0,3 mm, 0,5 mm, 0,7 mm e 0,8 mm consecutivamente. Tanto no gráfico ilustrado na Figura 141 (b), como no filme radiográfico ilustrado na Figura 141 (a), pode se perceber os efeitos de contraste de fase de raios X na amostra.

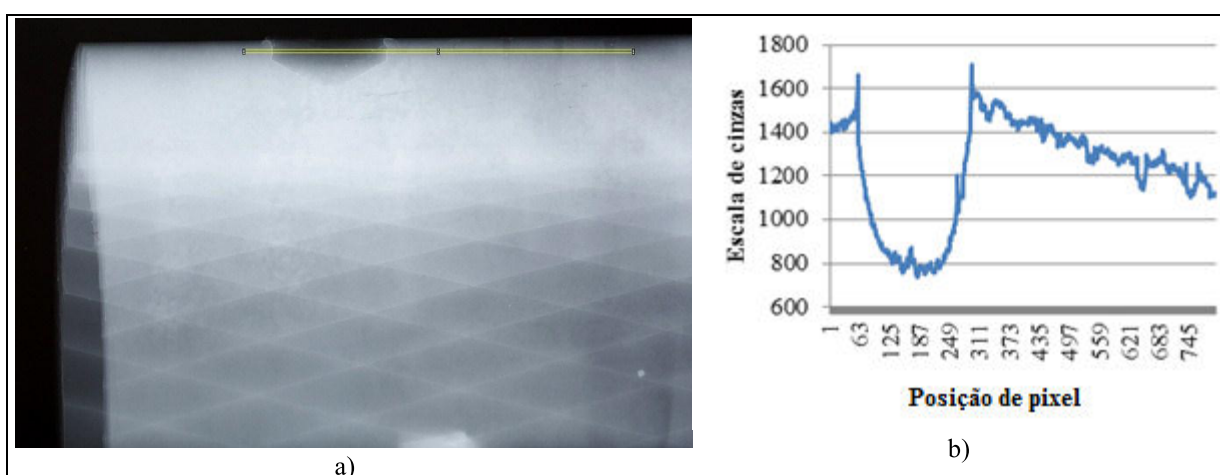


Figura 141 - Filme radiográfico de cabo isolado com XLPE, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.

A Figura 141 (a) mostra o filme radiográfico com contraste de fase de raios X, que foi feito utilizando uma energia de 12 kVp com corrente de 20 μ A, um tempo de integração de 04

horas, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de 40 vezes.

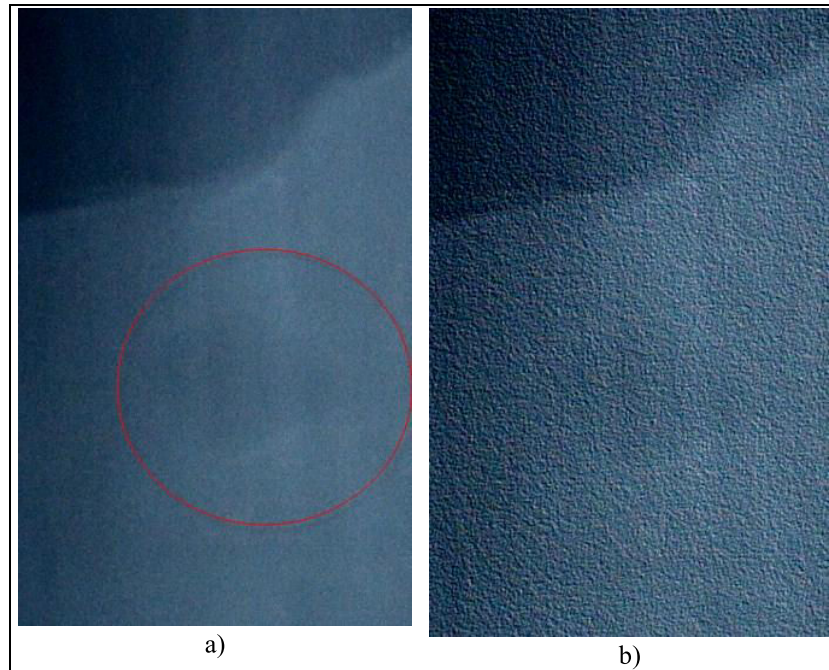


Figura 142 - Filme radiográfico de filme do cabo isolado com XLPE da amostra 05 (d), a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.

4.3.3.2 AVALIAÇÃO DO CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X EM AMOSTRAS DE CABO ISOLADO EM EPR UTILIZANDO FILMES RADIOGRÁFICOS

Avaliações do contraste de fase de raios X utilizando filmes radiográficos, também foram realizadas em amostras de cabo isolado em EPR, buscando demonstrar sua eficiência frente à técnica.

A imagem radiográfica com contraste de fase de raios X da amostra 07 ilustrada na Figura 143 (a), foi feita utilizando uma energia de 30 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 10 minutos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de aproximadamente 10 vezes.

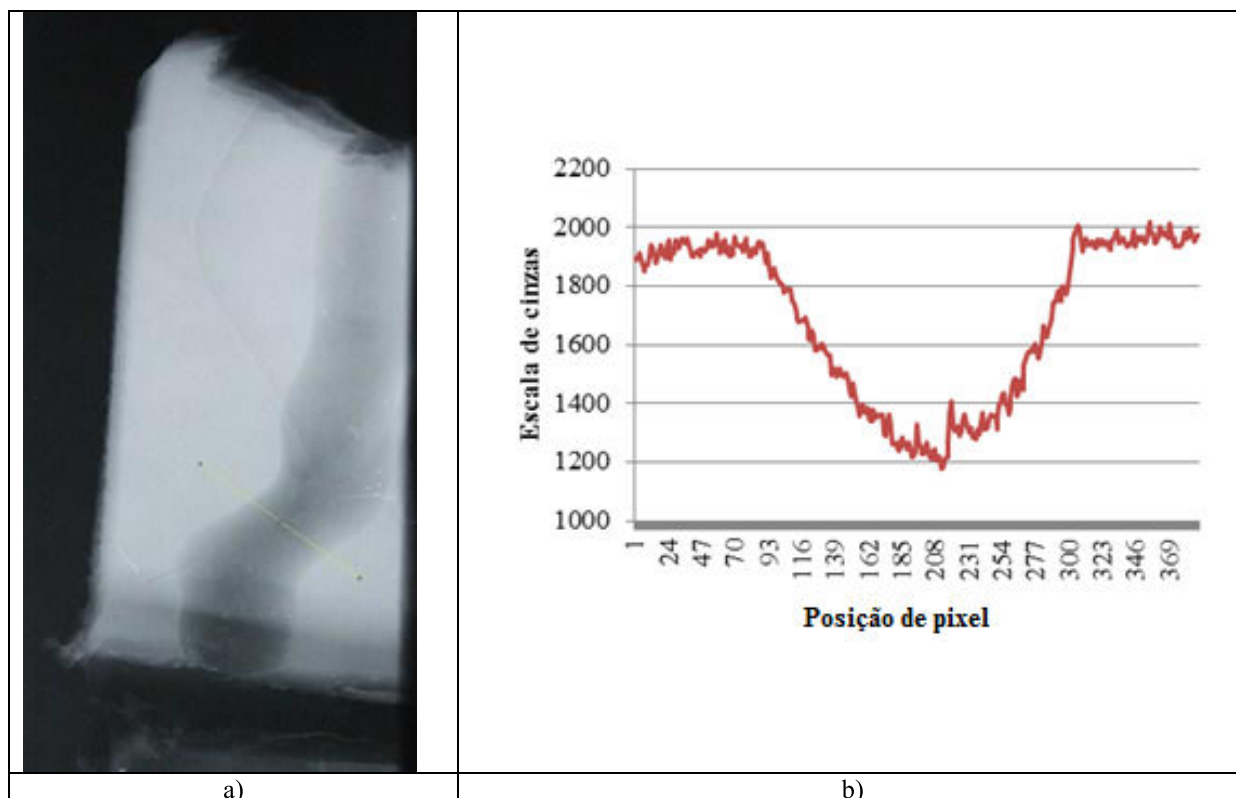


Figura 143 - Filme radiográfico de cabo isolado com EPR, a) filme radiográfico, b) análise de uma região da amostra no filme.

A imagem radiográfica com contraste de fase de raios X da amostra 07 ilustrada na Figura 144 (a), foi feita utilizando uma energia de 30 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 10 minutos, uma distância entre fonte e detector de 1200 mm e uma ampliação da resolução espacial de aproximadamente 10 vezes. Para melhor visualização da região de ruptura e os efeitos de contraste de fase de raios X foi aplicado o filtro de detecção e bordas como ilustra a Figura 144 (b)

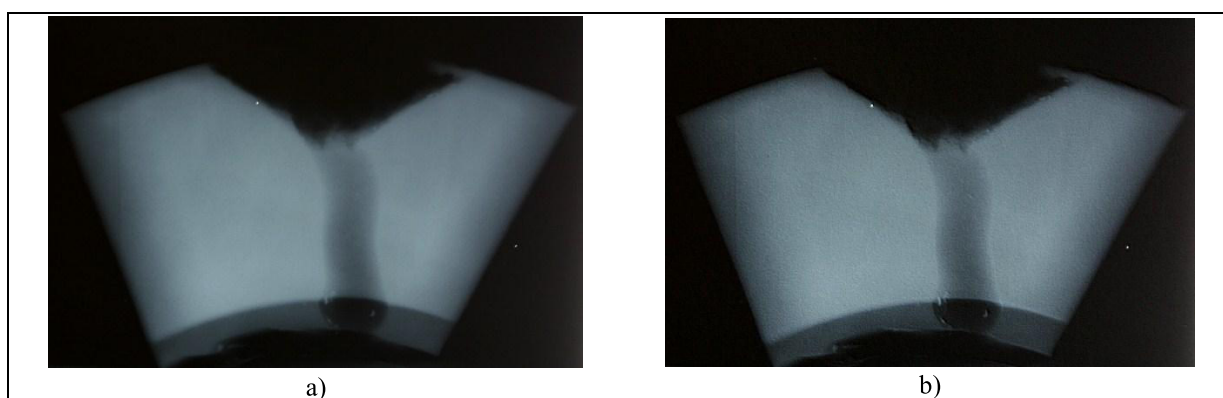


Figura 144 - Filme radiográfico de cabo isolado com EPR, a) filme radiográfico, b) com filtro de detecção de bordas.

4.3.3.3 AVALIAÇÃO DO CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X EM AMOSTRAS DE LENÇÓIS DE BORRACHA NATURAL EPR UTILIZANDO FILMES RADIOGRÁFICOS

Avaliações do contraste de fase de raios X utilizando filmes radiográficos, também foram realizadas em amostras de lençóis de borracha natural EPR, buscando demonstrar sua eficiência frente à técnica.

A imagem radiográfica com contraste de fase de raios X em amostra de lençol de borracha natural EPR ilustrada na Figura 145 (a), foi feita utilizando uma energia de 20 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 30 minutos, uma distância entre fonte e detector de 1000 mm e uma ampliação da resolução espacial de aproximadamente 10 vezes. É possível notar nas Figura 145 que ocorreu uma má revelação do filme, provavelmente provocado por não ter agitado o filme no revelador o suficiente durante a revelação.



Figura 145 - Filme radiográfico de amostra de lençol de borracha natural EPR com energia de 20 kVp, a) filme radiográfico, b) com filtro de detecção de bordas.

A imagem radiográfica com contraste de fase de raios X em amostra de lençol de borracha natural EPR ilustrada na Figura 146 (a), foi feita utilizando uma energia de 28 kVp com corrente de 100 μ A, um tempo de integração de 20 minutos, uma distância entre fonte e detector de 1000 mm e uma ampliação da resolução espacial de aproximadamente 10 vezes. Também é possível notar na Figura 146 que ocorreu uma má revelação do filme, provavelmente provocado por não ter agitado o filme no revelador o suficiente durante a revelação.

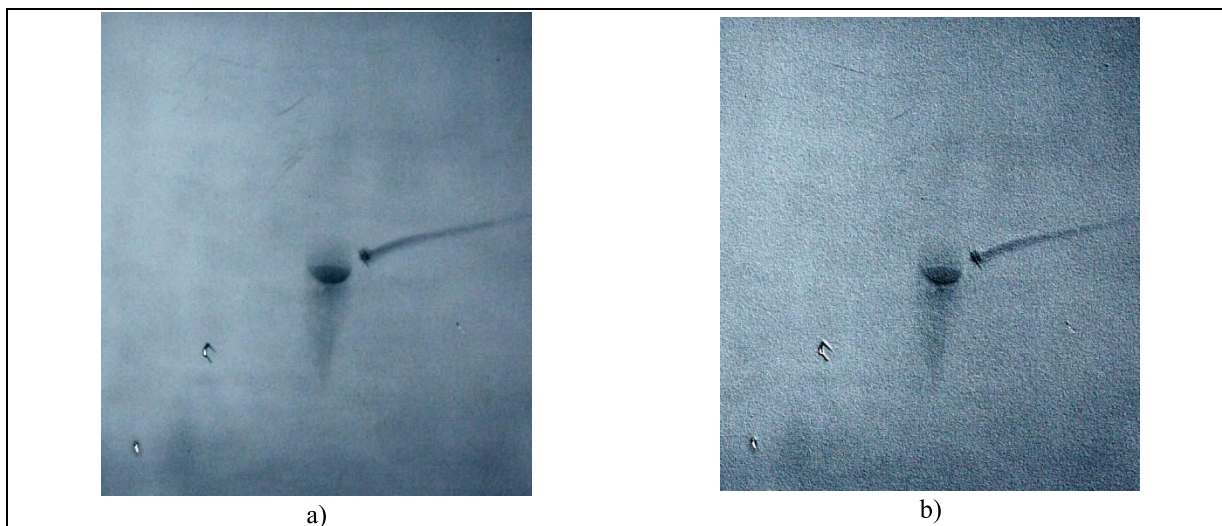


Figura 146 - Filme radiográfico de amostra de lençol de borracha natural EPR com energia de 28 kVp, a) filme radiográfico, b) com filtro de detecção de bordas.

4.3.4 AVALIAÇÃO DE ARBORESCÊNCIA POR CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X DETECTOR TECNOLOGIA DE CCD'S

Para avaliar o contraste de fase de raios X no detector de raios X da Princeton Instruments, foi utilizado o gerador de raios X microfoco de 70 kVp, feito as comparações das radiografias por contraste de fase de raios X com diferentes distâncias, tensões e em diferentes amostras e padrões.

4.3.4.1 AVALIAÇÃO DO CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X EM AMOSTRA PADRÃO COM DETECTOR TECNOLOGIA DE CCD'S

Foram adquiridos dois pedaços de colunas de capilares do fabricante Ohio Valley, com características semelhantes da isolamento das amostras, esses capilares possuem um dimensional de 0,25 mm e 0,35 mm respectivamente.

Inicialmente foi feitas a aquisição da imagem radiográfica com variação da ampliação da resolução espacial, utilizando uma energia de 8 kVp com 100 μ A com tempo de integração de 60 s, com distância entre o detector e a gerador de raios X de 400 mm como ilustra a Figura 147.

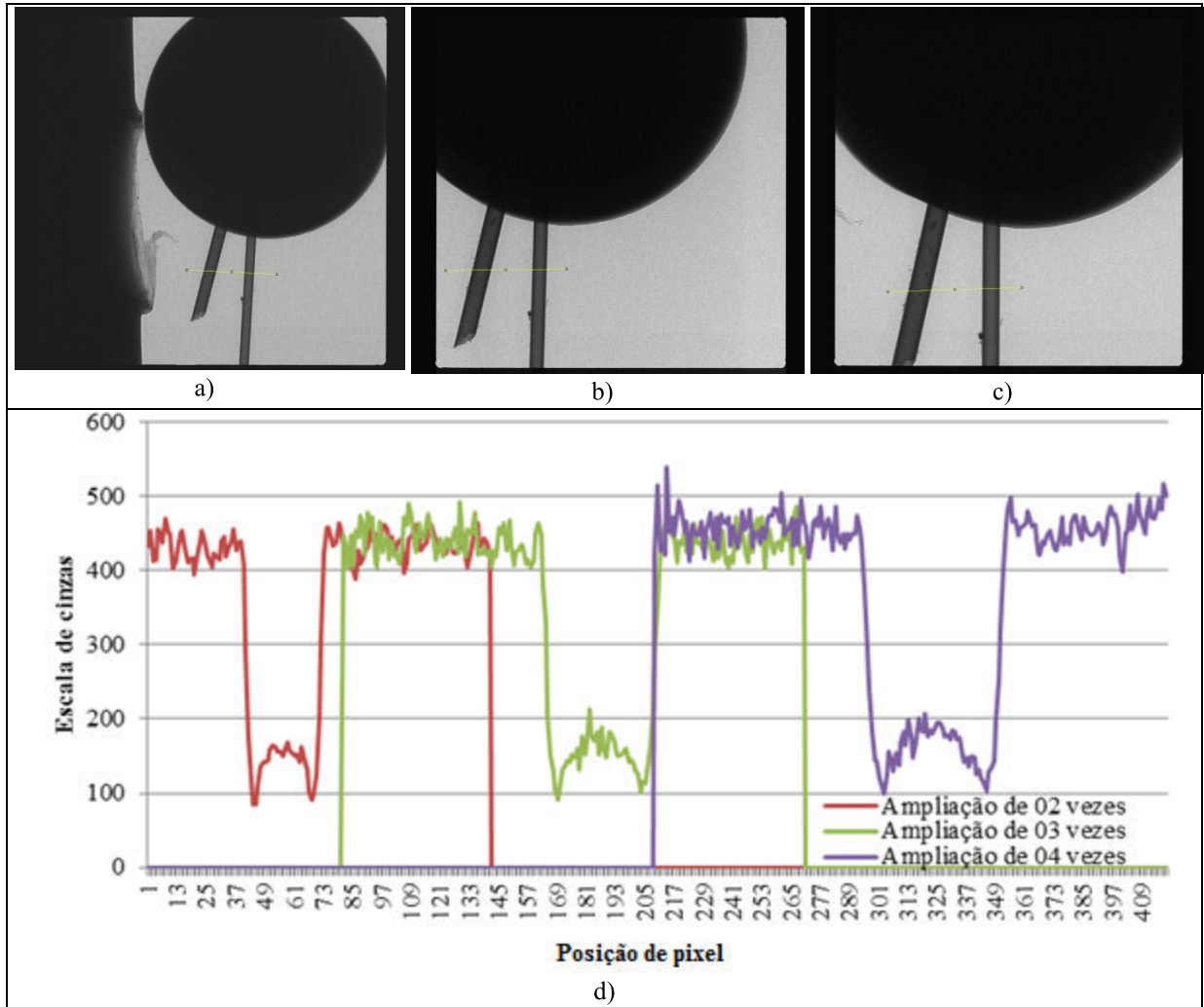


Figura 147 - Radiografia da amostra padrão, a) com ampliação de 02 vezes, b) com ampliação de 03 vezes, c) com ampliação de 04 vezes, d) regiões selecionadas para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X da amostra de 0,25 mm.

