



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

ZURDIVAL PINO DE CASTRO JÚNIOR

**DETECTABILIDADE E ANÁLISE DIMENSIONAL DE FALHAS NO
REVESTIMENTO POLIMÉRICO DE ISOLADORES DE COMPÓSITO
POR RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA**

Recife

12/08/2009

ZURDIVAL PINO DE CASTRO JÚNIOR

**DETECTABILIDADE E ANÁLISE DIMENSIONAL DE FALHAS NO
REVESTIMENTO POLIMÉRICO DE ISOLADORES DE COMPÓSITO
POR RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA**

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

Área de concentração: Materiais e processo de Fabricação.

Orientador : Prof. Dr. Armando Hideki Shinohara

Recife

12/08/2009

C355

Castro Júnior, Zurdival Pino de

Detectabilidade e análise dimensional de falhas no revestimento polimérico de isoladores de compósitos por radiografia por radiografia computadorizada / Zurdival Pino de Castro Júnior. - Recife: O Autor, 2009.

Xvii,118f.; il., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2009.

Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Microtomógrafo. 3. Isoladores de compósito 4. Imagens Radiográficas. 5. Imagens termográficas. 6. Termovisão I. Título.

621 CDD (22. ed.)

UFPE/BCTG/2010-046

“DETECTABILIDADE E ANÁLISE DIMENSIONAL DE FALHAS NO REVESTIMENTO POLIMÉRICO DE ISOLADORES DE COMPÓSITO POR RADIOGRAFIA COMPUTADORIZADA”.

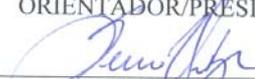
ZURDIVAL PINO DE CASTRO JUNIOR

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MATERIAIS E FABRICAÇÃO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE



Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA
ORIENTADOR/PRESIDENTE

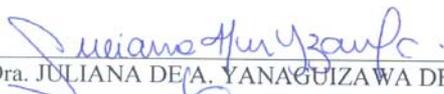


Prof. Dr. SEVERINO LEOPOLDINO URTIGA FILHO
COORDENADOR DO CURSO

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. ARMANDO HIDEKI SHINOHARA (UFPE)



Profa. Dra. JULIANA DE A. YANAGUIZA DE CARVALHO (UFPE)



Prof. Dr. EDUARDO FONTANA (UFPE)



Prof. Dr. RICARDO TADEU LOPES (COPPE/UFRJ)

Dedico este trabalho ao meu tio Jerônimo Cunha Almeida, de quem tive exemplos e lições de vida.

AGRADECIMENTOS

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

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

À Companhia Hidro Elétrica do São Francisco, por ter cedido as amostras utilizadas neste trabalho.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

À minha esposa e filhos por entenderem minha ausência nas horas de estudo.

RESUMO

Atualmente, as companhias elétricas do país e do exterior, visando detectar defeitos críticos nos isoladores de compósito, estão realizando inspeções das linhas viva remotamente, através de termovisão com câmera de infravermelho, detecção de emissão de UV do efeito corona, e inspeção visual. Embora a combinação desses métodos permita a detecção de defeitos nos revestimentos nem sempre a análise dos resultados é conclusiva. Ademais, quando os isoladores estão instalados no campo, paulatinamente ocorre acúmulo de poluentes nas aletas e no revestimento o que dificulta de sobremaneira as inspeções em condição energizada. Portanto, há necessidade urgente de se desenvolver uma técnica de inspeção que, mesmo na presença de camadas de poluentes no isolador, possa avaliar com eficiência se o isolador de compósito está ou não sob o risco de fraturar. Na presente dissertação foi realizada a avaliação da eficiência das técnicas de radiografia computadorizada em termos de detectabilidade e análise dimensional de falhas no revestimento polimérico do isolador de compósito, utilizando inclusive um sistema de radiografia computadorizado considerado de melhor resolução disponível na atualidade. Os resultados obtidos com dois sistemas de radiografia computadorizado foram comparados com os resultados obtidos com a técnica de radiografia convencional utilizando filmes de classes I e II e imagens radiográficas 2D obtidas com micro tomógrafo computadorizado. Ademais, um isolador de compósito que apresentou três pontos quentes, os quais foram detectados por termovisão no campo, foi analisado com um sistema de radiografia computadorizado no laboratório, visando uma correlação entre as imagens termográficas e as imagens radiográficas.

Embora a resolução espacial do sistema de radiografia com filmes de classe-I tenha sido superior quando as imagens de IQI de fio duplo foram comparadas, em termos de detectabilidade de falhas, praticamente não houve diferença com os resultados obtidos pelos sistemas de radiografia computadorizadas. Por outro lado, quando os resultados em termos de detectabilidade de falhas, informações quanto a sua localização, profundidade, as imagens 2D de micro tomografia são insuperáveis. Com respeito às imagens termográficas, dois dos três pontos quentes parecem estar associados a falhas de fabricação.

Palavras-Chave: Revestimento polimérico. Microtomógrafo. Isolador de compósito. Imagens Radiográficas. Imagens termográficas. Termovisão. Radiografia computadorizada

ABSTRACT

Currently, electricity companies, national and abroad, in order to detect critical defects in the composite insulators, are conducting inspections of the lines live remotely, through thermovision with an infrared camera, detection of UV emission of corona effect, and visual inspection. Although the combinations of these methods allow the detection of defects in platings, it is not always that the analysis of results is conclusive. Moreover, when the insulators are installed on the field, gradually occurs an accumulation of pollutants on the fins and on the plating which considerably harden the inspection in energized condition. So there is an urgent need to develop a technique for inspection, even with the presence of pollutants layers on the insulator, that can effectively evaluate whether the composite insulator is or not under risk of fracture. In this dissertation an evaluation was conducted to measure the efficiency of the techniques of computerized radiography in terms of detectability and dimensional analysis of flaws in the polymer plating of the composite insulator, also using a computerized radiography system considered the best resolution available nowadays. The results obtained with two systems of computerized radiography were compared with results obtained through the technique of using conventional radiographic films, classes "I" and "II", and 2D radiographic images obtained with computerized microtomograph. Moreover, a composite insulator which showed three hot spots, which were detected by field thermovision was analyzed with a computerized radiography system in the laboratory, seeking a correlation between thermography images and radiographic images. As a result, comparing the results of conventional radiography, although the spatial resolution of the system with radiography film class "I" was superior when the images of double wire IQI were compared, in terms of detectability of real flaws such as size and quantity of cracks, analysis of thickness, there were virtually no difference between the results obtained with computerized radiography systems. On the other hand, when the results in terms of detectability of flaws, information about their location, depth, images of 2D micro-CT are insuperable.

With respect to graphic pictures of two of the three hot spots appear to be associated with a manufacturing fault.

KEYWORDS: Silicon; Microtomograph; Composite Insulators; Radiographic Images; Thermographic Images; Thermovision.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Isoladores poliméricos instalados em linhas de transmissão	22
Figura 2.2	Inspeção visual do revestimento de silicone com linha viva, 230kV	23
Figura 2.3	Linhas de transmissão da CHESF - 230kV	23
Figura 2.4	Isoladores completos	25
Figura 2.5	Componentes do isolador	25
Figura 2.6	Tipos de terminais	26
Figura 2.7	Processo de pultrusão de bastões	27
Figura 2.8	Bastões de fibra	27
Figura 2.9	Crimpagem do terminal no bastão.	28
Figura 2.10	Resultado da crimpagem de terminal no bastão..	28
Figura 2.11	Molde de injeção para confecção do revestimento de silicone	28
Figura 2.12	Máquina de tração horizontal	30
Figura 2.13	Inspeção dimensional do terminal com passa-não-passa	31
Figura 2.14	Reações de fragmentação das ligações silício-carbono por degradação do silicone	32
Figura 2.15	Regiões em que ocorreu fratura frágil em isoladores de compósito	33
Figura 2.16	Regiões onde ocorreram fraturas mecânicas não caracterizadas como fratura frágil	33
Figura 2.17	Zona de danos em um bastão de isolador de compósito, próxima à extremidade de aço em um isolador de 115 kV que falhou em serviço	34
Figura 2.18	Superfícies de fratura no bastão de compósito com ampliação de 27 vezes	34
Figura 2.19	Superfície da fratura com ampliação de 6500 vezes	34
Figura 2.20	Ocorrências de fraturas frágeis em alguns países	35
Figura 2.21	Isoladores de compósito utilizados em LT's da Chesf que	

	fraturaram em serviço. (A) Linha de 230 kV; (B) Linha de 500 kV	36
Figura 2.22	Trincas na cobertura de borracha e diferentes estágios de sua formação	37
Figura 2.23	Cenários iniciais para a corrosão da fibra. (a) Sistema eficiente resina/sizing/fibra. (b) Interface aberta (desprotegida) da ação dos ácidos	37
Figura 2.24	Espectro eletromagnético	38
Figura 2.25	Unidade geradora - (ERESCO 65 MF4-W – 2009)	39
Figura 2.26	Unidade de controle – (ERESCO MF4 – 2009)	39
Figura 2.27	Filme radiográfico	41
Figura 2.28	Penumbra formada pela geometria do arranjo	47
Figura 2.29	Influência do tamanho foco na imagem	47
Figura 2.30	IQI ASTM tipo fio duplo. . OLIVEIRA, David F. Avaliação da qualidade de imagem em sistemas de radiografia computadorizada e image plates	49
Figura 2.31	IQI ASTM tipo fio duplo. OLIVEIRA, David F. Avaliação da qualidade de imagem em sistemas de radiografia computadorizada e image plates	50
Figura 2.32	Sistema digital (a) e composição das camadas de um IP (b). OLIVEIRA, David F	51
Figura 2.33	Comparação da linearidade dos detectores IP e filme de raios-X. (FUJI, 2008)	52
Figura 2.34	Seqüência do processamento do IP. (por exemplo, SHINOHARA et al. , 2002)	53
Figura 2.35	Tomógrafo – (DOVE, 2001)	54
Figura 2.36	Gerações de sistemas de tomografia computadorizada (DOVE, 2001)	55
Figura 3.1	Isolador tipo I, utilizado para retirada da amostra	57
Figura 3.2	Esquema da localização do trecho retirado para inspeção	58