A Figura 148 ilustra a imagem radiográfica com variação da ampliação da resolução espacial, utilizando uma energia de 10 kVp com 100 μ A com tempo de integração de 120 s, com distância entre o detector e a gerador de raios X de 600 mm.

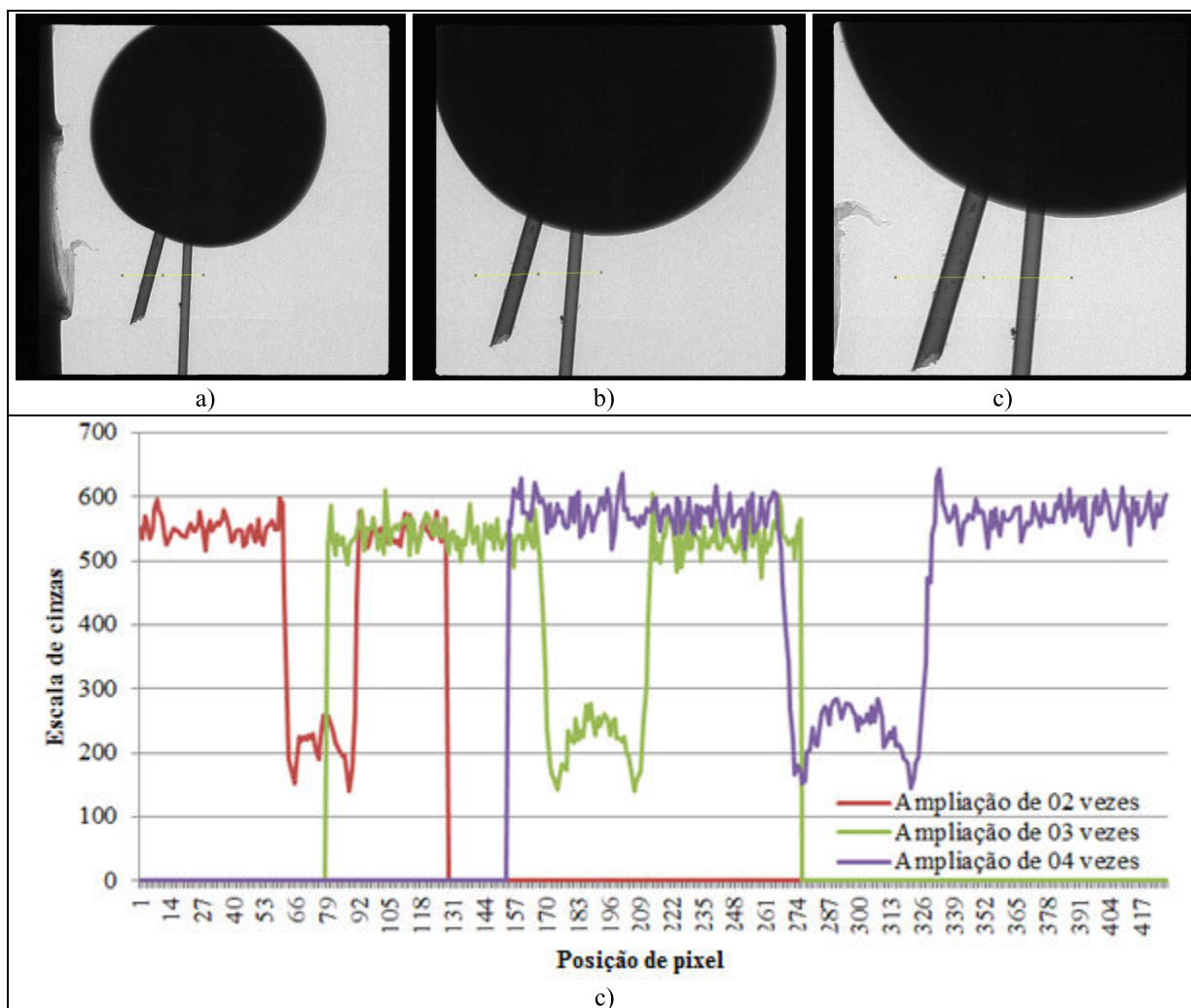


Figura 148 - Radiografia da amostra padrão, a) com ampliação de 02 vezes, b) com ampliação de 03 vezes, c) com ampliação de 04 vezes, d) regiões selecionadas para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X da amostra de 0,25 mm.

A Figura 149 ilustra a imagem radiográfica com variação da ampliação da resolução espacial, utilizando uma energia de 10 kVp com 100 μ A com tempo de integração de 120 s, com distância entre o detector e a gerador de raios X de 800 mm.

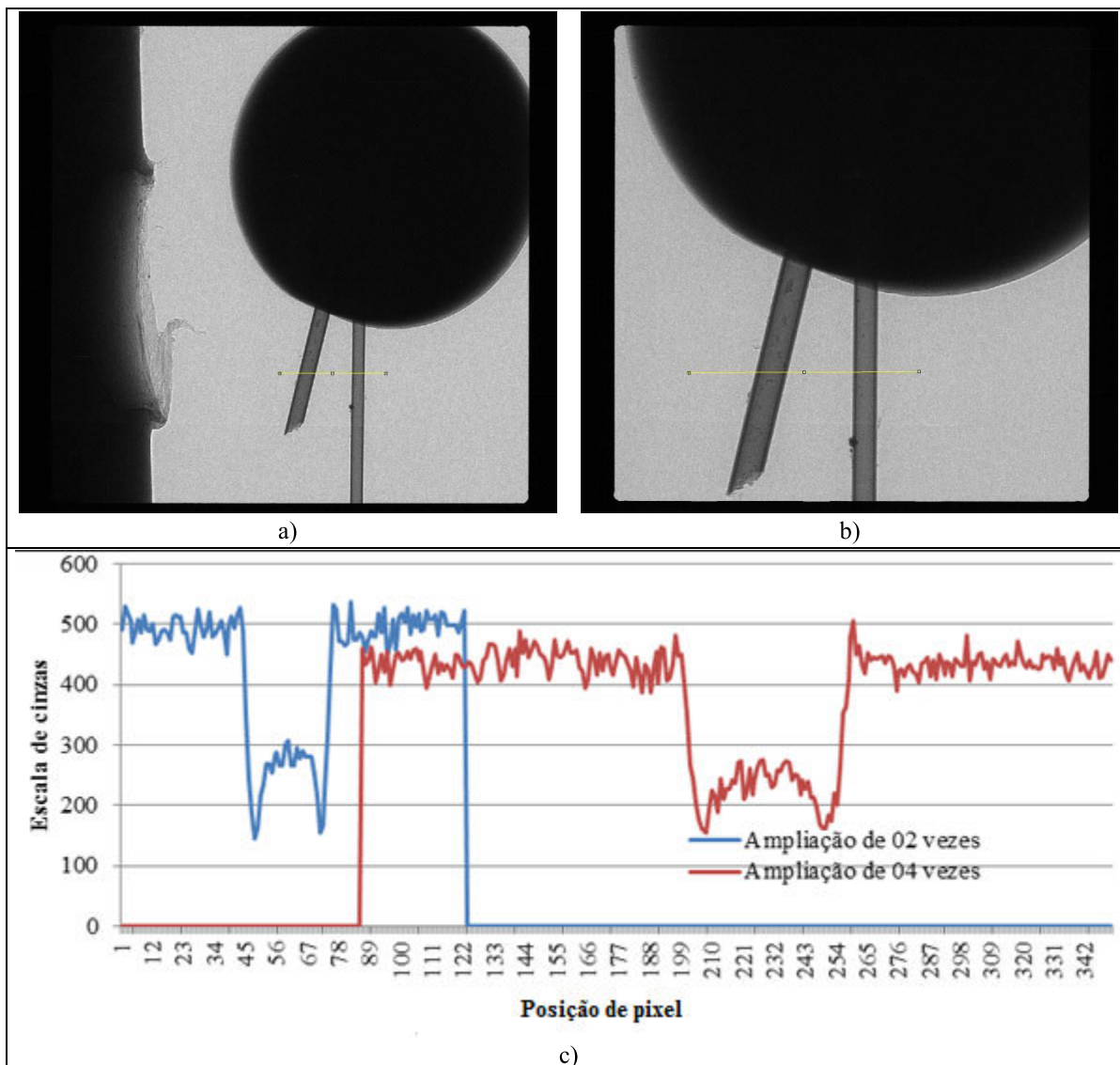


Figura 149 - Radiografia de amostra padrão, a) com ampliação de 02 vezes, b) com ampliação de 04 vezes, c) regiões selecionadas para análise dos efeitos do contraste de fase de raios X.

O gráfico ilustrado na Figura 150 mostra a comparação das imagens da Figura 147 (c), Figura 148 (c) e Figura 149 (b), as quais possuem a mesma ampliação da resolução espacial com diferentes distancias entre o detector e o gerador de raios X. No gráfico da Figura 150 ilustra o fortalecimento do efeito de contraste de fase de raio X ao aumentar a distância entre a fonte e o detector de raios X.

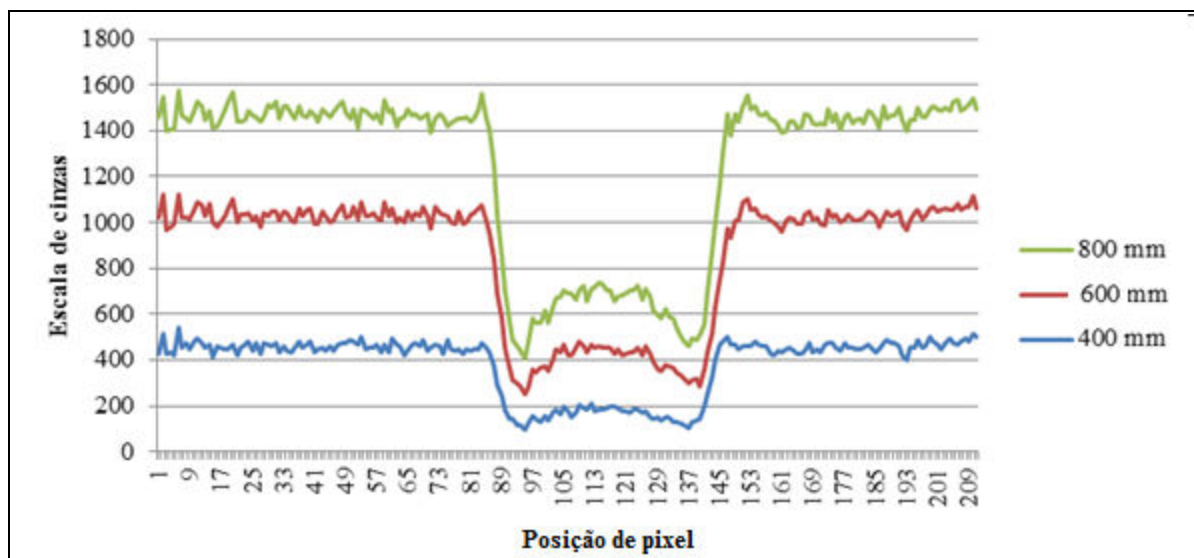


Figura 150 - Gráfico da comparação das distâncias do detector e o gerador de raios X na amostra padrão de 0,25 mm.

Após estas avaliações foram feitas aquisição de imagens radiográficas com variação do tempo de integração. As radiografias foram adquiridas com corrente de 100 μA e distância entre o detector e o gerador de raios X de 800 mm como ilustra a Figura 151.

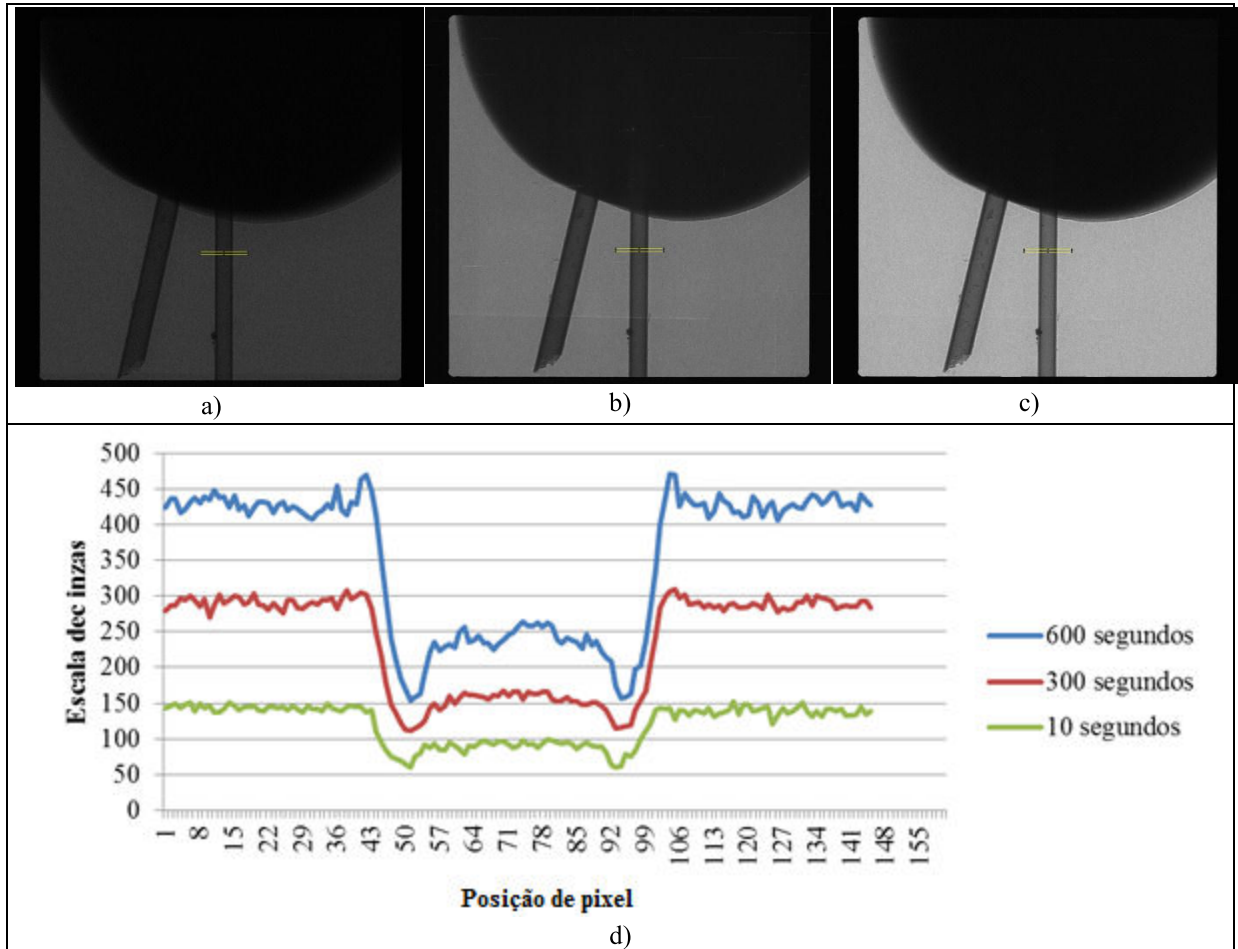


Figura 151 - Radiografia da amostra padrão de coluna capilar de 0,25 mm, a) com tempo de integração de 10 s energia de 12,5 kVp, b) com tempo de integração de 300 s energia de 8 kVp, c) com tempo de integração de 600 s energia de 7 kVp, d) gráfico da comparação do tempo de integração.

4.3.4.2 AVALIAÇÃO DO CONTRASTE DE FASE DE RAIOS X EM AMOSTRA DE CABO ISOLADO EM XLPE COM DETECTOR DE TECNOLOGIA DE CCD'S

Inicialmente nas avaliações do contraste de fase de raios X em amostra de filmes microtomadas de cabo isolado em XLPE, foi feita a aquisição de imagem radiográfica com variação da ampliação da resolução espacial, utilizando uma média de 03 imagens radiográficas com energia de 8 kVp com 100 μ A com tempo de integração de 300 s, com distância entre o detector e a gerador de raios X de 800 mm como ilustra a Figura 152.

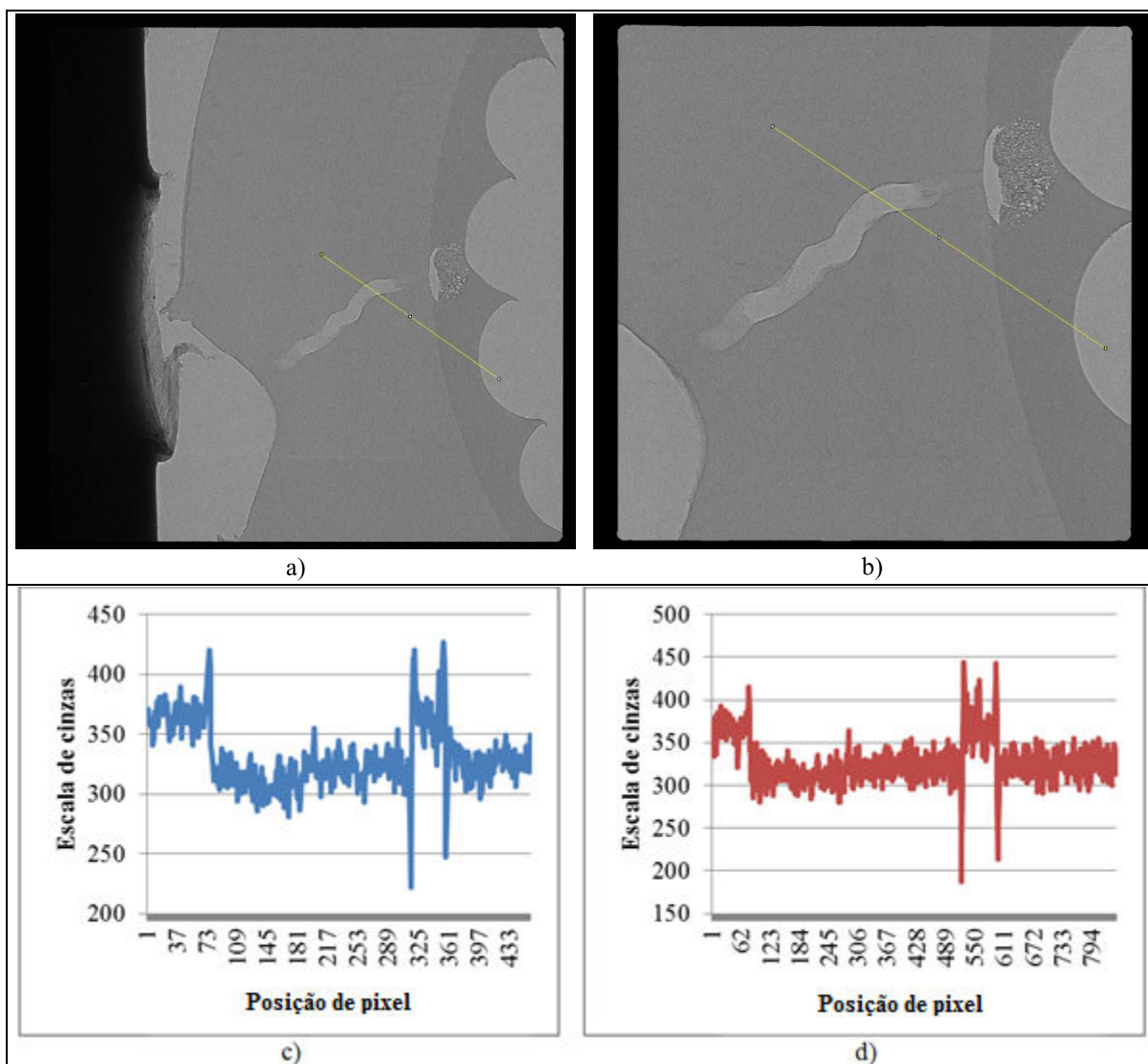


Figura 152 - Radiografia de amostra de cabo isolado em XLPE, a) com ampliação de 02 vezes, b) com ampliação de 04 vezes, c) gráfico da área selecionada da imagem com ampliação de 02 vezes, d) gráfico da área selecionada da imagem com ampliação de 04 vezes.

A Figura 153 ilustra a imagem radiográfica com variação da ampliação da resolução espacial, utilizando uma média de 03 imagens radiográficas com energia de 8 kVp com 100 μ A com tempo de integração de 60 s, com distância entre o detector e a gerador de raios X de 400 mm.

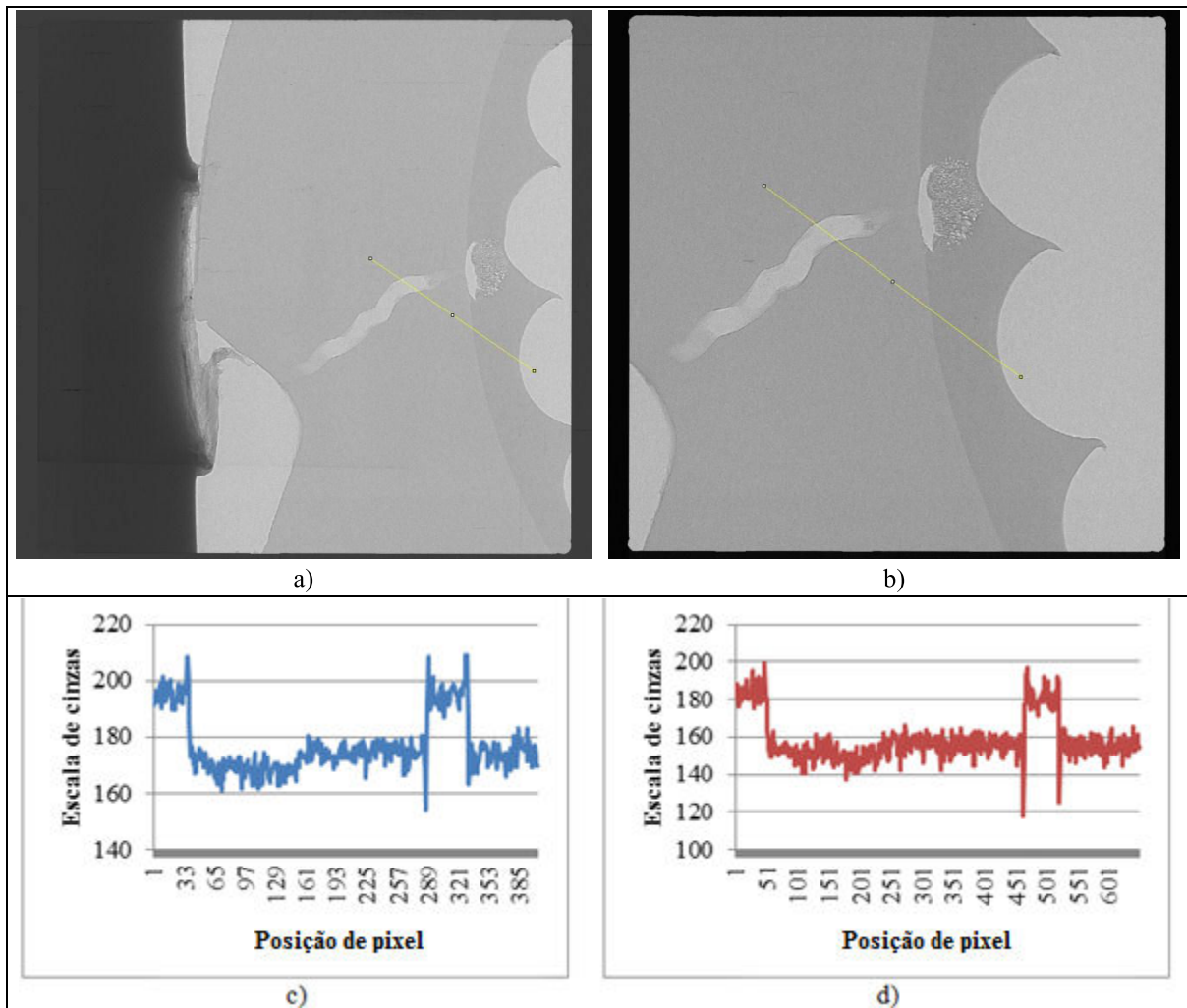


Figura 153 - Radiografia de amostra de cabo isolado em XLPE, a) com ampliação de 02 vezes, b) com ampliação de 03 vezes, c) gráfico da área selecionada da imagem com ampliação de 02 vezes, d) gráfico da área selecionada da imagem com ampliação de 03 vezes.

Após estas avaliações foi gerada uma imagem de raios X com contraste de fase com um falso positivo, devido à sujeira impregnada na superfície da amostra. A Figura 153 (a) ilustra a imagem radiográfica adquirida, utilizando uma média de 06 imagens radiográficas com energia de 8 kVp com 100 μ A com tempo de integração de 300 s, com distância entre o detector e a gerador de raios X de 800 mm e amplificação de 3 vezes, e a Figura 153 (a) ilustra o local ampliado da imagem com o falso positivo indicado.

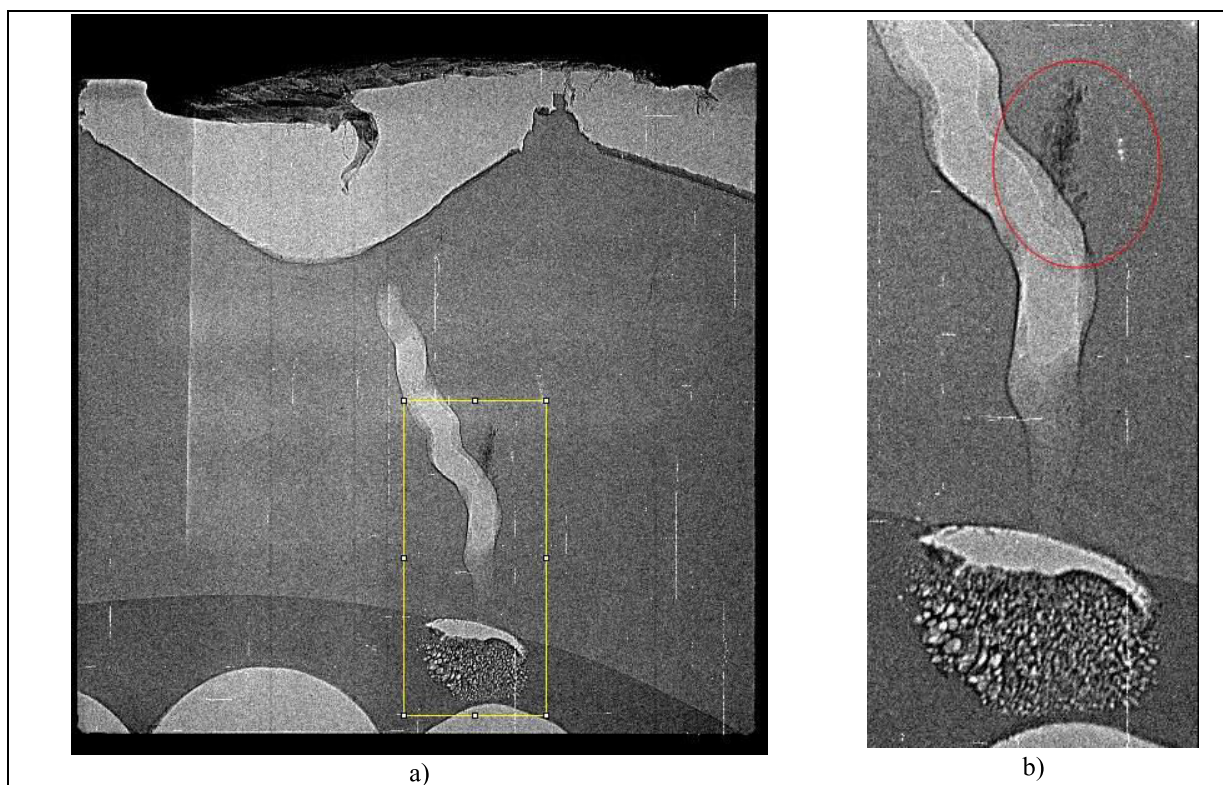


Figura 154 - Radiografias de cabo isolado com XLPE com falso positivo, a) Imagem radiográfica, b) local ampliado da imagem com o falso positivo indicado.

Para verificar este falso positivo indicado na Figura 154, foi gerada uma imagem radiográfica ilustrada na Figura 155 (a), utilizando uma média de 07 imagens radiográficas com energia de 8 kVp com 100 μ A com tempo de integração de 300 s, com distância entre o detector e a gerador de raios X de 800 mm e amplificação de 3 vezes, a na Figura 155 (b) ilustra a ampliação da imagem radiográfica demonstrando uma possível arborescência elétrica visível através da técnica de contraste de fase de raios X (em vermelho) e uma arborescência elétrica visível (em verde).

Na Figura 156(a) ilustra a comparação entre a imagem adquirida utilizando a técnica de contraste de fase de raios X, e a Figura 156(b) ilustra a sequencia de 03 imagens adquiridas por microscopia ótica.

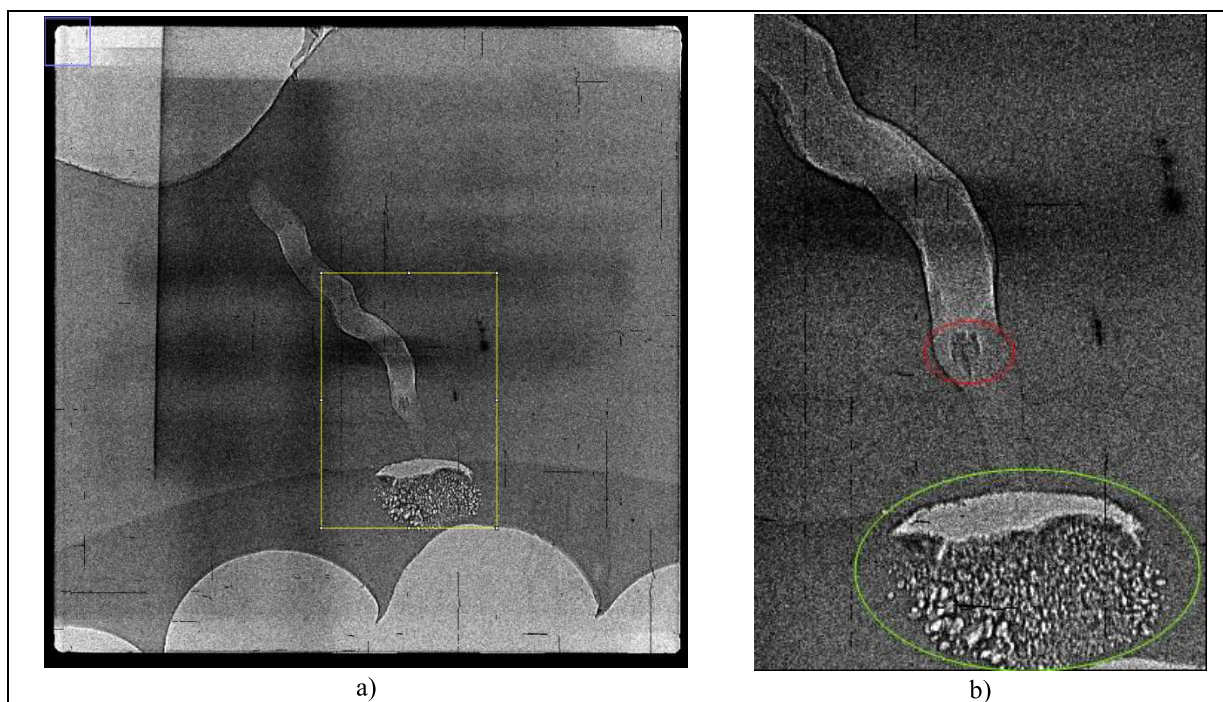


Figura 155 – Radiografias de cabo isolado com XLPE, a) imagem radiográfica, b) local ampliado da imagem.

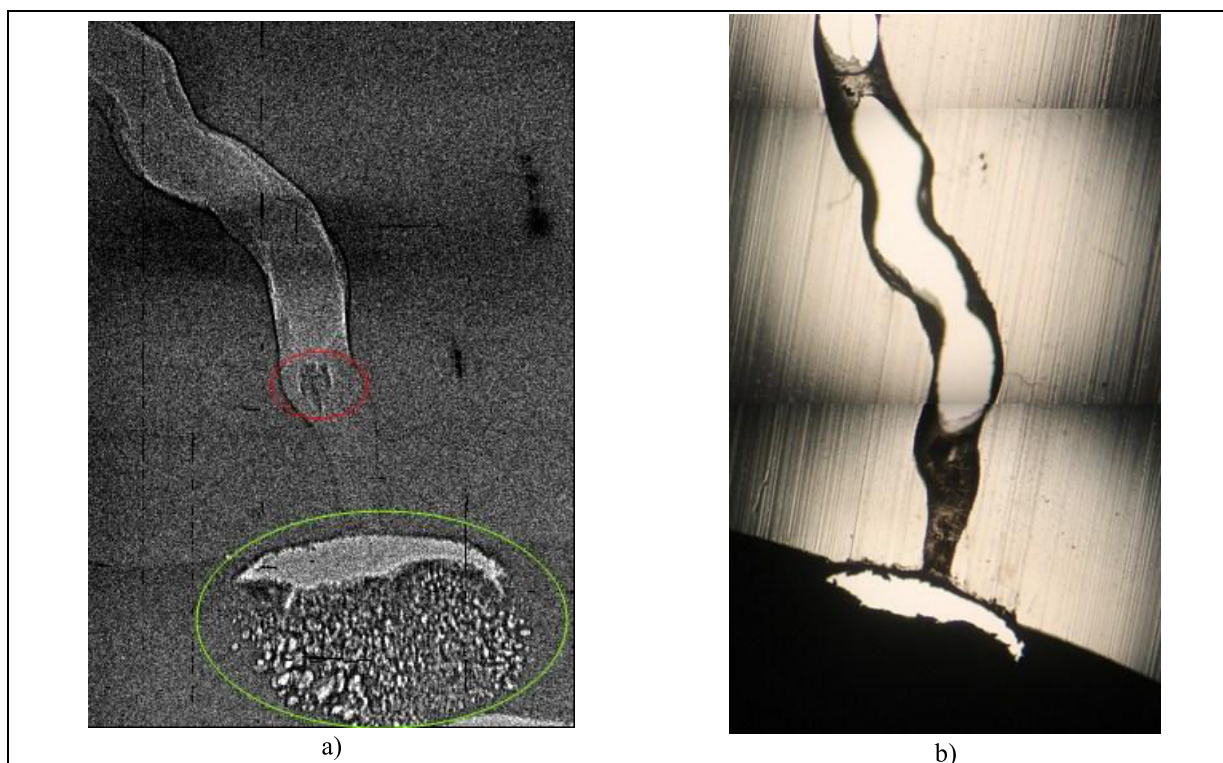


Figura 156 – Imagens da região da ruptura dielétrica de cabo isolado com XLPE, a) radiografia do local ampliado da imagem, b) sequencia de 03 imagens adquiridas por microscopia ótica.

Após estas verificações foi feita a avaliação na amostra 05 (d) ilustrada na Figura (d), nesta avaliação foi utilizada uma média de 10 imagens radiográficas com energia de 12,5 kVp

com 100 μ A com tempo de integração de 60 s, com distância entre o detector e a gerador de raios X de 800 mm e amplificação de 3 vezes, na Figura 157 (b) ilustra a ampliação da imagem radiográfica demonstrando a arborescência elétrica visível através da técnica de contraste de fase de raios X, a Figura 158 ilustra a imagem com equalização do histograma evidenciando as regiões de arborescência elétrica.

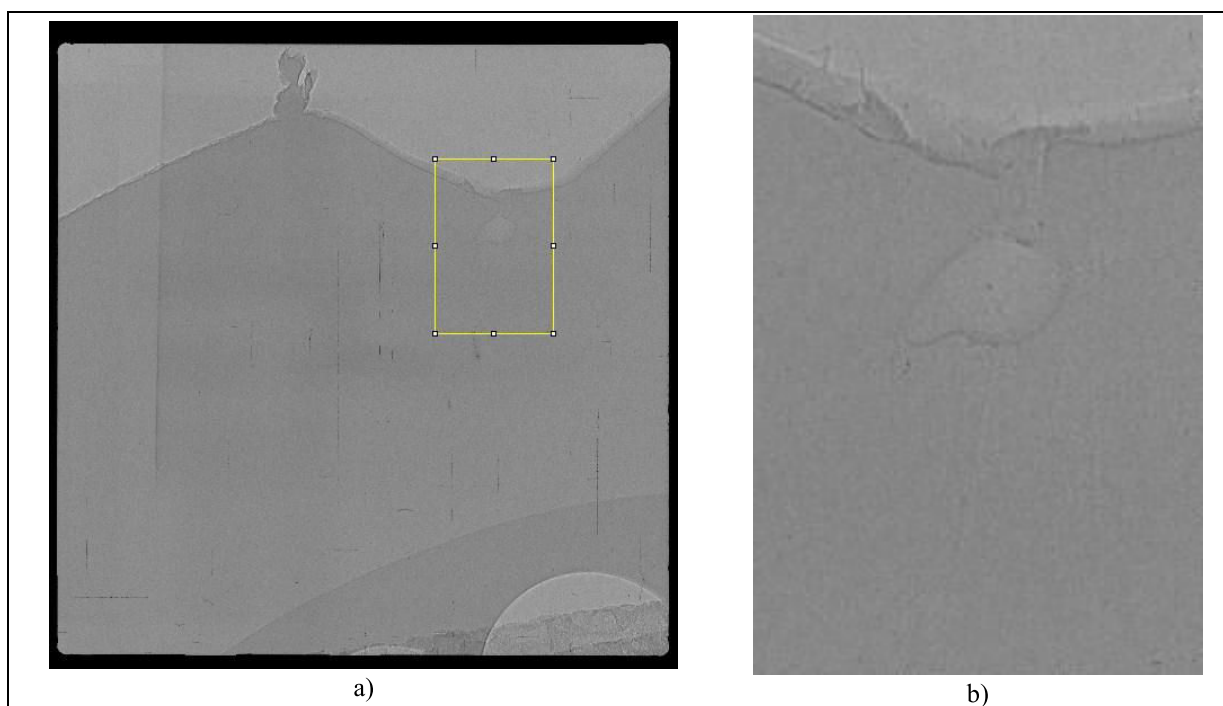


Figura 157 - Radiografias de cabo isolado com XLPE na amostra 05, a) filme radiográfico, b) local ampliado da imagem.