Figura 3.3	Amostras selecionadas para inspeção	59
Figura 3.4	Imagem da termovisão de infravermelho	59
Figura 3.5	Amostras seccionadas do isolador tipo II inspecionadas no laboratório da UFPE	60
Figura 3.6	Segmento 04 do isolador tipo II inspecionado no laboratório da UFPE	61
Figura 3.7	Arranjo experimental do sistema de micro tomografia computadorizado – BAM	62
Figura 3.8	Arranjo experimental do sistema de radiografia digital de alta resolução – BAM	63
Figura 3.9	Vista geral do arranjo para radiografia convencional	65
Figura 3.10	Conferência da distância foco-filme	65
Figura 3.11	Marcação 0° e 90°	66
Figura 3.12	Colocação do filme sob as amostras	67
Figura 3.13	Conferência da centragem do feixe através de fio de prumo	67
Figura 3.14	IQI disponibilizados	68
Figura 3.15	Disposição dos IQI's	68
Figura 3.16	Visualização das identificações	69
Figura 3.17	Câmara escura – Cubas do revelador, da água e do fixador	70
Figura 3.18	Calibração do densitômetro	71
Figura 3.19	Densitômetro e fita densitométrica	71
Figura 3.20	Conferência da densidade do filme	72
Figura 3.21	Scanner utilizado	72
Figura 3.22	Fonte e scanner utilizados nos experimentos adicionais	73
Figura. 3.23	Inspeção visual e estado da superfície da amostra	74
Figura. 3.24	Inspeção dos IPs e apagamento de registros remanescentes	74
Figura. 3.25	Arranjo no laboratório do DEMEC-UFPE	75
Figura 4.1	Trinca entre bastão e revestimento	76
Figura 4.2	Medição do diâmetro do bastão	76
Figura 4.3	Secção no corte A-B de um defeito	77

Figura 4.4	Medições de diâmetro e distância entre trincas	77
Figura 4.5	Estimativa da espessura da camada polimérica em lados opostos do isolador	77
Figura 4.6	Corte transversal e longitudinal do bastão de um isolador composto de 230 kV.	78
Figura 4.7	Imagens na direção y mostrando trincas na cobertura de silicone – BAM	79
Figura 4.8	Imagens na direção Z mostrando um defeito no revestimento de silicone – BAM.	80
Figura 4.9	Defeito entre bastão e revestimento – BAM	80
Figura 4.10	Medições da espessura residual - BAM	81
Figura 4.11	Incrustação no revestimento de silicone	81
Figura 4.12	Filme classe II - 0° (AGFA D 7) -16 bit	82
Figura 4.13	Filme classe II - 90° (AGFA D7) – 16bit	82
Figura 4.14	Filme classe I - 0° (AGFA D4) – 16bit	82
Figura 4.15	Filme classe I - 90° (AGFA D4) – 16bit	82
Figura 4.16	Imagem sem processamento - Filme Classe I (AGFA D4) - 0° - 16 bits	83
Figura 4.17	Perfil da resolução espacial através do IQI de fios duplos – 8 bits – Imagem 90°	84
Figura 4.18	Visualização dos pares n° 10,11, 12 e 13 – 16 bits – Imagem 90°	84
Figura 4.19	Par de fios 10 e Par de fios 11	85
Figura 4.20	Par de fios 12 e Par de fios 13	85
Figura 4.21	Medição com smoothing 1 – Imagem 16bit	86
Figura 4.22	Curva da primeira derivada e Curva Primária – 16 bits	86
Figura 4.23	Medição da excentricidade do revestimento de silicone	87
Figura 4.24	Medição do diâmetro do bastão de composto com o revestimento – valor encontrado 20,7mm	87
Figura 4.25	Medição do diâmetro do bastão de composto sem o revestimento – valor encontrado 15,9mm	88

Figura 4.26	Medição do revestimento em pontos diametralmente opostos – valores encontrados 2,74mm e 1,80mm	88
Figura 4.27	Curva da primeira derivada e Curva Primária – 16 bits	88
Figura 4.28	Imagens dos filmes digitalizados com 8 bits	89
Figura 4.29	Imagem sem processamento do filme Classe I (AGFA D4) - 0° – 8bits	90
Figura 4.30	Perfil da resolução espacial através do IQI de fios duplos – Software ISEE! – 8 bits – Imagem 90°	90
Figura 4.31	Visualização dos pares n° 10,11, 12 e 13 – 8 bits – Imagem 90°	91
Figura 4.32	Par de fios 10 e Par de fios 11 – 8 bits	91
Figura 4.33	Par de fios 12 e Par de fios 13 – 8 bits	91
Figura 4.34	Medição – Par de fios 1 – Imagem 8 bits0	92
Figura 4.35	Curva da primeira derivada e Curva Primária – 8 bits	93
Figura 4.36	Esquema da medição em 8 bits	93
Figura 4.37	Medição do diâmetro do bastão com o revestimento – valor encontrado 21,3mm	93
Figura 4.38	Medição do diâmetro do bastão sem o revestimento – valor encontrado 16,2mm – 8 bits	94
Figura 4.39	Medição do revestimento de silicone em pontos opostos – valores encontrados 2,93mm e 1,92mm – 8 bits	94
Figura 4.40	Curva da primeira derivada e Curva Primária - 8 bits	95
Figura 4.41	Radiografia digital - Sistema CR-Fuji - BAM	95
Figura. 4.42	Radiografias digital - Sistema de radiografia HR-CR-Durr - BAM	95
Figura 4.43	Perfil da resolução espacial através do IQI de fios duplos – 8 bits – Imagem 90°	96
Figura 4.44	Imagem CR-FUJI, utilizada na medição com o Isse-demo.exe	97
Figura 4.45	Par de fios 7 e Par de fios 8 - CR FUJI	97
Figura 4.46	Par de fios 9 e Par de fios 10 - CR FUJI	97