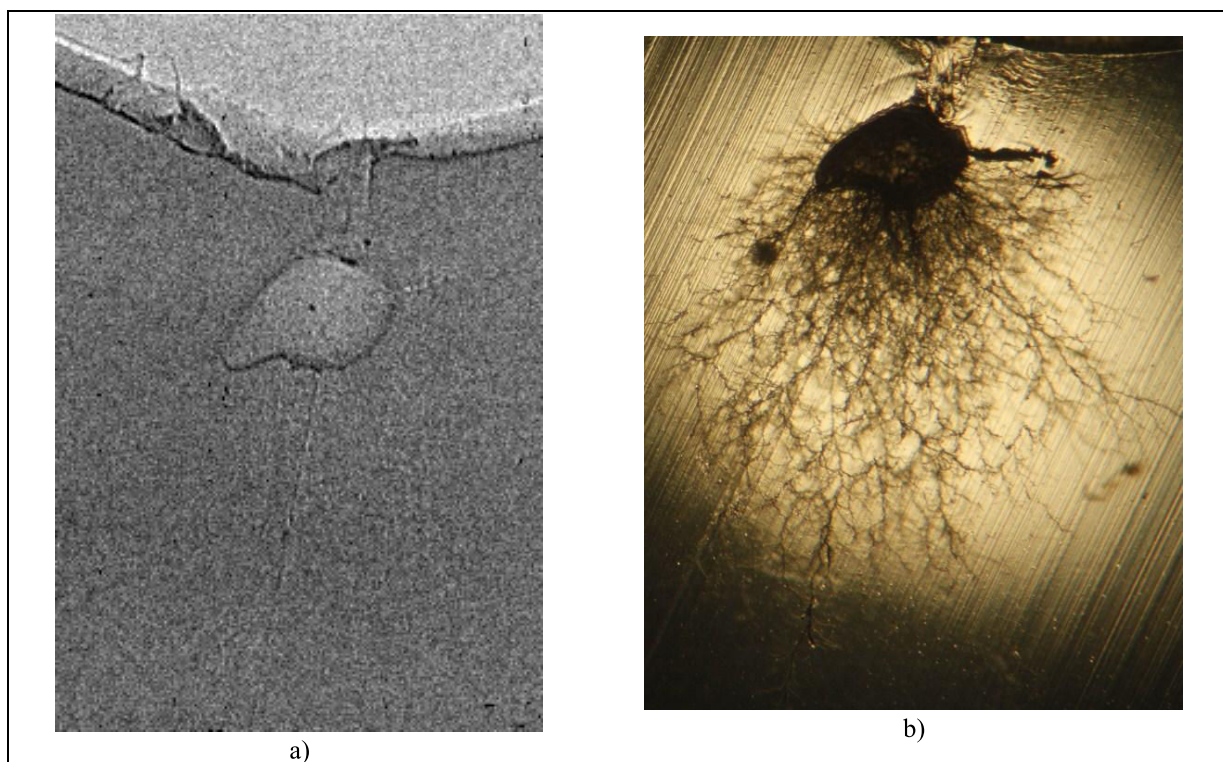


Figura 158 - Radiografias de cabo isolado com XLPE na amostra 05, a) local ampliado da imagem com equalização do histograma, b) amostra 05 segunda fatia.

Também foi feita uma avaliação utilizando uma média de 08 imagens radiográficas com energia de 12,5 kVp com 100 μ A com tempo de integração de 60 s, com distância entre o detector e a gerador de raios X de 800 mm e amplificação de 4 vezes ilustrada na Figura 159 (a), na Figura 159 (b) ilustra a ampliação da imagem radiográfica demonstrando a arborescência elétrica visível através da técnica de contraste de fase de raios X (em vermelho), a Figura 160 (a) ilustra a imagem com equalização do histograma evidenciando as regiões de arborescência elétrica e a Figura 160 (a) ilustra a imagem com equalização do histograma e inversão da escala de cinza para melhor evidenciar as regiões de arborescências elétricas.

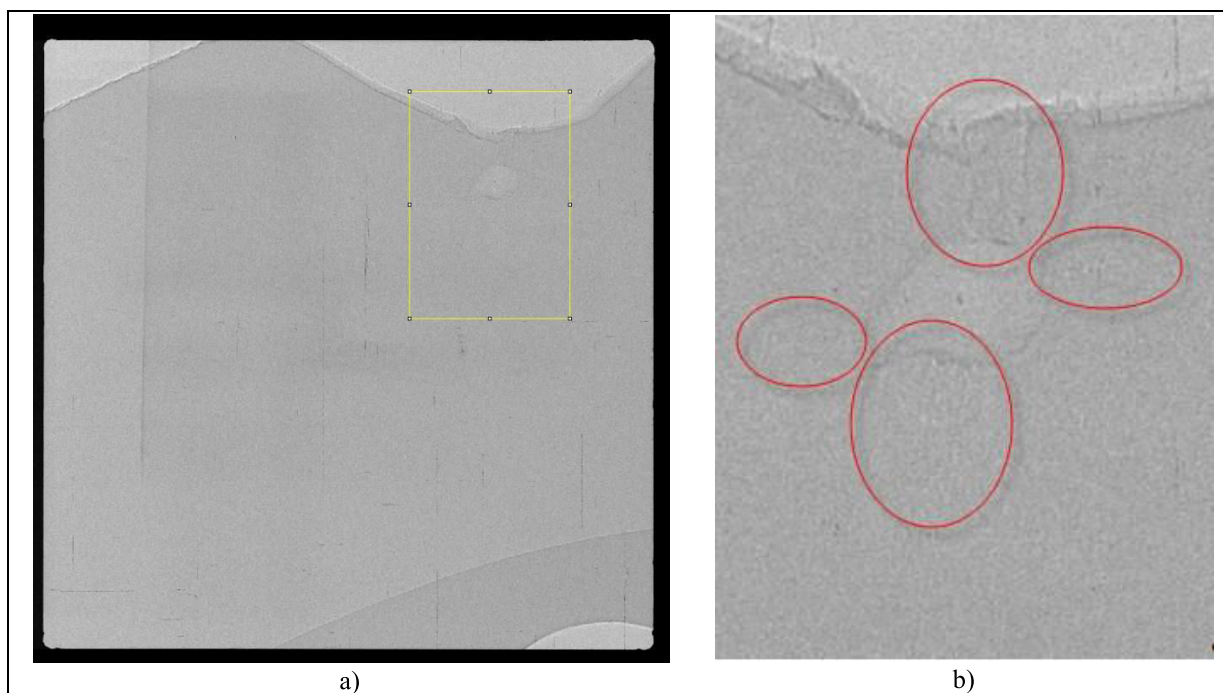


Figura 159 - Radiografias de cabo isolado com XLPE na amostra 05, a) filme radiográfico, b) local ampliado da imagem.

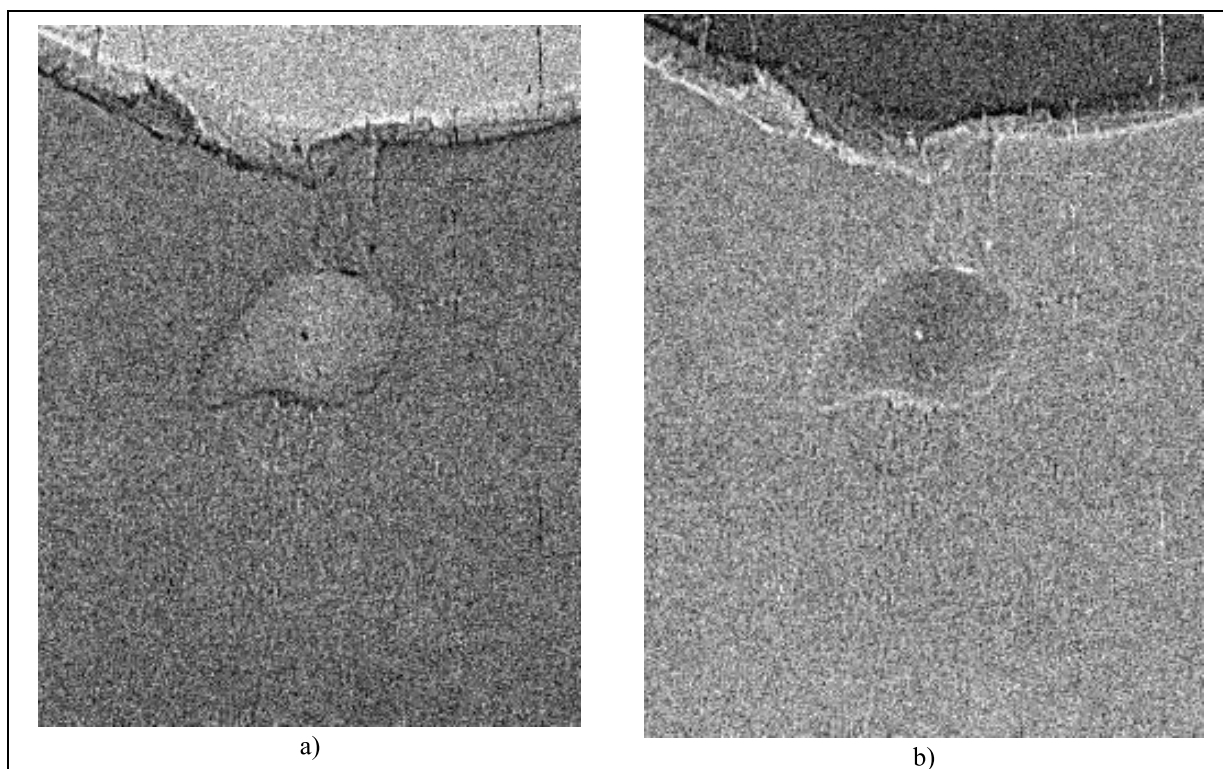


Figura 160 - Radiografias de cabo isolado com XLPE na amostra 05, a) local ampliado da imagem com equalização do histograma, b) amostra 05 segunda fatia.

CAPÍTULO – 5

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com a avaliação por microscopia óptica nas amostras do cabo isolado em XLPE no ensaio de ruptura dielétrica por tensão aplicada em degraus escalonados, foram encontradas arborescências elétricas e em água de várias dimensões. Foi possível correlacionar os valores de ruptura dielétrica do ensaio de tensão aplicada em degraus escalonados, produzindo o gráfico da Figura 57 do item 4.2.1, onde pode ser observada a variação da tensão de ruptura dielétrica influenciada pelo tamanho das arborescências em água. Ao incluir uma linha de tendência, verificou-se que as espessuras remanescentes das amostras de cabo isolado em XLPE envelhecidos em campo, estão correlacionadas a ruptura dielétrica obtida pelo cabo isolado em XLPE novo, podendo ser possível prever a vida útil de cabos isolados em XLPE na relação entre a espessura remanescente da arborescência e a tensão de rigidez dielétrica. No entanto, para o caso mostrado no gráfico da Figura 57 do item 4.2.1 o erro estatístico é muito elevado, sendo necessária uma estatística de correlação de arborescências com a ruptura dielétrica mais aprimorada, tanto com relação à quantidade maior de amostras com tempos variados de envelhecimento e a melhora na análise de arborescências.

Com a avaliação das amostras de cabos isolados em XLPE e EPR, e em lençóis de borracha natural EPR no ensaio de rigidez dielétrica, foi possível criar artificialmente amostras com arborescências elétricas para validação da metodologia, utilizando a técnica de contraste de fase de raios X ilustradas item 4.2.2.

Para avaliação das amostras de cabo isolado em XLPE, EPR e em lençóis de borracha natural pela técnica de aquisição de imagem com contraste de fase de raios X, foram feitas avaliações utilizando dois geradores de raios X e quatro sistemas de aquisição de radiografias de raios X, onde foram feitos os cálculos de coerência espacial com os dados dos geradores de raios X utilizados, os cálculos de ampliação da resolução espacial e o cálculo da penumbra geométrica.

Ao comparar as imagens geradas utilizando os geradores de raios X milifoco MXR-225HP/11 desenvolvido pela empresa COMET, de 225 kVp com foco de tamanho de 0,4 e

1,0 mm e o gerador microfoco fabricante Keveex, de 70 kVp com foco de tamanho de $10\mu \times 10\mu \text{ m}^2$, o gerador de raios X microfoco demonstrou resultados muito superiores devido ao tamanho do foco do gerador, como ilustra a Figura 132 item 4.3.2.5. Para utilizar o gerador de raios X milifoco na técnica de contraste de fase de raios X, deve ser montado um sistema onde o gerador de raios X esteja disposto a uma distância do detector que produza um feixe de raio X coerente, intensificando os efeitos de contraste de fase por raios X e diminuindo a distorção da penumbra geométrica.

Com relação aos detectores de raios X avaliados, as melhores características do detector com tecnologia CMOS avaliado frente à técnica de contraste de fase de raios X foi o tamanho do pixel de $50 \mu\text{m}$, que possibilitou a visualização dos efeitos de contraste de fase em objetos muito pequenos. Uma das dificuldades encontradas na utilização deste detector foi o tempo de integração. Após 40 segundos o nível de sinal ruído nas imagens adquiridas era muito elevado dificultando as avaliações desejadas (item 4.3.1).

Com relação à avaliação do contraste de fase de raios X alterando a tensão do gerador de raios X, pode se observar nos gráficos da Figura 70 e Figura 72 item 4.3.1.1, que ocorre uma melhora no efeito do contraste de fase de raios X, devido ao aumento da energia do feixe. Isso ocorre devido a gerador de raios X estar localizado muito longe do detector de raios X assim a uma quantidade maior de fótons estão sendo detectados, realçando o efeito de contraste de fase de raios X. Mas ao aumentar muito a energia começa a perder o realce do efeito do contraste de fase de raios X diminuindo o efeito de contraste de fase.

Analisando os gráficos mostrados da Figura 73 à Figura 78 item 4.3.1.2, foi possível visualizar as variações da penumbra geométrica provocados pelo contraste de fase por raios X em amostras de cabo com isolamento em EPR mudando a distancia entre o gerador de raios X e a Fonte. Verificou-se também que, com ampliação da resolução espacial de 03 vezes, as penumbras geométricas começam a ser ressaltadas a distância entre a fonte e o detector de 1000 mm, e para ampliação da resolução espacial de 05 vezes, as penumbras geométricas começam a ser ressaltada a distância entre fonte e o detector de 700 mm.

Analisando os gráficos mostrados da Figura 81 e Figura 83 item 4.3.1.2, foi possível visualizar as variações da penumbra geométrica provocadas pelo contraste de fase por raios X na amostra de tubo plástico. Verificou-se também que com ampliações geométricas de 03 vezes as penumbras geométricas começam a ser ressaltadas à distância entre a fonte e o detector de 1000 mm, e para ampliações geométricas de 05 vezes, as penumbras geométricas começam a ser ressaltadas à distância entre fonte e o detector de 500 mm.

Com relação à avaliação do contraste de fase de raios X em amostras de cabo isolado em XLPE impregnadas com contraste químico, para a metodologia convencional esta técnica é eficiente podendo ser observada as arborescências por meio do microscópio ótico. Mas para a técnica de contraste de fase de raios X, como pode ser observado na Figura 87 à Figura 93 item 4.3.1.4, ocorreu um aumento de contraste nas radiografias impregnadas com sulfato de cobre principalmente no material semiconductor, no entanto, mesmo com essa melhora ainda não foi possível localizar a arborescência.

Nas avaliações realizadas em amostras padrões foi possível visualizar em imagens radiográficas, defeitos superficialmente provocados artificialmente em amostras padrões utilizando a técnica de contraste de fase de raios X como ilustra a Figura 86 item 4.3.1.3. Também foi possível visualizar o caminho de ruptura dielétrica em amostras de cabo isolado em EPR (Figura 94 item 4.3.1.5) e em lençóis de borracha natural EPR (Figura 102 item 4.3.1.6), bem como possíveis regiões de arborescências elétricas em cabos isolados em EPR (Figura 96 item 4.3.1.5) e em lençóis de borracha natural EPR (Figura 103 item 4.3.1.6).

O detector com tecnologia de silício amorfo analisado apresentou resultados satisfatórios em relação à técnica aplicada, sendo uma das melhores características deste detector, além do controle de integração das imagens, a resolução em profundidade de 16 bits, que possibilita análises mais pontuais em certos níveis de cores. Uma das dificuldades de análise encontradas neste detector foi o tamanho do pixel de 200 μm , que dificultou na visualização de arborescências muito pequenas. Outra dificuldade, foi a sensibilidade muito elevada de 20 kVp (item 4.3.2).

Nas avaliações realizadas em amostras padrões, foi possível visualizar imagens radiográficas com efeitos de realce da imagem por contraste de fase de raios X. Os gráficos da Figura 105, Figura 107 e Figura 109 item 4.3.2.1, ilustram regiões selecionadas das imagens radiográficas de amostra padrão de tubo plástico e fibra ótica, com ampliação da resolução espacial de 03 vezes, 05 vezes e 10 vezes consecutivamente. Pode ser observado nestes gráficos, que com ampliação de 03 vezes ocorre pequenos efeitos de contraste de fase de raios X devido a ampliação da resolução espacial ser muito pequena, em relação ao tamanho do pixel do detector, mas para ampliação de 05 e 10 vezes os efeitos de contraste de fase são bem mais acentuados. No caso da ampliação de 10 vezes pode ser observado a ocorrência da distorção da imagem, devido ao ângulo de abertura do feixe de raios X ser muito pequeno, na ordem de 34 graus.

Nas avaliações realizadas em amostras padrões foi possível visualizar as imagens radiográficas realçadas pela técnica de contraste de fase de raios X, como ilustra a Figura 106

item 4.3.2.1. Também foi possível visualizar o caminho de ruptura dielétrica em amostras de cabo isolado em XLPE (Figura 115 item 4.3.2.2), EPR (Figura 116 item 4.3.2.3) e em lençóis de borracha natural EPR (Figura 126 item 4.3.2.4), bem como possíveis regiões de arborescências elétricas em cabos isolados em EPR (Figura 124 item 4.3.2.3) e em lençóis de borracha natural EPR (Figura 128 item 4.3.2.4).

A utilização de filmes mamográficos como detector de raios X foi muito importante para a validação da técnica. Uma das melhores características no uso destes filmes foi o tamanho da granulação em torno de 25 μm e o tempo de integração para a revelação do filme. Isso favoreceu a visualização de objetos com densidades muito semelhantes. A desvantagem encontrada foi o processo de revelação sendo feito manualmente e o tempo de queima dos filmes, que para a visualização das arborescências podem chegar a várias horas de integração (item 4.3.3).

Foi possível visualizar os efeitos de contraste de fase de raios X nas amostras de cabo isolado em XLPE (Figura 137 item 4.3.3.1) e EPR (Figura 143 item 4.3.3.2), bem como identificar regiões onde ocorreu a ruptura dielétrica em amostras de cabo EPR (Figura 144 item 4.3.3.2) e em lençóis de borracha natural EPR (Figura 145 item 4.3.3.3), e regiões de arborescências elétricas (Figura 142 item 4.3.3.1).

O detector com tecnologia de CCD's avaliado apresentou resultados satisfatórios em relação à técnica aplicada, sendo uma das melhores características deste detector o tempo de integração das imagens, que pode ser feita em tempos superiores de 01 hora. Outra característica interessante foi à resolução em profundidade de 16 bits, que possibilitou análises mais pontuais bem como o tamanho dos pixels na ordem de 22,5 x 22,5 μm^2 . Uma das desvantagens é que o detector trabalha somente com baixas energias na ordem máxima de 20 kVp (item 4.3.4).

Na Avaliação dos efeitos de contraste de fase de raios X em amostras padrão, pode ser observado na Figura 147 item 4.3.4.1, que para esta distância entre o detector e o gerador de raios X de 400 mm, a ocorrência dos efeitos de contraste de fase de raios X é muito pequena, quase que imperceptível, mesmo para uma ampliação da resolução espacial de 04 vezes como ilustra o gráfico na Figura 147 (d) item 4.3.4.1. Na Figura 148 item 4.3.4.1, pode ser observado que para esta distância de 600 mm entre o detector e o gerador de raios X, as ocorrências dos efeitos de contraste de fase começam a ser fortalecidos, como ilustra o gráfico na Figura 148 (d) item 4.3.4.1. Na Figura 149 item 4.3.4.1, observa-se que com a distância de 800 mm entre o detector e o gerador de raios X, as ocorrências dos efeitos de contraste de fase são fortalecidas, como ilustra o gráfico na Figura 149 (d) item 4.3.4.1. Esse fortalecimento do

efeito de contraste de fase de raios X, ao aumentar a distância entre a fonte e o detector de raios X pode ser melhor observado no gráfico da Figura 150 item 4.3.4.1. Também se observa na Figura 151 item 4.3.4.1, que ao aumentar o tempo de integração ocorre tanto um realce dos objetos em teste, como o fortalecimento das ocorrências dos efeitos de contraste de fase de raios X, como ilustra o gráfico na Figura 151 (d) item 4.3.4.1.

Desta forma foi possível visualizar os efeitos de contraste de fase de raios X nas amostras padrão (Figura 151 item 4.3.4.1) utilizadas e nas fatias microtomadas de cabo isolado em XLPE (Figura 152 item 4.3.4.2), bem como identificar regiões onde ocorreram a ruptura dielétrica (Figura 155 item 4.3.4.2) e regiões de arborescências elétricas (Figura 159 item 4.3.4.2).

5.2 CONCLUSÕES

No presente trabalho foi possível realizar a avaliação da vida útil de cabos isolados em XLPE envelhecidos em campo utilizando a técnica de relação entre a espessura remanescente da arborescência e a tensão de rigidez dielétrica. No entanto esta avaliação de estimativa de vida útil restante para cabos isolados em XLPE, não é eficaz, pois se torna difícil o procedimento, devido à curva da linha de tendência ser logarítmica, tornando mais imprevisível o seu formato. Outra causa é a evolução da arborescência, sendo difícil prever o seu aparecimento e o seu crescimento, pois os meios onde as arborescências se formam não são iguais, tendo vários tipos de interferências elétricas, físicas e químicas. Verificou-se, no entanto que caso seja possível produzir um sistema que verifique com mais precisão o tamanho das arborescências em água produzidas em cabos isolados, essa técnica vem a ganhar eficiência, pois poderá ser produzida uma estatística de tamanhos de arborescência com menor erro.

Com o sistema desenvolvido foi possível criar artificialmente amostras de cabos isolados em XLPE e EPR, e em lençóis de borracha natural EPR com arborescências elétricas para validação da metodologia utilizando a técnica de contraste de fase de raios X.

Com relação ao processo de impregnação de materiais que aumente o nível de absorção nas regiões da arborescência, foi verificado que ocorreu um aumento no contraste das amostras porém essa técnica deve ser aprimorada para visualização das arborescências utilizando a técnica de contraste de fase de raios X com impregnação de material de contraste.

Foi verificado que é possível visualizar imagens radiográficas com contraste de fase de raios X utilizando geradores de raios X microfocados. Para geradores de raios X de milifocos deve ser montado um sistema onde o gerador de raios X deve estar disposto a uma distância do detector tal que produza um feixe de raio X coerente, intensificando os efeitos de contraste de fase por raios X diminuindo a distorção da penumbra geométrica.

Foram avaliados diversos tipos de detectores de raios X com características distintas, onde foi possível visualizar e analisar radiografias por contraste de fase de raios X, sendo o melhor, o detector com tecnologia CCD's que apresentou resultados satisfatórios em relação à técnica.

Confrontando-se os resultados obtidos, observa-se que para este estudo, a técnica utilizada encontrou respaldo sendo esses resultados significativos, validando a metodologia proposta.

TRABALHOS FUTUROS

Desenvolver equipamentos para avaliação em campo destes materiais utilizando a técnica de contraste de fase de raios X;

Aprimorar o processo de impregnação de material que venha a aumentar o nível de absorção nas regiões da arborescência e desta forma ressaltar o contraste;

Desenvolver metodologia para avaliação de arborescências com geradores de raios X nanofocos e detectores CCD's;

Por fim adaptar a aquisição de contraste de fase por raios X a um tomógrafo, a fim de avaliar a morfologia das arborescências em 3D e com isso obter parâmetros mais detalhados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDO, M., & HOSOYA, S. (1972). *Proceedings of the 6th international conference on x-ray optics and microanalysis*. University of Tokyo Press. Philadelphia: G. Shinoda et al.
- ARNDT, U. W., DUNCUMB, P., & Long, J. V. (2001, Agosto 28). *Patent No. US 6,282,263 B1*. United States Patent nº US 6.282.263.
- ARRIGHI, R. (1986, Fev). From Impregnated Paper to Polymeric Insulating Materials in Power Cables. *IEEE Trans. Elect. Insul.*, 21(1), 7-18.
- ASTM-D149-09. (2009). *Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies*.
- BARLOW, A. (1991, Fevereiro). The Chemistry of Polyethylene Insulation. *IEEE Elect. Insul.*, 7(1), 8-17.
- BARTNIKAS, R., & SRIVASTAVA, K. D. (2000). *Power and Communication Cables – Theory and Applications*. New York: McGraw-Hill.
- BLATT, F. J. (1992). *Modern Physics*. New Yourk: McGraw-Hill.
- BLINOV, N. N., VASIL'EV, A. Y., SEROVA, N. S., GRYAZNOV, A. Y., & POTRAKHOV, N. N. (2009). A Microfocal Method for Phase-Contrast X-Ray Imaging. 43(4).
- BOCUZZI, C., & MARTINS, M. (1997). Implantação de Redes Subterrâneas em Condomínio Residencial. *Eletricidade Moderna*(275), 90-101.
- BRADLEY, D., GUNDOGDU, O., JENNESON, P., NIRGIANAKI, E., & ISMAIL, E. H. (2007). Review of X-ray Phase Contrast Imaging Techniques and Propagation Based Imaging Using a Benchtop Microfocal Source. *Jornal Sains Kesihatan Malaysia*, 5, 1-16.
- BULINSKI, A. T., CRINE, J. P., NOIRHOMME, B., DENSLEY, R., & BAMJI, S. (1998, August). Polymer Oxidation and water treeing. *IEEE Trans. on Diel. and Elect. Ins.*, 5(4), 558-569.
- BUSHONG, S. C. (2010). *Ciências Radiológicas para Tecnólogos: Física, Biologia e Proteção* (Vol. 9 edição). Rio de Janeiro: Elsevier.
- CARONIA, P. J., FURNO, J. S., PANG, K. P., & SZANISZLO, S. R. (1999). Advances in TR-XLPE Insulation. *IEEE*.

- CHAIMANEE, Y., JOLLY, D., BENAMMI, M., TAFFOREAU, P., DUZER, D., MOUSSA, I., et al. (2003). A Middle Miocene hominoid from Thailand and orangutan origins. *Nature*, 422, 61-65.
- CLOETENS, P., LUDWIG, W., BARUCHEL, J., VAN DYCK, D., J., V. L., GUIGAY, J., et al. (1999). Holotomography: Quantitative phase tomography with micrometer resolution using hard synchrotron radiation x-rays. *Appl. Phys. Lett.*, 2912.
- CLOETENS, P., PATEYRON-SALOMÉ, M., BUFFIÈRE, J., PEIX, G., BARUCHEL, J., PEYRIN, F., et al. (1997). Observation of microstructure and damage in materials by phase sensitive radiography and tomography. *J. Appl. Phys.*, 81(9), 58-78.
- CYGAN, P., & LAGHARI, J. (1990, Outubro). Models for Insulating Aging Under Electrical and Thermal Multistress. *IEEE TEI*, 25(5), 923-934.
- DAS-GUPTA, D. K., & GERHARD-MULTHAUPT, R. (1997). *Dielectric Spectroscopy of polar and Non – polar polymers Including biopolymers and liquid crystal polymers and their applications*. UFPR, Curitiba.
- DENSLEY, J., KALICKIL, T., & NADOLNY, Z. (Feb. 2001). Characteristics of PD Pulses in Electrical Trees and Interfaces in Extruded Cables. *IEEE Trans. Dielect. and Elect. Insul.*, vol. 8, n. 1, p. 48-57.
- DENSLEY, R. J., BARTNIKAS, R., & BERNSTEIN, B. (1994, Janeiro). Multiple Stress Aging of Solid Dielectric Extruded Dry-cured Insulation Systems for Power Transmission Cables. *IEEE Trans. Power Del.*, 9(1), 559-571.
- DIAS, J. M., & PALMEIRA, J. V. (2000). *Tomografia*. Retrieved 06 06, 2007, from Instituto Superior Técnico - IST: http://in3.dem.ist.utl.pt/laboratories/EMEEcourse_2000_2002.html
- DISSADO, L. A., & FOTHERGILL, J. C. (1992). *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. London: Peter Peregrinus.
- EICHHORN, R., & BARTNIKAS, R. (1983). Engineering Dielectrics – Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Molecular Structure and Electrical Behaviour. *ASTM Special Technical*, 2, 355-445.
- EISBERG, R., & RESNICK, R. (1994). *Física Quântica*. Rio de Janeiro: Campus Ltda.
- FIEDLER-FERRARA, N., & CINTRA DO PADRO, C. (1995). *Caos Uma Introdução*. São Paulo: Editora Edgard-Blucher Ltda.
- GJAERDE, A. C. (1997, Setembro). Multifactor Aging Models – Origin and Similarities. *IEEE EIM*, 13(5), 6-13.
- GODOI, W. C. (2005). *Detecção de defeitos em isoladores poliméricos por radiografia digital.*, *Dissertação de Mestrado*. Dissertação (Mestrado - Engenharia) - UFPR, Curitiba.
- GUTFLEISCH, F., & NIEMEYER, L. (1995). Measurement and Simulation of PD in Epoxy Voids. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2(5), 729.

- HALL, C. (1989). *Polymer Materials*. London: Macmillan Education.
- HAMAMATSU. (2007). *X-ray Flat Panel Sensor Application Manual*. HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Solid State Division, Rev. 4.24c.
- HARTLEIN, R., & ORTON, H. (2006, Maio). Long-life XLPE-insulated Power Cables. *Dow Chemical and Borealis LLC*, 35-77.
- HASNAH, M., OLTULU, O., ZHONG, Z., & CHAPMAN, D. (2002). Application of absorption and refraction matching techniques for diffraction enhanced imaging. 73(3).
- HEALTH, C. (2009). *Technical Information Data Sheet*. Carestream Health, Inc.
- HÖNNICKE, M. G. *Óptica de raios X aplicada a imagens e ao estudo de deformações termo-acústicas de materiais*. Tese (Doutorado - Engenharia) - UFPR, Curitiba.
- HÖNNICKE, M. G., FOERSTER, L. A., NAVARRO-SILVA, M. A., MENK, R. H., RIGON, L., & CUSATIS, C. (2005). Preliminary studies of enhanced contrast radiography in anatomy and embryology of insects with Elettra synchrotron light.
- HÖNNICKE, M. G., KAKUNO, E. M., MANICA, J., & CUSATIS, C. (2007). Propagation-based x-ray phase-contrast imaging with broad focus conventional x-ray sources.
- HÖNNICKE, M. G., KELLERMAN, G., ROCHA, H. S., GILES, C., TIRAO, G., MAZZARO, I., et al. (2005a). Enhanced contrast radiography with channel-cut crystals at the LNLS. *Rev. Sci. Instr.*, 76.
- IEC-270. (1981). *Partial Discharge Measurements*. Suisse: IEC.
- IEDA, M. (1980). Dielectric Breakdown Process in Polymers. *IEEE, Trans. On Dielec. Elect. Ins.*, 15(3), 206–224.
- KAK, A. C., & SLANEY, M. (1988). *Principles of computerized tomographic imaging*. New York: IEEE Press.
- KAPLAN, I. (1962). *Nuclear Physics*. U.S.A.: Addison-Wesley Publishing Company.
- KATZ, C., WALKER, M., & DYNDUL, J. (1990, Abril). Comparative evaluation by laboratory aging of 15 and 35kV extruded dielectric cables. *IEE Transactions on Power Delivery.*, 5(2), 816-824.
- KNOLL, G. F. (2000). *Radiation Detection and Measurement* (Vol. 3^a ed.). New York: John Wiley & Sons Inc.
- KOTRE, C., & BIRCH, I. (1999). Phase contrast enhancement of X-ray mammography: a design study. *Phys. Med. Biol.*, 44, 2853-2866.
- KOWALSKI, E. L. (2006). *Estudo da borracha natural por meio de técnicas de caracterização de dielétrico*. Tese (Doutorado em engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.

- KREUGER, F. H. (1989). *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*. London: Butterworths.
- KUFFEL, E., & ZAENGL, W. (1990). *Ligh Voltage Engineering Fundamentals*. London: Pergamon Press.
- LEGUENZA, E. L. (2003). *Comportamento dielétrico, viscoelástico e físico-químico do polietileno reticulado envelhecido sob condições aceleradas de múltiplo estresse*. Tese (Doutorado - Física Aplicada) - USP, São Carlos.
- LEWIS, R. (2004). Medical phase contrast X-ray imaging: current status and future. *Phys. Med. Biol.*, 49, 3573-3583.
- MALIK, N. H., AL - ARAINY, A. A., & QURESHI, M. I. (1998). *Electrical Insulation In Power Systems*. New York: Marcel Dekker Inc.
- MALIK, N. H., AL-ARAINY, A., & QURESHI, M. I. (2007). The Role Of Cations In Water Tree Growth In Technical Grade Xlpe Insulated Cables. *IEEE*, 127 - 130.
- MAMEDE FILHO, J. (1994). *Manual de equipamentos elétricos*. Rio de Janeiro: LTC - Livros técnicos e Científicos S. A.
- MATSUO, S., KATAFUCHI, T., TOHYAMA, K., MORISHITA, J., YAMADA, K., & FUJITA, H. (2005). Evaluation of edge effect due to phase contrast imaging for mammography. *Med.Phys.*, 32, 2690-2697.
- MIURA, F. S., & SCHOLZ, R. C. (2010). *Estudos sobre o Breakdown na Borracha Natural*. UFPR. Curitiba: UFPR.
- MONTANARI, G. C., & SIMONI, L. (1993, Outubro). Aging Phenomenology and Modeling. *IEEE TEI*, 28(5), 775-776.
- NDT. (2010). *NDT RESOURCE CENTER* . Retrieved from <http://www.ndt-ed.org/>
- NOGUEIRA, L. P. (2008). *Quantificação histomorfométrica óssea a partir de microtomografia 3D por contraste de fase e transmissão de raios X utilizando luz síncrotron*. Dissertação (Mestrado em engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- NUGENT, K. A., PAGANIN, D., & GUREYEV, T. E. (2001). A Phase Odyssey. 54(8).
- ORTON, H. (2005). *Long-life XLPE-Isulated Power Cables*. Vancouver, Canda.
- PATSCH, R. (1992). Electrical Aging and Water Treeing. *IEEE Trans. Elect. Insul.*, 27(3), 532-542.
- PHOENIX. (2013). *General Electric Company Measurement & control Solutions*. Retrieved Junho 2013, from Phoenix x-ray: <http://www.phoenix-xray.com>
- PIAZZA, F. (2001). *Avaliação do estado de envelhecimento do sistema isolante de transformadores em papel – óleo e cabos extrudados em XLPE, utilizando a técnica de tensão de retorno*. Dissertação (Mestrado em engenharia) – UFPR, Curitiba.

- PICOT, P. (2003). *Cuaderno Técnico no 198: El corte de corriente eléctrica en vacío*. chneider Electric España S.A.: España.
- PIEKARZ, A. H. (2006). *Determinação do volume em vazios em isoladores poliméricos por técnicas de tomografia digital de raios-X e processamento de imagem*. Dissertação (Mestrado em engenharia) – UFPR, Curitiba.
- QUOIRIN, N. S. (2004). *Diagnóstico de defeitos em madeira por tomografia de raios X*, Tese de Mestrado. Dissertação (Mestrado em engenharia) – UFPR, Curitiba.
- RADIO IN MAMA. (2013). Retrieved 02 19, 2013, from <http://www.radioinmama.com.br/qualidadeemmama.html>
- RIBEIRO JÚNIOR, S. (2008). *Análise da ruptura dielétrica em materiais isolantes elétricos de cabos isolados XLPE e EPR por tomografia 2D e 3D*. Tese de Mestrado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) – UTFPR, Curitiba.
- ROCHA, H. S. (2007). *Desenvolvimento de sistemas radiográfico e tomográfico com técnicas de contraste de fase e realce por difração de raios X*. Tese (Doutorado em engenharia) – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro.
- ROCHA, J. G. (2003). *Microdetectores de Silício Baseados em Cintiladores para Radiografia Digital*. Tese (Doutorado - Engenharia) - Universidade do Minho, Guimarães.
- ROSS, R., SMIT, J. J., & AUKEMA, P. (1992). staining of water trees with methylene blue explained. *IEEE*, 456-460.
- SHUNG, K. K., SMITH, M. B., & TSUI, B. M. (1992). *Principles of Medical Imaging*. Academic Press, Inc.
- SILVA, G. C. (2005). Descargas parciais estimuladas por raios-X contínuo e pulsado em materiais dielétricos: similaridades e diferenças. Tese (Doutorado em Engenharia) – UFPR. Curitiba.
- SILVA, R. R. (2003). Reconhecimento de Padrões de Defeitos de Soldagem em Radiografias Industriais. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro.
- SNIGIREV, A., SNIGIREVA, I., KOHN, V., KUZNETSW, S., & SCHELOKOV, I. (1995). On the possibilities of x-ray phase contrast microimaging by coherent high-energy synchrotron radiation. *Rev Sci. Instrum.*, 66, 5486.
- SNIGIREVA, I., & SNIGIREV, A. (2006). X-ray microanalytical techniques based on synchrotron radiation. *J. Environ. Monit.*, 8, 33-42.
- SOUZA, T. D. (2011). *Aplicações da radiografia por contraste de fase na visualização de articulações e cartilagens*. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Instituto De Física Gleb Wataghin Da UNICAMP, Campinas.
- STENNIS, E., & KREUGER, F. (1990, Outubro). Water Treeing in Polyethylene Cables. *IEEE Trans. Elect. Insul.*, 25(5), 989-1027.