Figura 4.47	Medição -Utilizando smoothing 1 – Imagem CR-FUJI - BAM	98
Figura 4.48	Medição da excentricidade	99
Figura 4.49	Medição dos diâmetros de revestimento e bastão – valores encontrado 21,9mm e 15,9mm	99
Figura 4.50	Medição do revestimento em dois pontos diametralmente opostos – valores encontrados 2,64mm e 3,42mm – 8 bits	99
Figura 4.51	Curva da 1ª derivada e perfil da curva primária utilizada na medição da penumbra	100
Figura 4.52	Perfil da resolução espacial através do IQI de fios duplos	100
Figura 4.53	Par de fios 10 e Par de fios 11 - CR – DUR	101
Figura 4.54	Par de fios 12 e Par de fios 13 - CR - DUR	101
Figura 4.55	Medições do fio do Par 2 - BAM	101
Figura 4.56	Imagem usada para medição da excentricidade	102
Figura 4.57	Medição dos diâmetros do revestimento e do bastão– valores encontrados: 21,6mm e 15,8mm	102
Figura 4.58	Medição do revestimento em pontos diametralmente opostos – valores encontrados: 3,62mm e 2,86mm – 8 bits	103
Figura 4.59	Medição da Penumbra	103
Figura 4. 60	Imagem do corpo de prova-01 do isolador tipoII, livre de falhas - radiografia computadorizada	104
Figura 4.61	Radiografia computadorizada do corpo de prova-02 com a presença de inúmeros vazios	104
Figura 4.62	Vista geral da imagem de radiografia computadorizada do corpo de prova-04	105
Figura 4.63	A região demarcada com linha vermelha. Nota-se também nesta região a presença de vazios.	105
Figura 4.64	Imagem feita através da termovisão – pontos 1, 2 e 3.	106
Figura 4.65	Termovisão do isolador, mostrando 01, próximo à fase após a incidência dos raios solares	107
Figura 4.66	Intensidade do sinal trinca RC FUJI -BAM	108

LISTA DE TABELAS

2.1	Classificações dos filmes	44
2.2	Características e aplicações de filmes	45
2.3	Valores máximos aceitáveis para penumbra segundo ASME V	48
2.4	Parâmetros do IQI de fios duplos	50
3.1	Códigos utilizados para cada sistema	63
3.2	Parâmetros do ensaio	70
3.3	Densidades dos filmes convencionais	81
4.1	Densidade do filme 1	83
4.2	Medição do fio do Par 1 – RC-DUR – 16 bits	86
4.3	Medição do fio do Par 1 – 8 bits	92
4.4	Medição do Par 1 - FUJI	98
4.5	Medição do fio do Par 2 – RC-DUR	102
4.6	Medições realizadas	108

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BAM	Federal Institute for Materials Research and Testing in Berlin Germany
CENEN	Conselho Nacional de Energia Nuclear
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CHESF	Companhia Hidroelétrica do São Francisco
DEMEC	Laboratório de Ensaaios Não Destrutivos & Monitoramento da Integridade Estrutural
ENENRSUL	Rede Energia
EPDM	Etileno propilenodieno
ESCELSA	Grupo Energia do Brasil
EUA	Estados Unidos da América
PDMS	Polidimetilsiloxano
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	Onde são aplicados os isoladores de compósitos	22
2.2	Constituição dos isoladores de compósitos	24
2.3	Processo de fabricação	26
2.4	Ensaio de fábrica	29
2.5	Defeitos de fabricação	31
2.6	Degradação do Material de Revestimento de Silicone, Geração de Trincas e Ruptura por Fratura Frágil	32
2.7	A radiografia	38
2.7.1	<i>Conceitos</i>	38
2.7.2	<i>Unidades geradoras</i>	39
2.7.3	<i>Granulação</i>	41
2.7.4	<i>Densidade óptica</i>	42
2.7.5	<i>Contraste</i>	42
2.7.6	<i>Exposição</i>	42
2.7.7	<i>Velocidade ou Sensibilidade</i>	43
2.7.8	<i>Tipos de filmes</i>	43
2.7.9	<i>Curva Característica do Filme de Raios-X</i>	45
2.7.10	<i>Definição de imagem</i>	46
2.7.11	<i>Cálculo da Penumbra</i>	46
2.7.12	<i>Indicadores de qualidade de imagem (IQI)</i>	48
2.7.13	<i>IQI de fio duplo</i>	49
2.8	Radiografia computadorizada	50
2.8.1	<i>Image Plate - IP</i>	51
2.8.2	<i>Processo de gravação e leitura</i>	52
2.9	Tomografia computadorizada	53
2.9.1	<i>Princípios</i>	53
2.10	Radioproteção	55
3	MATERIAIS E METODOS	57

3.1	Materiais	57
3.2	Inspeção dos Isoladores de Compósito Tipo-I com a Microtomografia computadorizada	61
3.3	Inspeção dos Isoladores de Compósito Tipo-I com Radiografia Computadorizada utilizando Leitor de IP de Alta Resolução	62
3.4	Inspeção do Isolador de Compósito Tipo-I com Método radiográfico convencional	64
3.5	Inspeção do Isolador de Compósito Tipo-II que Apresentou Pontos Quentes por Radiografia computadorizada	73
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	77
4.1	Inspeção por Microtomografia computadorizada	77
4.2	Resultados apresentados pela radiografia convencional digitalizadas	83
4.2.1	<i>Resultados das imagens digitalizadas com 16 bits</i>	83
4.2.2	<i>Resultados obtidos pelo método convencional com imagens digitalizadas - 8bits</i>	90
4.3	Resultados apresentados pela radiografia computadorizada realizadas no BAM	96
4.3.1	<i>Medições através das imagens computadorizadas - sistema CR-FUJI – Laboratório BAM</i>	97
4.3.2	<i>Medições através das imagens computadorizadas - sistema CR-DUR - Laboratório BAM</i>	101
4.4	Resultados apresentados pela radiografia computadorizada – DEMEC/UFPE	104
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	112
5.1	Conclusões	112
5.2	Sugestões para trabalhos futuros	113
	REFERÊNCIAS	114