- SWINKA, V. F. (2000). *Imagens de defeitos por descarga parcial estimulada por raios X pulsado em materiais dielétricos poliméricos*. Tese (Doutorado em Engenharia) - UFPR, Curitiba.
- TANAKA, T., OKAMOTO, T., NAKANISHI, K., & MIYAMOTO, T. (Oct. 1993). Aging and Related Phenomena in Modern Electric Power Systems. *IEEE Trans. Elect. Insul.*, vol. 28, n. 5, p. 826-844.
- TAUHATA, L., SALATI, I., & PRINZIO, R. (2003). *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos* (Vol. 5ª revisão). Rio de Janeiro: IRD/CNEN.
- TEIXEIRA JR., M. D. (2004.). *Cabos de Energia*. São Paulo: ArtLiber Editora.
- TSUJI, K. e. (2004). *X-Ray Spectrometry: Recent Technological Advances*. Ed. John Wiley & Sons Ltd.
- TUOHIMAA, T. (2008). *Liquid-Jet-Target Microfocus X-ray Sources: Electron Guns, Optics and Phase-Contrast Imaging*. Thesis (Doctoral in Applied Physics) Royal Institute of Technology, Stockholm.
- UCHIDA, K., Y., K., NAKADE, M., INOUE, D., SAKAKIBARA, H., & TANAKA, H. (2001). Estimating the Remaining Life of Water-Treed XLPE Cable by VLF Voltage Withstand Tests. *20*.
- WESTNEAT, M. W., BETZ, O., BLOB, R. W., FEZZAA, K., COOPER, W. J., & LEE, W.-K. (2003). Tracheal Respiration in Insects Visualized with Synchrotron X-ray Imaging. *Science*, *299*, 558.
- WILKINS, S., GUREYEV, T., GAO, D., POGANY, A., & STEVENSON, A. (1996). Phase contrast imaging using polychromatic hard x-rays. *Nature* (384), 335.
- WOLTER, K. D., JONHSON, J. F., & TANAKA, J. (1987). Polymer degradation and its measurement. In: *Engineering Dielectrics - Measurements techniques*. B. Philadelphia: *ASTM Special Technical Publication, II(926)*, pp. 355-445.
- YONEYAMA, A., MOMOSE, A., SEYA, E., HIRANO, K., TAKEDA, T., & ITAI, Y. (1999). Operation of a separated-type x-ray interferometer for phase contrast x-ray imaging. *Rev. Sci. Instr.*, 4582.
- ZILIO, S. C. (2007, 04 29). *Difração de Fraunhofer*. (cepa.if.usp) Retrieved 03 14, 2013, from e-física: ensino de física online: <http://efisica.if.usp.br/optica/universitario/difracao/fraunhofer/>

ANEXO A – TRABALHO PUBLICADO EM PERIÓDICO

Analysis of dielectric breakdown in power cables using 2D and 3D tomography

S Ribeiro, S Paschuk, V Swinka-Filho and H Schelin

Submitted 14.12.10
Accepted 01.06.11

The occurrence of a water tree or electrical tree is identified as the main phenomenon in the degradation in solid isolations of electric energy distribution cables. Water tree evolution can lead to dielectric breakdown of the isolation layer and, consequently, to the failure of the isolated cable and the interruption of the electric energy supply. The understanding of the morphology evolution of this phenomenon is necessary for the development of analysis methods and to prevent collapse in the polymeric insulation of the cables. This work demonstrates the application of X-ray tomography as a tool for the morphology study of the paths of insulated cable breakdown formed in crosslinked polyethylene (XLPE) and ethylene propylene rubber (EPR) and also the technique of accelerated induction of the electrical tree and breakdown path in the laboratory.

Introduction

The underground electric distribution network is composed of isolated cables, both single phase and three phase, installed in pipeline banks or directly into the ground and does not require any kind of support system, unlike the networks above ground.

The isolated cables used in underground distribution networks are characterised by four basic parts: a metal conductor, a dielectric system, a shield and an external protector^[1].

The primary insulation material of the cables, which is composed of extruded polymers, can be made from crosslinked polyethylene (XLPE) or ethylene propylene rubber (EPR)^[2,3].

Despite the excellent dielectric properties of these power cables, the materials that go into the making of the cables may have different mechanisms of ageing when subjected to different stresses, which can ultimately lead to the breakdown of the material^[4].

In real conditions of operation, the insulation of the cables may be subject to various types of stress, namely electrical (voltage, operation frequency), heat (operation temperature, temperature gradient), mechanical (vibration, torsion) and environmental stresses (humidity, contamination). These stresses, acting either individually or in combination, can lead to the degradation and ageing and, ultimately, the collapse of the isolation system. The main mechanisms of degradation and ageing occurring in isolated power cables are water trees and electrical trees, as shown in Figure 1^[5].

Sebastião Ribeiro is with the Federal University of Technology of Paraná, UTFPR, CPGEI, Curitiba, Paraná, Brazil and the Institute of Technology for Development, LACTEC, DVMI, Curitiba, Brazil.

Sergei Paschuk is with the Federal University of Technology of Paraná, UTFPR, CPGEI, Curitiba, Paraná, Brazil.

Vitoldo Swinka-Filho is with the Institute of Technology for Development, LACTEC, DVMI, Curitiba, Brazil.

Hugo Schelin is with the Federal University of Technology of Paraná, UTFPR, CPGEI, Curitiba, Paraná, Brazil.

The water trees shown in Figure 1(a) are regions of microcavitations and damage as filament shapes in polymers, such as XLPE, caused by water penetration containing ions in the presence of an alternating electric field; their growth is slow and has virtually no partial discharge^[5].

The electrical trees are empty channels formed from the decomposition of the dielectric materials by partial discharges and are permanently displayed, as shown in Figure 1(b). It has been suggested that partial discharges occur because of electric field concentrations in isolation or in surfaces or cavities, leading to the formation of electrical trees^[6].

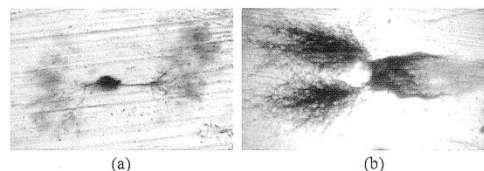


Figure 1. Failures of the XLPE insulated cable aged in the field: (a) water trees; (b) electrical trees

Generally, it is concluded that a water tree can transform or start an electrical tree, or go through extension of the isolation, and that after the occurrence of any of these events the dielectric breakdown is imminent, compromising the insulated cable^[7].

Materials and methods

To induce paths of dielectric breakdown in the XLPE and the EPR cables, an experimental arrangement was developed consisting of a circuit for voltage application on samples and partial discharge generation located together with a partial discharge analyser with a resolution in the phase angle. For analysis by tomography, an acquisition system of the X-ray images together with the developed software for tomographic reconstruction of 2D and 3D filtered back-projection with filter variation in the space and frequency domains were used.

Induction of the breakdown paths

The experimental arrangement to induce the breakdown paths in the cable samples was assembled using the circuit shown in Figure 2^[8,9].

A high-voltage alternating source V is used, with an inductor L in series with a source V that filters the external noise coming

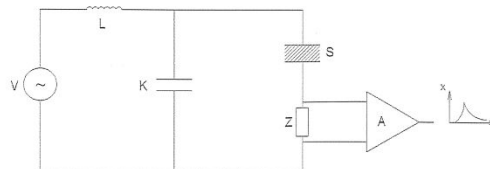


Figure 2. Circuit diagram to induce the breakdown paths

from the source. To ensure that the current pulse generated by the partial discharge in the sample S can spread to and be detected in the impedance measurement Z, a K capacitor coupling is placed in parallel with the capacitance S of the sample. Thus, the circuit in series formed by K, S and Z becomes a low-impedance path for the discharge pulses. The pulse developed in the impedance measurement Z generates a voltage drop that is amplified by the amplifier A and sent to the partial discharge analyser. This system was assembled in a Faraday cage to avoid noise from radio interference.

Through a software developed for the partial discharge analysis, it was possible to locate and identify the origin of the pulses. It is known that the partial discharges in an internal cavity occur in particular regions of the applied sinusoidal voltage. Samples of the XLPE and the EPR cables of 110 mm in length were prepared according to the schematic diagram shown in Figure 3. A needle of 1 mm diameter was introduced at a depth of 2 mm in the insulating layer to generate partial discharges and accelerate the breakdown process in the sample. The sinusoidal alternating voltage was applied with a value of 8 kV r.m.s. and 120 Hz.

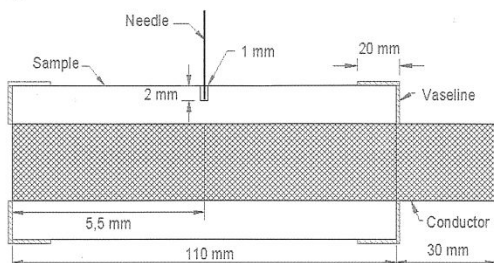


Figure 3. Sample preparation for the punctual dielectric breakdown test

2D and 3D tomography

For the projections, the authors used the CT scan system from the Materials Diagnostics Instrumentation Laboratory of LACTEC – Institute of Technology for Development. The system had the following parts: a generator microfocus portable X-ray (PXS5-72SA Kevex 70 kV/100 μA), a detector X-ray (Hamamatsu CT7942), a rotation system with micron positioning, control units and a portable computer^[10].

For the tomographic 2D image reconstruction, a software was elaborated using the technique of filtered back-projection, where image processing is carried out in the acquired projections using filters in the space and frequency domains. These filters reduce the noise and artifacts that harm the tomographic reconstruction. In spatial filters, a low-pass filter and a median filter were used to eliminate the noise that would interfere with the final result of the image along with very high frequencies^[11].

After using the space filter it was necessary to filter the projections again, seeking a higher definition and equalisation of the image elements. This process is carried out through the frequency filters. Some examples of the application of these filters are shown in Figure 4(a)-(c).

The flow chart of the reconstruction tomography process through the technique of filtered back-projection can be seen in Figure 5.

These filters were also used after processing the image in the space domain for an image in the frequency domain through the fast Fourier transform in two dimensions (FFT2D).

In the next stage, the filters were used in the space domain, equalisation techniques, stretch and contrast histogram, seeking a marked improvement in the distribution of grey levels in the image^[12,13,14,15].

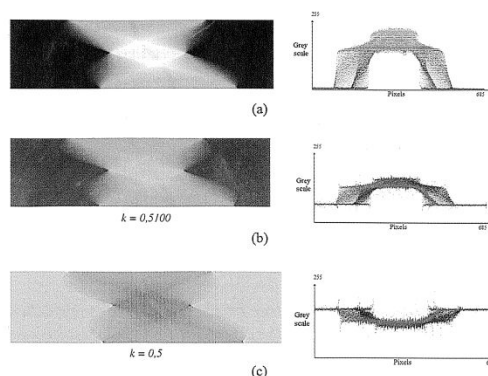


Figure 4. Sinograms of the tomographic 2D for X-rays of the sample of the isolated cable XLPE 15 kV: (a) original; (b) application of the Hamming filter; and (c) application of the Hanning filter

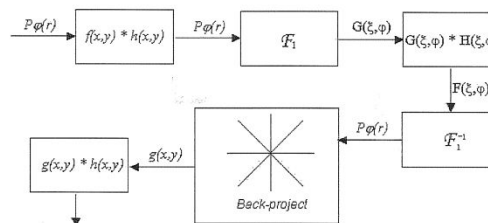


Figure 5. The tomographic reconstruction system by filtered back-projection

With the tomographic image processed, the library Visualization Toolkit (VTK) was used to visualise and process the 2D and 3D images in C++ language.

The software was developed to handle the processing techniques and segment the 2D and 3D images, using the compilation program Borland C++ Builder 6.0.

Results

Through the punctual dielectric breakdown test and analysis of partial discharge, it was possible to measure the occurrence, magnitude and phase angle of the partial discharges in the cable samples of XLPE and EPR until their breakdown.

Figure 6 shows the statistical distribution of partial discharge occurrences by the apparent charge and time evolution on the sample of the XLPE cable, which reached the maximum value of 27 nC before the breakdown.

Figure 7 exhibits the statistical distribution of the partial discharge occurrences by the voltage phase angle and apparent charge (in pC) in the sample of XLPE cable.

Figure 8 shows the statistical distribution of the partial discharge occurrence by the apparent charge and time evolution on the sample of EPR cable, which reached the maximum value of 8 nC before the breakdown.

Figure 9 shows the statistical distribution of the partial discharge occurrences by the voltage phase angle and apparent charge in the sample of EPR cable.

In Figures 7 and 9, it was observed that, at the beginning of the test, there was a high occurrence of low-intensity corona discharge, which then increased by surface partial discharges of high amplitude and low occurrence. It was possible to visualise that the partial discharge development started at 0°-180°, stabilising in the region of 90° and 270°, where the region of the greatest intensity of

voltage breakdown is in the range of 27 nC for the XLPE samples and 8 nC for the EPR samples, as shown in Figures 6 and 8.

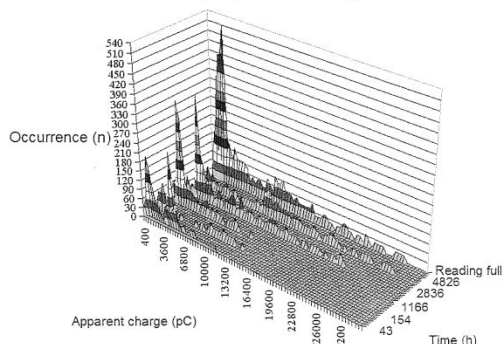


Figure 6. Distribution of partial discharge occurrences of apparent charge in the XLPE cable sample

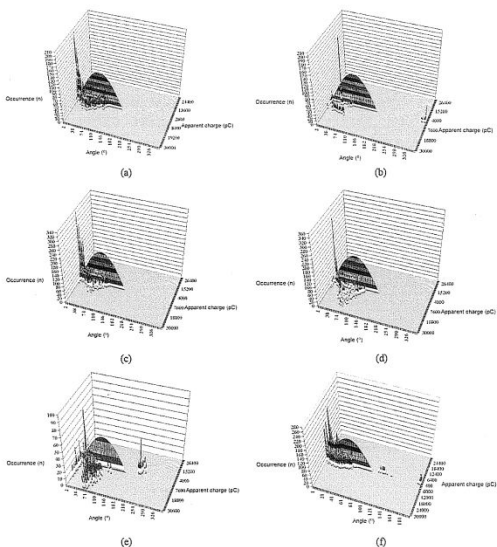


Figure 7. Statistical distribution of the events at the phase angle and the apparent charge in the sample of the XLPE cable: (a) Reading: 43 h; (b) Reading: 154 h; (c) Reading: 1166 h; (d) Reading: 2836 h; (e) Reading: 4826 h; (f) Reading: full

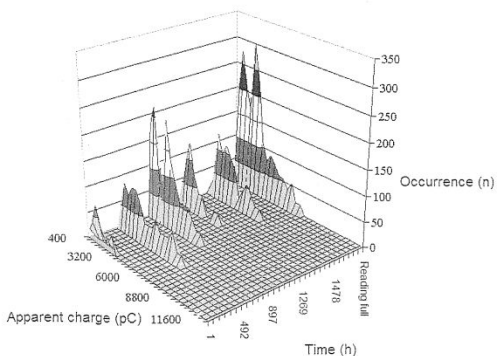


Figure 8. Distribution of partial discharge occurrences of apparent charge in a sample of the EPR cable

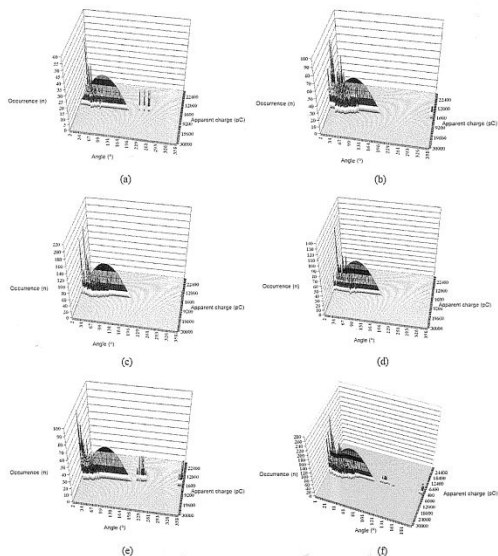


Figure 9. Statistical distribution of the events at the phase angle and apparent charge in the sample of EPR cable: (a) Reading: 1 h; (b) Reading: 492 h; (c) Reading: 897 h; (d) Reading: 1269 h; (e) Reading: 1478 h; (f) Reading: full

To analyse the tomographic images, processing methods were used through filters that enabled the identification of internal defects made on the isolated cable or intensified by the dielectric breakdown.

2D tomographic images were used and filtered through the Hamming and Hanning space filters, which showed better results. Figures 10-13 show the path of the 3D tomographic reconstruction of the dielectric breakdown of the samples of XLPE and EPR insulated cables, obtained with a voltage of 60 kV, a current of 100 μ A and an integration time of 10 s.

In the 3D tomographic reconstruction shown in Figure 10, a median filter in a 3x3x9 window and a Gaussian filter in a 3D window with a deviation of 10% were used. (The same parameters are used for Figures 11-13.) To view the surface of the algorithm, marching cubes in greyscale 204 to locate the dielectric breakdown in insulating material EPR and 168 to locate the dielectric breakdown in the conductor shield were used.

In Figure 11, marching cubes in greyscale 231 to locate the dielectric breakdown in insulating material XLPE and 212 to locate the dielectric breakdown in the conductor shield were used.

Figure 12 shows marching cubes in greyscale 50 to locate the dielectric breakdown in insulating material EPR and 81 in Figure 12(b) and 73 in Figure 12(c) to locate the dielectric breakdown in the conductor shield.

In Figure 13, marching cubes in greyscale 57 to locate the dielectric breakdown in insulating material XLPE was used.

Conclusion

Studies on dielectric breakdown, partial discharge analysis, tomography and digital image processing were performed.

Through the punctual dielectric breakdown test and partial discharge analysis it was possible to measure the occurrence, magnitude and phase angle and visualise the partial discharge evolution on the XLPE and the EPR insulated cables.

Through the 2D and 3D tomography of dielectric breakdown, it was possible to view and measure the defects caused by the

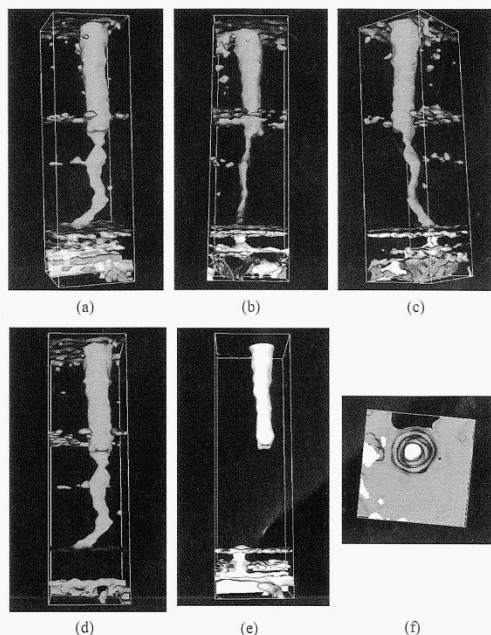


Figure 10. Visualisation of a 3D tomography rebuilt with Hamming filter factor $k = 0.4998$ of the EPR cable sample: (a) X front sight with two levels of grey; (b) Y front sight with two levels of grey; (c) Y front sight and X later sight with two levels of grey; (d) X front sight of dielectric breakdown in the insulating polymer; (e) X front sight of dielectric breakdown in the conductor shield; and (f) Z top sight with two levels of grey

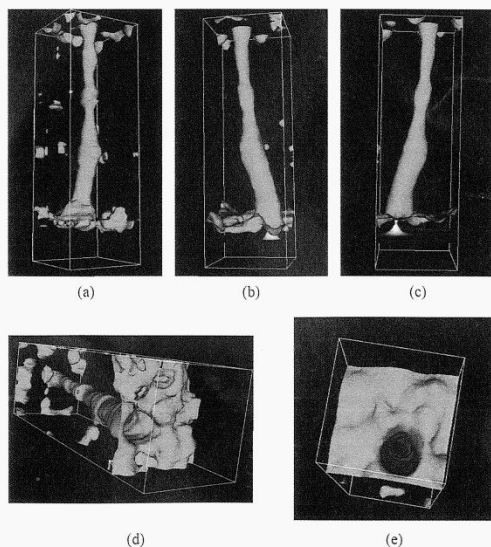


Figure 11. Visualisation of a 3D tomography rebuilt with Hamming filter factor $k = 0.4998$ of the XLPE cable sample: (a) Y frontal view of the insulating polymer; (b) X frontal view of the insulating polymer and conductor shield; (c) X later view of the insulating polymer and conductor shield; (d) Z lower view and X side view; (e) Z higher view

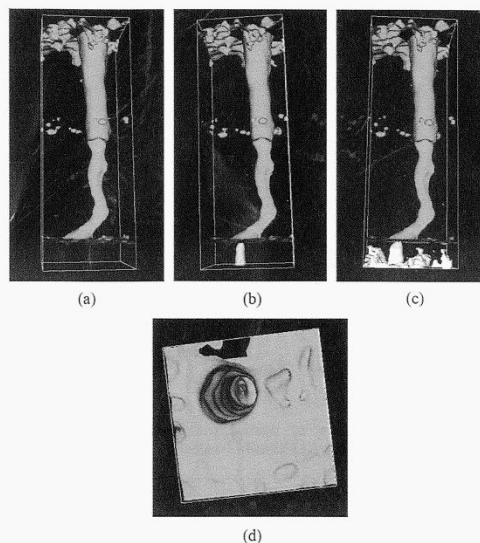


Figure 12. Visualisation of a 3D tomography rebuilt with Hanning filter factor $k = 1.7$ of the EPR cable sample: (a) X frontal view of the insulating polymer; (b) X frontal view of the insulating polymer and conductor shield; (c) X frontal view of the insulating polymer and conductor shield; (d) Z higher view

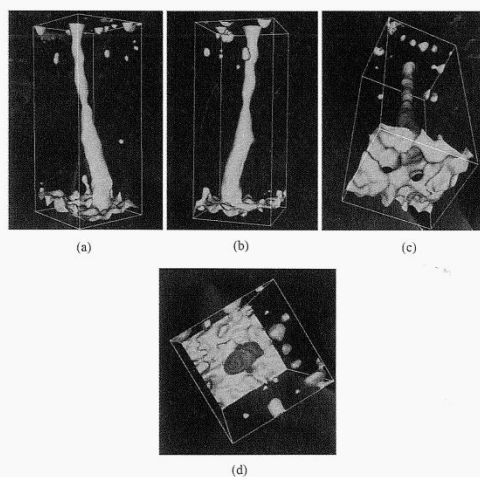


Figure 13. Visualisation of a 3D tomography rebuilt with Hanning filter factor $k = 1.7$ of the XLPE cable sample: (a) Y frontal view of the insulating polymer; (b) X frontal view of the insulating polymer; (c) Z lower view and Y higher view; (d) Z higher view

punctual dielectric breakdown test. Thus, it was possible to analyse the interaction of processing techniques in tomographic images.

With the development of the tomography software, which uses the method of tomographic reconstruction by filtered back-projection, as well as the processing, segmentation and manipulation of these images, it was possible to reconstruct 2D and 3D tomography of the paths of dielectric breakdown and analyse the morphology of the paths of insulated cable breakdown with the XLPE and EPR cables.

References

1. C V Bocuzzi and M J Martins, 'Implantação de redes subterrâneas em condomínio residencial', *Eletricidade Moderna*, No 275, pp 90-101, February 1997.
2. R Bartnikas and K D Srivastava, *Power and Communication Cables – Theory and Applications*, McGraw-Hill, New York, 2000.
3. R Arrighi, 'From impregnated paper to polymeric insulating materials in power cables', *IEEE Trans Elect Insul*, Vol EI-21, No 1, pp 7-18, February 1986.
4. M D R Teixeira Jr, 'Cabos de Energia', ArtLiber Editora, São Paulo, 2004.
5. N H Malik, A A Al-Arainy and M I Qureshi, *Electrical Insulation in Power Systems*, Marcel Dekker Inc, New York, 394 p, 1998.
6. R J Densley, R Bartnikas and B Bernstein, 'Multiple stress ageing of solid dielectric extruded dry-cured insulation systems for power transmission cables', *IEEE Trans Power Del*, Vol 9, No 1, pp 559-571, January 1994.
7. L A Dissado and J C Fothergill, *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*, Peter Peregrinus, London, 1992.
8. V Swinka-Filho, 'Imagens de defeitos por descarga parcial estimulada por raios X pulsado em materiais dielétricos poliméricos', PhD thesis UFPR, 2000. [In Portuguese]
9. G C Silva, 'Descargas parciais estimuladas por raios-X contínuo e pulsado em materiais dielétricos: similaridades e diferenças', PhD thesis UFPR, 2005. [In Portuguese]
10. A H Piekarz, 'Determinação do volume em vazios em isoladores poliméricos por técnicas de tomografia digital de raios X e processamento de imagem', MSc dissertation, LACTEC/UFPR, Curitiba, 2006. [In Portuguese]
11. A C Kak and M Slaney, *Principles of Computerized Tomographic Imaging*, IEEE Press, New York, 1988.
12. P Soille, *Morphological Image Analysis*, Springer-Verlag, Berlin, 1990.
13. G J F Banon and J Barrera, 'Bases da morfologia matemática para análise de imagens binárias', IX Escola de Computação, Pernambuco, July 1994.
14. J Serra, *Image Analysis and Mathematical Morphology*, Academic Press, 1982.
15. S Ribeiro Júnior, 'Análise da ruptura dielétrica em materiais isolantes elétricos de cabos isolados XLPE e EPR por tomografia 2D e 3D', Tese de Mestrado, LACTEC/UFPR, Curitiba, 2008.

The Ninth International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies

CM 2012 / MFPT 2012

12 – 14 June 2012

The Ibis Hotel, Earls Court, London, UK

BINDT
THE BRITISH INSTITUTE OF
NON-DESTRUCTIVE TESTING



Karen Cambridge/Samantha Mussard
The British Institute of Non-Destructive Testing
Newton Building, St George's Avenue, Northampton NN2 6JB, UK.
Tel: +44 (0)1604 89 3811 (option 4 for the Conference Team)
Fax: +44 (0)1604 89 3861; Email: karen.cambridge@bindt.org

www.cm-mfpt.org

MFPT

BI
NDT
THE BRITISH INSTITUTE OF
NON-DESTRUCTIVE TESTING

ANEXO B – INTERAÇÃO DO RAIOS X COM A MATÉRIA

ANEXO B.1. ESPECTRO DE EMISSÃO DOS RAIOS X

O espectro de emissão de raios X depende de alguns fatores na sua geração. O efeito *Bremsstrahlung* produz raios X mesmo que elétrons de uma única energia interajam com o alvo. Isto ocorre devido à forma com que os elétrons interagem com o material do alvo. A Figura 161 ilustra a variação do espectro de energia, devido à variação da tensão do gerador de raios X modificando a intensidade do feixe de raios X e o seu comprimento de onda. Quanto maior a energia cinética, maior o poder de penetração do elétron no alvo. Quando um elétron interage com o núcleo, ficando em repouso com um único impacto, toda sua energia cinética é convertida em raios X, produzindo um fóton com energia máxima (NOGUEIRA, 2008; BUSHONG, 2010).

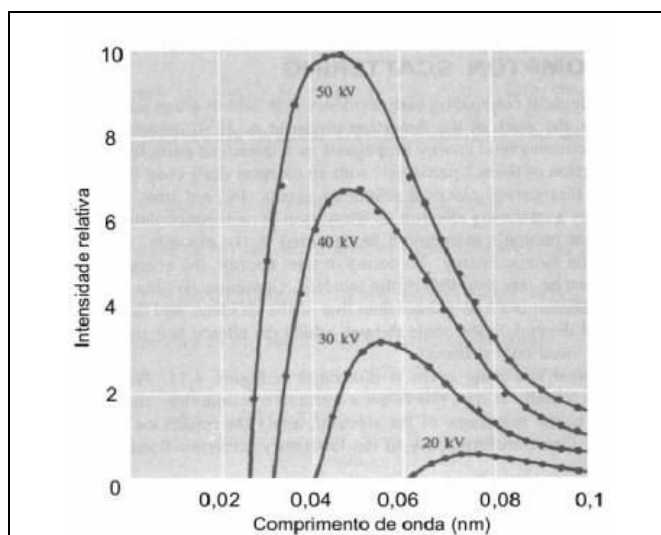


Figura 161(Anexo B) - Espectro contínuo de raios X para uma placa de tungstênio
Fonte: (BLATT, 1992).

A variação da corrente influencia diretamente no aumento de elétrons em colisão com o ânodo, alterando a intensidade do feixe de raios X, não alterando no entanto, o formato do espectro de energia. A energia continua sendo a mesma como ilustra a Figura 162 (NOGUEIRA, 2008; BUSHONG, 2010).

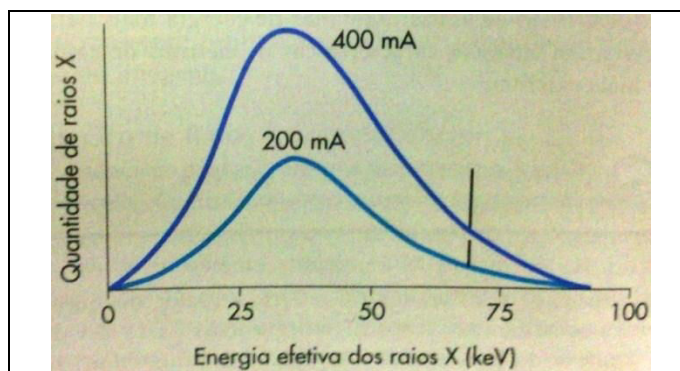


Figura 162 (Anexo B) - Espectro produzido em um tubo para diferentes valores de corrente
Fonte: (BUSHONG, 2010).

O espectro de energia de radiação possui características do material do alvo, isso ocorre devido a interação dos elétrons em diferentes camadas do átomo no alvo, produzindo raios X característicos, como ilustra a Figura 163.

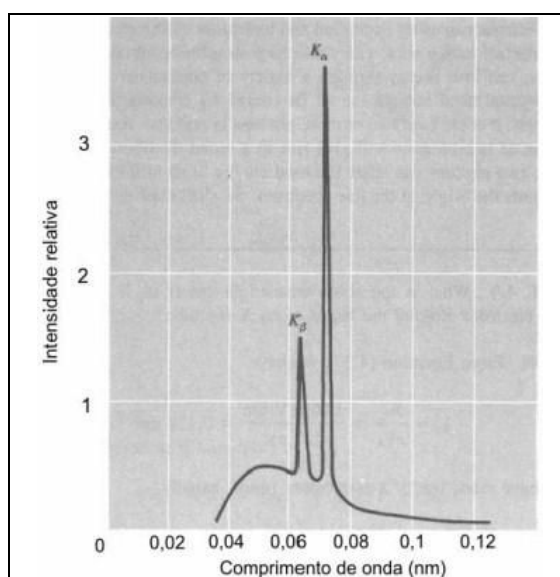


Figura 163 - Espectro discreto de raios X para uma placa de tungstênio
Fonte: (NOGUEIRA, 2008).

ANEXO B.2. INTERAÇÃO DOS RAIOS X COM A MATÉRIA

Os raios X devido a seu caráter ondulatório, ausência de carga e massa de repouso, podem penetrar em um material percorrendo grandes espessuras antes de sofrer a primeira interação. Este poder de penetração depende da seção de choque para cada tipo de interação,

que pode absorver ou espalhar a radiação incidente (TAUHATA, SALATI, & PRINZIO, 2003; ROCHA H. S., 2007; BUSHONG, 2010).

A radiação eletromagnética interage com estruturas cujas dimensões são similares ao comprimento de onda da radiação. Os raios X possuem comprimentos de onda muito curtos na ordem de 10^{-8} ou 10^{-9} m, e quanto maior a energia dos raios X, mais curto é o comprimento de onda. Desta forma, raios X de energia baixa tendem a interagir com os átomos, que possuem diâmetros de cerca de 10^{-9} e 10^{-10} m; os raios X de energia moderada interagem geralmente com elétrons e os de energia alta tem maior probabilidade de interagir com o núcleo. Essas interações são classificadas como efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares. (BUSHONG, 2010; NOGUEIRA, 2008).

A Figura 164 mostra a variação desses processos para a variação de Z do absorvedor e da energia dos fótons (TAUHATA, SALATI, & PRINZIO, 2003).

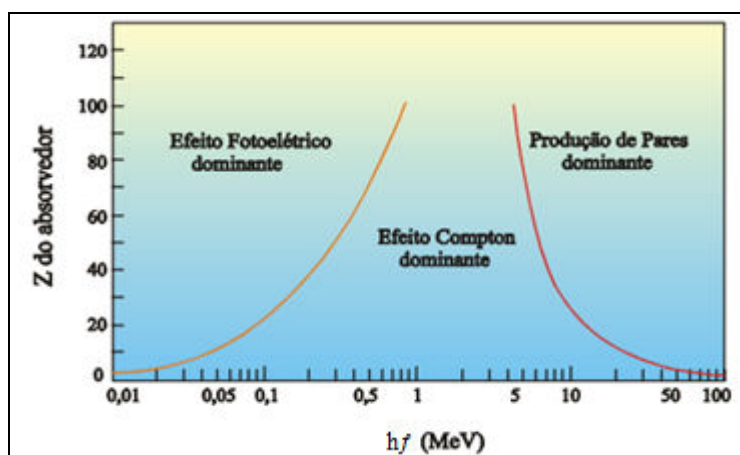


Figura 164 (Anexo B) - Importância relativa dos diversos processos de interação dos fótons com a matéria em função da energia do fóton e do número atômico do material

Fonte: (TAUHATA, SALATI, & PRINZIO, 2003).

ANEXO B.2.1 EFEITO FOTOELÉTRICO

Em 1905, Albert Einstein propôs um mecanismo para explicar o efeito fotoelétrico, baseado na teoria de Max K. E. L. Planck, dos quanta de energia. Ele propôs que a energia emitida em forma de radiação se conservava em quanta (pacotes) de energias, e que estes quanta eram emitidos e absorvidos em unidades que são exatamente iguais a hf , como pode ser avaliada pela equação (21).

$$\frac{1}{2}mv^2 = hf - E_b \quad (21)$$

Esta equação estabelece que a energia cinética máxima de um elétron ($E_e = \frac{1}{2}mv^2$) emitido é igual à energia hf do quantum de luz incidente, menos a quantidade de trabalho E_b necessário para liberar o elétron da sua camada original como demonstrado na equação (22).

$$E_e = hf - E_b \quad (22)$$

Ou seja, o efeito fotoelétrico é caracterizado pela transferência total da energia da radiação X ou gama (que desaparece), a um único elétron orbital que é ejetado com uma energia cinética E_e bem definida, como ilustra a Figura 165. A interação é com o átomo como um todo e não ocorre com elétrons livres (TAUHATA, SALATI, & PRINZIO, 2003; ROCHA H. S., 2007; BUSHONG, 2010).

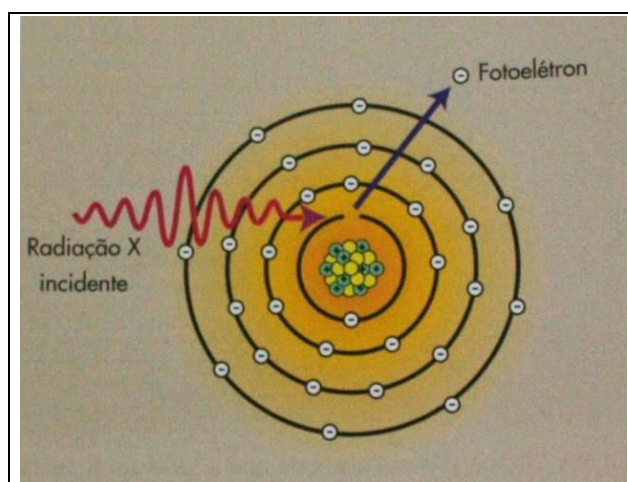


Figura 165 (Anexo B) - Esquema do efeito fotoelétrico
Fonte: (BUSHONG, 2010).