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de fornecer energia elétrica de qualidade faz com que as empresas geradoras e transmissoras busquem para suas instalações materiais e equipamentos tecnologicamente mais adequados e confiáveis.

Hoje há consciência de que a falta de energia, mesmo momentânea pode causar prejuízos irreparáveis à sociedade, além de que a legislação do setor energético prevê pesadas multas quando ocorre interrupção no fornecimento. Por exemplo, se a linha de transmissão de 500 kV, de Presidente Dutra à Teresina, sofrer uma interrupção de fornecimento, fará sua transmissora pagar uma multa de R\$15.000,00 por minuto, além dos prejuízos às indústrias e à sociedade (ANEEL, 270/07).

Esses são argumentos suficientes para que as empresas transmissoras de energia fiquem preocupadas com a confiabilidade dos equipamentos aplicados em suas instalações, desde o momento que saem das fábricas, no estado de novo, como durante a operação, quando poderão ter sofrido algum tipo de degradação ou dano físico.

Dentre esses equipamentos estão os isoladores, com a função de, não somente garantir isolamento elétrico, como também servir de suporte estrutural nas linhas de transmissão para manter o cabo em suspensão.

A busca por alternativas mais econômicas, mais práticas e seguras, associada à evolução dos materiais fomentou o desenvolvimento dos isoladores de compósito, permitindo sua aplicação com algumas vantagens em relação aos de porcelana e aos de vidro tais como leveza, peso final fica em torno de 10% das cadeias tradicionais de vidro e porcelana, maior suportabilidade elétrica quando há acúmulo de poluentes. Hoje, há uma tendência mundial em se aplicar este tipo de isolador, o que fez surgir novos fabricantes e também com que fabricantes com tradição na produção de isoladores de porcelana e vidro, passassem a produzir isoladores de compósito (CHARNEY; EDWARD, 2008).

Inicialmente, os isoladores poliméricos começaram a ser utilizados em equipamentos e instalações de baixa tensão e logo passaram a ser desenvolvidos para aplicações em níveis de tensões mais altas. Hoje, existem isoladores de compósitos aplicados em linhas de transmissão de 500 kV e 800 kV.

Os isoladores de compósitos para linhas de transmissão são constituídos basicamente de três materiais. Um bastão de matriz polimérica reforçada com fibra de vidro de alta resistência mecânica, um revestimento de silicone e terminais metálicos de aço galvanizado.

As fibras de vidro são unidas por um processo conhecido como pultrusão (CSE Composite). Os terminais são colocados e prensados sobre as extremidades do bastão e um revestido de silicone é aplicado por injeção de baixa pressão e vulcanizado à alta temperatura sobre o bastão.

O bastão tem a finalidade de suportar as cargas mecânicas de tração, os terminais metálicos em aço galvanizado de possibilitar à fixação dos isoladores nas linhas, e o revestimento, aplicado sobre o bastão, cujo perfil tem a finalidade de aumentar a distância dielétrica entre seus terminais, a finalidade de proteger o bastão contra umidade e os intempéries do ambiente onde estão instalados. Para isso, esse revestimento deve estar bem aderido ao bastão e não apresentar falhas que permitam a exposição do bastão ao meio ambiente.

Com essa constituição deve-se obter um isolador confiável, compacto, leve, mecanicamente resistente e à prova de vandalismo. Essas características fazem com que sua aplicação seja cada vez maior no setor elétrico, apesar de ser o tipo de isolador mais caro.

A Companhia Hidroelétrica do São Francisco – CHESF, possui cerca de 46000 isoladores aplicados em seus 18.000 km de linhas de transmissão (linhas de 500 kV, 230 kV, 138 kV e 69 kV) dos quais mais de 5000 isoladores de compósito estão instalados a mais de dez anos (Relatório da superintendência de Transmissão - CHESF). Atualmente, todos os isoladores de compósitos poliméricos têm seu revestimento de silicone, com exceção do trecho, Campina Grande/Pau Ferro/ Natal, em torno de 7000 unidades de isoladores de EPDM, os quais serão substituídos pelos de silicone, que se mostram mais adequados às áreas com nível de poluição elevado e principalmente por se comportarem melhor nos ensaios elétricos (teste de tipo).

Um desses comportamentos ainda não totalmente compreendido em isoladores de compósito é conhecido de fratura frágil (ARMENTROUT et al, 2003), que é atribuído à corrosão das fibras de vidro do bastão de compósito do isolador sob tensão. Tal fenômeno tem levado alguns isoladores de compósito a se romperem após um determinado período de operação e os cabos condutores irem ao chão, acarretando enorme prejuízo para as empresas de fornecimento de energia com a interrupção não programada da linha de transmissão, tanto no País como no exterior.