A interação, além de gerar um fotoelétron, também vai gerar um átomo absorvedor ionizado com uma vacância em uma de suas camadas. Esta vacância é rapidamente preenchida através da captura de um elétron livre do meio e/ou um rearranjo dos elétrons de outras camadas do átomo. Sendo assim, um ou mais fótons de raios X característicos podem ser gerados. O efeito fotoelétrico é o tipo de interação mais predominante para raios X (ou gama) de energia relativamente baixa. O processo também tem maior probabilidade para materiais de alto número atômico (KNOLL, 2000; TAUHATA, SALATI, & PRINZIO, 2003).

ANEXO B.2.2 ESPALHAMENTO COMPTON

O espalhamento Compton é caracterizado pelo espalhamento de fótons por elétrons mais externos ao átomo. Este é um processo duplo, no qual o elétron absorve a energia da onda eletromagnética e irradia novamente como radiação espalhada, arrancando um elétron do átomo. Uma onda eletromagnética transporta energia e quantidade de movimento e sempre que, de alguma forma, alguma energia for retirada da onda, uma quantidade de movimento correspondente também será retirada. A energia do fóton espalhado vai depender somente de seu ângulo de espalhamento. Esta energia será sempre menor que a energia incidente, com exceção do fóton espalhado a zero grau, o qual terá a mesma energia do fóton incidente. Esta dependência é expressa pela equação (23) (EISBERG & RESNICK, 1994; NOGUEIRA, 2008).

$$E'_\lambda = \frac{E_\lambda}{1 + \frac{E_i}{m_o v^2 (1 - \cos \theta)}} \quad (23)$$

onde:

m_o = massa de repouso do elétron;

v = velocidade da luz ;

E_λ = energia do fóton incidente

E'_λ = energia do fóton espalhado

θ = ângulo de espalhamento

A energia do elétron que é ejetado é definida pela equação (22), onde E_b corresponde à sua energia de ligação. A Figura 166 representa o esquema do espalhamento Compton, no qual o fóton com energia inicial E_λ interage com um elétron em estado estacionário e é espalhado num ângulo θ , resultando num fóton com energia E'_λ e o mesmo elétron espalhado num ângulo ϕ , saindo com velocidade da luz v (TAUHATA, SALATI, & PRINZIO, 2003; BUSHONG, 2010).

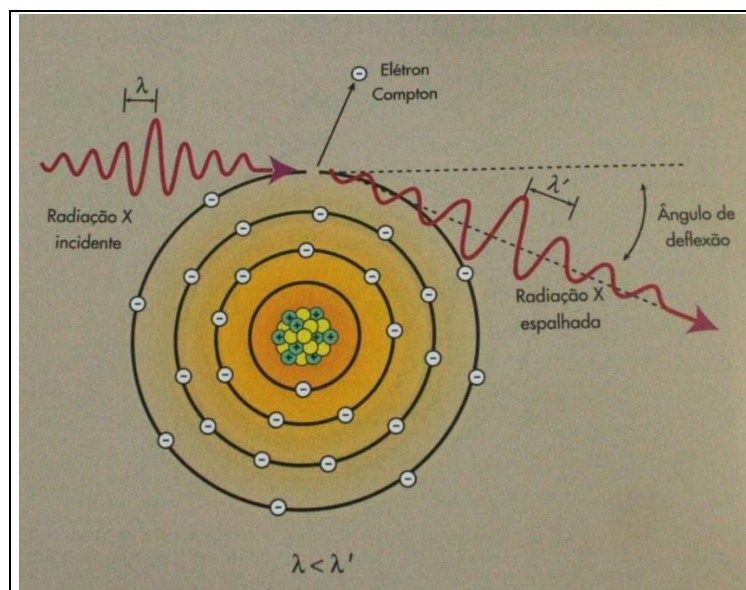


Figura 166 (Anexo B) - Esquema do espalhamento compton
Fonte: (BUSHONG, 2010).

ANEXO B.2.3 PRODUÇÃO DE PARES

Este tipo de interação ocorre nas proximidades do núcleo do átomo do meio absorvedor, resultando no desaparecimento do fóton. Na interação, o fóton desaparece dando origem a um par elétron-pósitron, como ilustra a Figura 167. Este fenômeno somente pode ocorrer para energias acima de 1,022 MeV, que é duas vezes a energia de repouso do elétron ($2m_0v^2$). Toda energia acima de 1,022 MeV necessária para criar um par elétron-pósitron, é transformada em energia cinética e dividida igualmente entre o pósitron e o elétron. Posteriormente o pósitron vai depositando sua energia no meio, até que este se recombinde com um elétron do meio absorvedor, se aniquilando e dando origem a dois fótons, chamados fótons de aniquilação. Estes fótons são emitidos em sentidos opostos, cada um com energia de 0,51 MeV (TAUHATA, SALATI, & PRINZIO, 2003; BUSHONG, 2010).

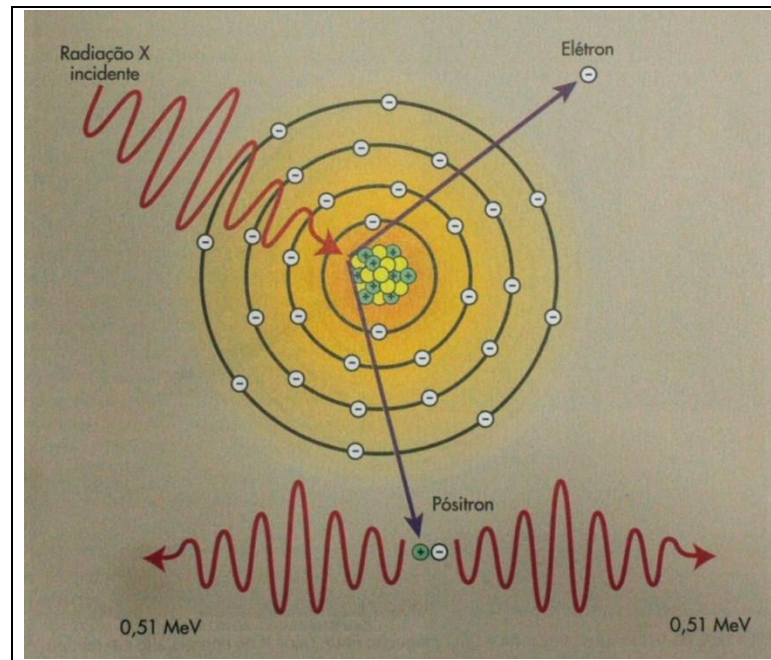


Figura 167 (Anexo B) - Esquema da formação de pares
Fonte: (BUSHONG, 2010).

ANEXO B.3 RADIOGRAFIA

A radiografia baseada no contraste por atenuação de diferentes partes de um objeto vem sendo largamente utilizada desde seu descobrimento por Röntgen em 1896. Grandes melhorias na resolução obtida por esta técnica foram alcançadas com o aparecimento de dispositivos detectores de alta resolução espacial (filmes, CCD's, detectores de Si-amorfo, etc.) e com o advento de novos geradores de raios X (síncrotrons e geradores de raios X do tipo microfoco).

Uma imagem de raios X, utiliza como informação a atenuação que um feixe de raios X sofre após atravessar um objeto. Ao atravessar o objeto ao longo de um determinado caminho reto, um feixe monocromático de raios X obedece à Lei de Beer-Lambert conforme as equações (24), (26) e (27) (KAK & SLANEY, 1988; PIEKARZ, 2006; SHUNG, SMITH, & TSUI, 1992).

$$\int_{\text{raio}} \mu(x,y) ds = \ln \frac{N_i}{N_d} \quad (24)$$

Onde:

- $\mu(x,y)$ é o coeficiente de atenuação no ponto (x,y) em (cm^{-1}) ;

- N_i é o número de fótons que entram no objeto;
- N_d é o número de fótons que saem do objeto.

Quando o feixe de raios X atinge um material, sua energia diminui devido à interação dos fótons com o material. Assumindo que o feixe de raios X tem uma intensidade I e uma seção transversal de área A . Assumindo também que os átomos no material são idênticos e todos possuem seção transversal σ com uma densidade n átomos por unidade de volume, então o número total de átomos encontrado pelo feixe de raios X é dado por An e a área ocupada pelos átomos no feixe incidente é $An\sigma$. Assim a probabilidade para que um fóton interaja com um átomo é $An\sigma / A = n\sigma$ como mostra a Figura 168 (GODOI, 2005; SHUNG, SMITH, & TSUI, 1992).

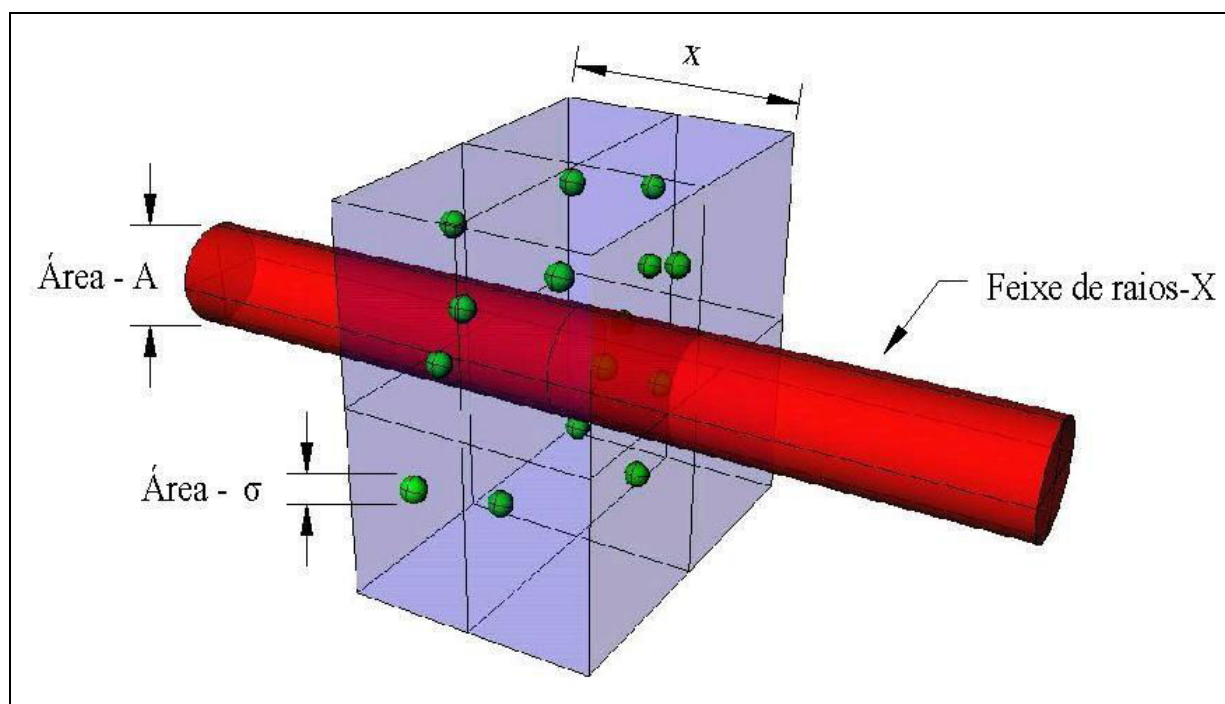


Figura 168 (Anexo B) - Atenuação
Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2008).

O feixe de raios X removido numa espessura dx do material é dada pela equação (25).

$$dI = -n\sigma I dx \quad (25)$$

Trabalhando a equação (25), fazendo $\mu = n\sigma$ que é a fração de energia removida por unidade de espessura por unidade de intensidade e integrando obtém-se as equações (26) e

(27) (GODOI, 2005; SHUNG, SMITH, & TSUI, 1992; DIAS & PALMEIRA, 2000; QUOIRIN, 2004).

$$I_{(y)} = I_0 e^{-\int_0^L \mu(x,y) dx} = I_0 e^{-\tilde{\mu}L} \quad (26)$$

$$\tilde{\mu} = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{I_0}{I_{(y)}} \right) \quad (27)$$

Onde:

- μ é o coeficiente de atenuação do material em um determinado ponto para uma determinada energia do feixe em (cm^{-1});
- $\tilde{\mu}$ é a somatória dos coeficientes de atenuação do material em um determinado ponto para uma determinada energia do feixe;
- I_0 é a intensidade do feixe que atinge o objeto;
- $I_{(y)}$ é a intensidade do feixe de raios X após percorrer um determinado caminho pelo objeto;
- L é a espessura atravessada (em linha reta).

A intensidade é proporcional ao número de fótons de raios X que atravessa todo o objeto por unidade de tempo como mostra a Figura 169.

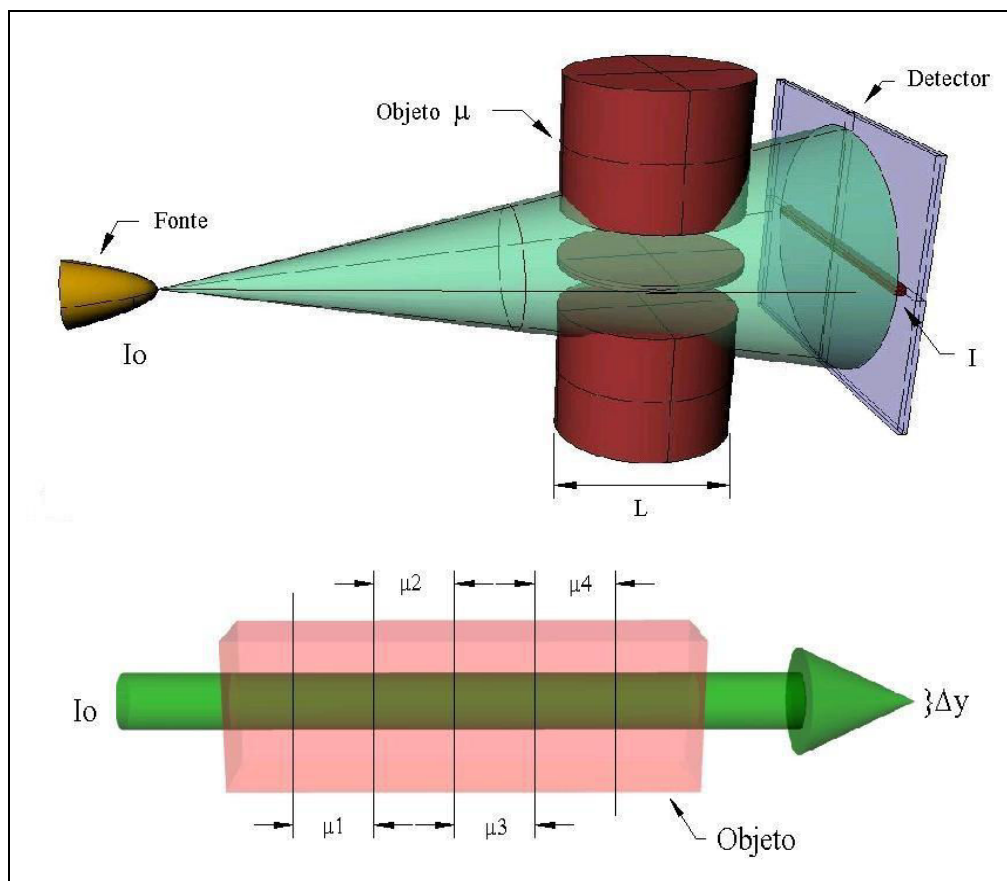


Figura 169 (Anexo B) - Atenuação da radiação em relação à espessura de um objeto
Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2008).

A projeção $P\varphi(r)$, calculada pela transformada de *Radon* e demonstrada pela equação (28), onde (φ, r) representa as coordenadas da trajetória percorrida por um raio-X (QUOIRIN, 2004).

$$P\varphi(r) = \int_{(\varphi, r)} f(x, y) ds \quad (28)$$

O sistema de coordenadas (r, j) mostrado na Figura 170 corresponde à rotação do par de eixos (x, y) de um ângulo φ calculado na equação (29).

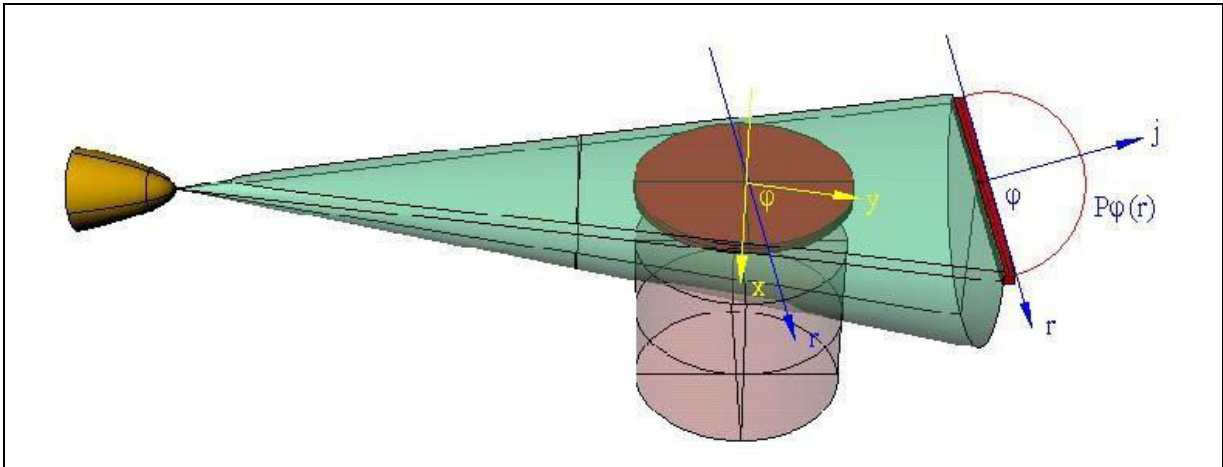


Figura 170 (Anexo B) - Projeção de uma imagem de raios X $P\varphi(r)$
 Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2008).

$$\begin{bmatrix} r \\ j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \text{sen} \varphi \\ \text{sen} \varphi & -\cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (29)$$

Utilizando a equação (28) e a equação (29) relativa a r ($r = x \cos \varphi + y \text{sen} \varphi$), pode-se escrever a projeção $P\varphi(r)$ conforme descrito na equação (30).

$$P\varphi(r) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, y) \delta(x \cos \varphi + y \text{sen} \varphi - r) dx dy \quad (30)$$

A equação (30) é conhecida como a Transformada de Radon da função $f(x, y)$ utilizando a distribuição delta de Dirac.

A distribuição delta de Dirac é um objeto matemático definido para fazer o papel da identidade para a operação de convolução de funções. A distribuição δ torna mais fácil a unificação do tratamento do estudo de Séries de Fourier e Transformadas de Fourier. Fisicamente, ela pode ser interpretada como um impulso de energia em um sistema, razão pela qual recebe o nome de Função Impulso de *Dirac* (KAK & SLANEY, 1988).