Pesquisa em conjunto com o CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, considerado o maior centro de pesquisa do setor da América estão sendo realizadas para

avaliação de defeitos em isoladores de compósitos. e atualmente tem-se usado a técnica de termovisão para inspeção de isoladores em linhas energizadas mas, considerando que o nível de responsabilidade desses componentes para os sistemas elétricos é extremamente alto, procura-se garantir que isoladores com defeitos de fabricação não venham a ser aplicados e ainda, que os comprometidos pelo tempo de uso não permaneçam instalados nas linhas de transmissão. Para isso as normas recomendam ensaios, estabelecem critérios de aceitação e critérios de amostragens para ensaio aplicáveis aos isoladores (IEC 1109, 2007).

Conscientes da importância, e da necessidade de se buscar a garantia da integridade dos isoladores, além de outros ensaios, ensaios radiológicos como; a radiografia convencional, a digital e a micro-tomografia, se mostram como excelentes métodos de inspeção. A utilização de um dos três métodos é considerada imprescindível para detecção de defeitos em isoladores.

A questão principal dos métodos radiográficos é a qualidade das imagens obtidas em termos de detectabilidade de defeitos, pois esse é um requisito fundamental para possibilitar um diagnóstico correto. Por esta razão é imprescindível que os equipamentos radiográficos utilizados estejam nas condições de operação, definidas nas especificações de seus fabricantes e consigam operar dentro dos padrões das normas sob as quais os ensaios estão sendo realizados.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a potencialidade aplicativa das técnicas de radiografia computadorizada para inspeção da integridade dos revestimentos de silicone de isoladores de compósito, comparando os resultados obtidos com as técnicas de radiografia convencional digitalizada e técnica da micro-tomografia computadorizada.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo faz uma abordagem sobre a fabricação de isoladores de compósitos, aplicados em linhas de transmissão de alta-tensão e dos principais conceitos envolvidos nos ensaios radiográficos pelos métodos, convencional e computadorizado, utilizados na detecção de trincas no revestimento de silicone.

Comparados com os tradicionais isoladores de vidro e de cerâmica os isoladores poliméricos são significativamente mais leves, cerca de 10% do peso dos equivalentes de vidro ou porcelana. (S. M. Gubanski et al, 2007)

2.1 Onde são aplicados os isoladores de compósito?

Os isoladores são aplicados em todo o percurso das linhas de transmissão. Têm a finalidade de garantir o isolamento dos cabos elétricos, e mantê-los suspensos, fixados às torres, como mostra a figura Fig. 2.1



Figura 2.1 – Isoladores de compósitos instalados (SAMED, MARCIA. FUEM)

A inspeção visual, com a linha energizada, comumente chamada inspeção com linha viva, é uma atividade rotineira que se faz necessária para a verificação da integridade do

revestimento de silicone dos isoladores. Isto é feito com a utilização de um retrovisor acoplado a um bastão isolante. Como mostra a figura 2.2.

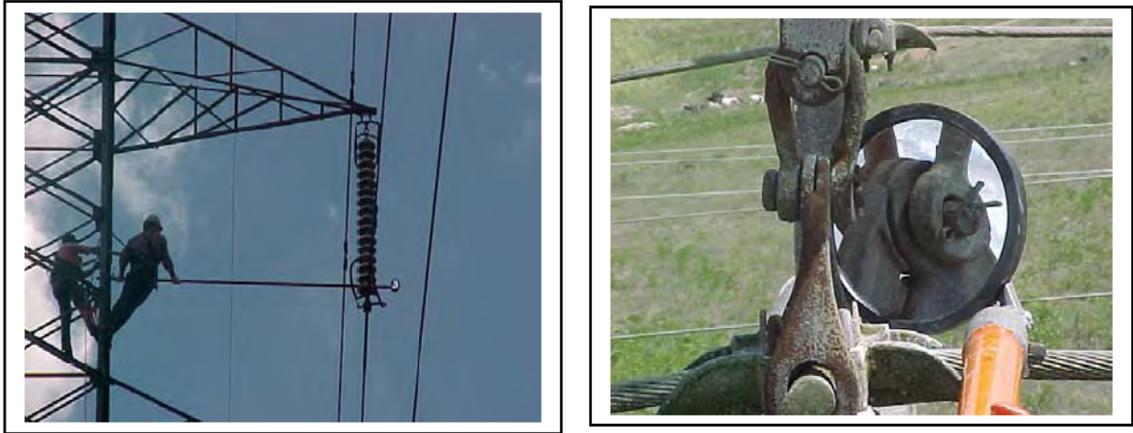


Figura 2.2 – Inspeção visual do revestimento de silicone em isolador de compósito com linha viva, 2 30kV da CHESF (PAIVA; SIMÕES, 2009)

A malha de transmissão da CHESF ultrapassa os 18.000km, onde estão aplicados cerca de 40.000 isoladores de compósito. A figura 2.3, mostra esquematicamente essa malha. (PAIVA; SIMÕES, 2009)

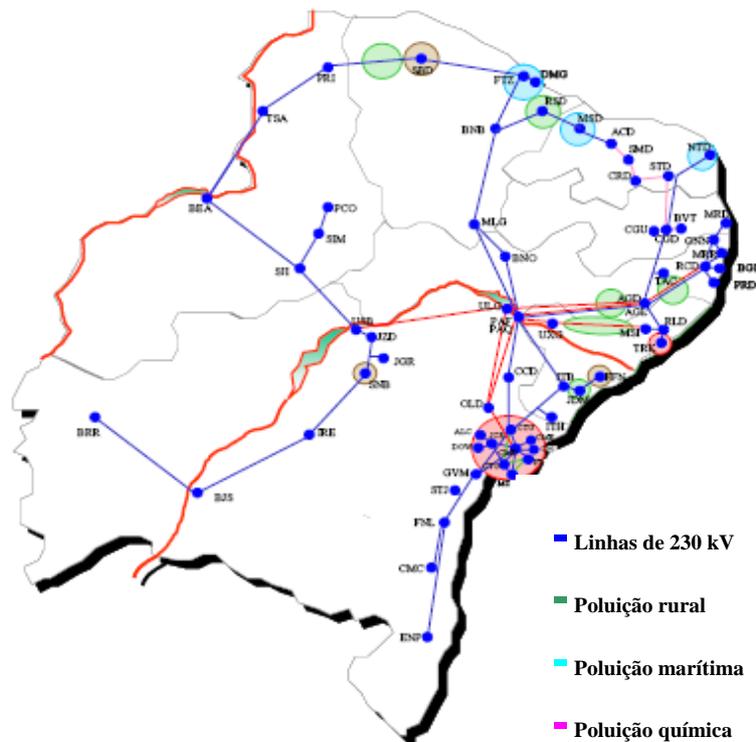


Figura 2.3 – Linhas de transmissão da CHESF – 230 kV (PAIVA, SIMÕES MIGUEL. 2009)

2.2 Constituição dos isoladores de compósito

Os isoladores de compósito para linhas de transmissão são constituídos basicamente de quatro materiais: uma matriz de epóxi com fibras de vidro de alta resistência mecânica, compondo o um bastão (Núcleo), um revestimento de silicone e terminais metálicos de aço galvanizado.

Seu núcleo tem como finalidade principal, suportar o esforço de tração solicitado pelos cabos de força. O revestimento de silicone tem como finalidades: aumentar a distância dielétrica, proporcionando um melhor isolamento entre linhas e o terra e proporcionar um isolamento entre o núcleo de fibra de vidro e os agentes degradantes e a umidade, do meio ambiente. Os terminais em aço são fixados às extremidades do bastão e tem a finalidade de permitir a conexão com as estruturas metálicas e os cabos de força. As figuras 2.4 a 2.6 mostram os tipos de terminais utilizados.

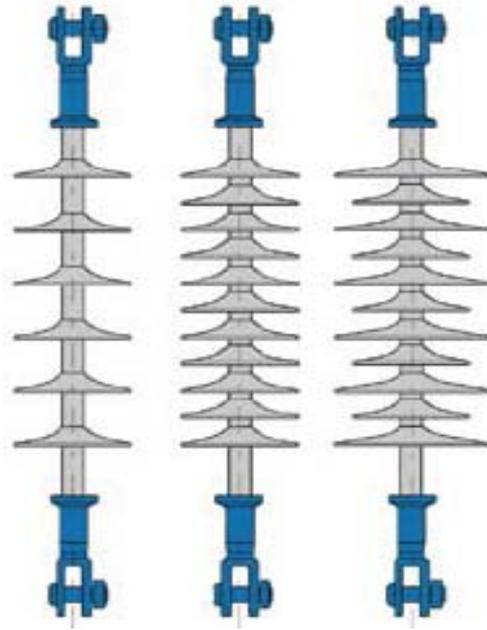


Figura 2.4 – Isoladores de compósito completos (ARMENTROUT D, 2003)

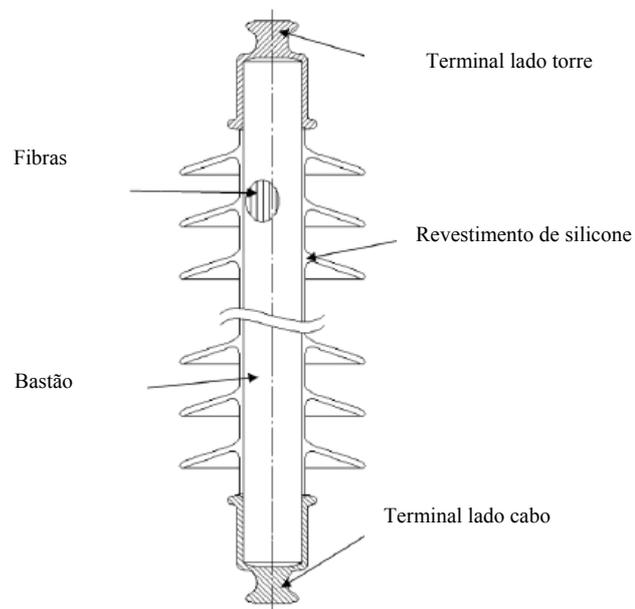


Figura 2.5 – Componentes do isolador (ARMENTROUT D, 2003)



Figura 2.6 - Tipos de terminais (PFISTERER- 2009)

2.3 Processo de fabricação dos isoladores de compósito

A fabricação dos isoladores de compósito constitui-se das seguintes fases:

Primeira - Fabricação do bastão de fibra de vidro, através do processo de pultrusão, que consiste em se unir diversos fios de fibra, vindos de um conjunto de carretéis, puxados por rolos extratores. Passam por uma impregnação de resina, depois por uma matriz, onde são pré-conformados, ainda passam por uma matriz de cura e finalmente cortados nos tamanhos definidos. As figuras 2.7 e 2.8 mostram esta fase da fabricação (PFISTERER, **Composite insulators-Technical factors**).

Pultrusão

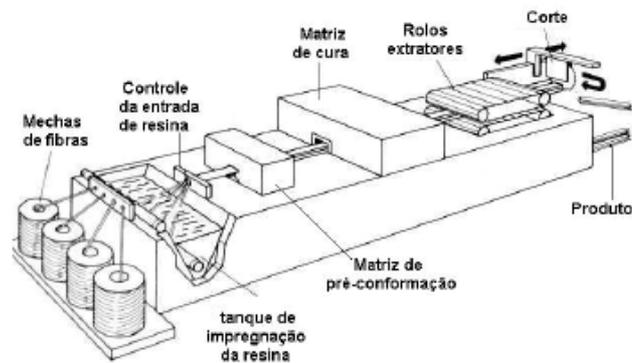


Figura 2.7 – Processo de pultrusão de bastões – (PFISTERER - 2009)



Figura 2.8 – Bastões de fibra - (PFISTERER - 2009)

Segunda- Fixação dos terminais metálicos ao núcleo já revestido. Esta fixação deve ser feita sob pressão, de forma controlada para garantir sua eficiência e segurança, sem danificar a estrutura do núcleo.

Este processo é feito através de uma máquina de crimpagem, cuja pressão de operação tem que ser suficiente para garantir que o conjunto suporte o esforço de tração e também não seja alto o bastante para cisalhar ou danificar a estrutura do bastão de composto. A figura 2.9 mostra o detalhe do posicionamento do terminal e do bastão na máquina de crimpagem e a figura 2.10 o resultado da crimpagem de um terminal metálico. PFISTERER,



Figura 2.9 – Crimpagem do terminal no bastão - (PFISTERER – 2009)



Figura 2.10 – Resultado da crimpagem de terminal no bastão – (PFISTERER 2009)

Terceira – Fabricação do revestimento do núcleo com material de silicone em moldes especiais, através de injeção, com alta pressão e temperatura controlada. Este revestimento tem um perfil desenhado de forma a aumentar a distância dielétrica entre seus terminais e deve ser aderente ao núcleo. A fig. 2.11 mostra um desses moldes utilizados na confecção do revestimento de silicone.

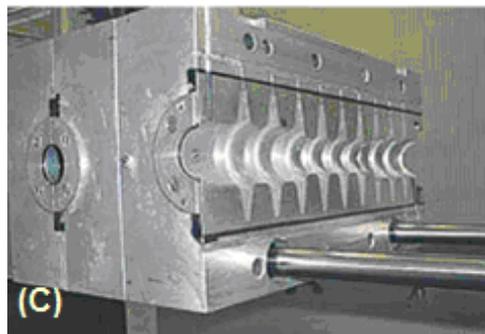


Figura 2.11 – Molde de injeção para confecção do revestimento de silicone (PFISTERER 2009)

Os revestimentos são compostos semi-orgânicos com o silício na cadeia principal, combinado principalmente com o oxigênio.

Uma característica importante da cobertura polimérica é a hidrofobicidade, ou seja, a capacidade do material em impedir que a água se acumule em sua superfície. Uma característica importante para evitar descargas elétricas entre o isolador e a torre de transmissão.

Esta propriedade pode ser perdida por deposição de poluentes e degradação do polímero. O EPDM (etileno propileno dieno), resinas epóxis, elastômeros termoplásticos, e mais recentemente, polidimetilsiloxano (PDMS) têm sido usados como material de cobertura em isoladores de compósito, porém, ao contrário dos demais materiais, por apresentarem a capacidade de recuperar a hidrofobicidade, o silicone (PDMS) está se tornando mais popular em aplicações em isoladores elétricos (SOVAR, 2004).

Segundo Silveira A. P (Enersul). A vida útil de isoladores poliméricos, estimada entre 25 e 30 anos, pode cair para algo em torno de 10 e 15 anos, em regiões com alto índice de poluição.

É importante se levar em consideração a região de aplicação dos isoladores e se fazer um estudo considerando a questão da poluição no local.

A hidrofobicidade da cobertura polimérica em isoladores de compósito é superior a dos isoladores cerâmicos.

2.4 Ensaios de fábrica

A CHESF adota a norma IEC 1109 como referência para realização dos ensaios em fábrica, os quais visam garantir a performance, elétrica e mecânica, do projeto e método de produção utilizado pelo fabricante.

A IEC subdivide os ensaios aos quais os isoladores são submetidos como:

- Design Tests - Tem como finalidade verificar a adequação do projeto, materiais e métodos de fabricação

- Type Tests – Têm a finalidade de verificar as características principais do isolador, que dependem da sua forma e tamanho. Devem ser aplicados em isoladores pertencentes a uma classe já aprovadas nos Design Tests

- Simple Tests – Têm a finalidade de verificar as características que dependem da qualidade de fabricação e materiais utilizados. A amostra deve ser retirada do lote oferecido para aceitação.

- Routine Tests – Têm a finalidade de eliminar os isoladores com defeitos de fabricação e devem ser realizados em todos os isoladores do lote a ser fornecido.

Dentre os testes realizados em fábrica está incluído o ensaio de líquido penetrante, o qual é realizado na ocasião do teste de tração para se verificar a ocorrência de descolamento do terminal com o bastão . O procedimento de teste é o descrito no Código ASME V.

Estes ensaios não podem mais ser realizados após a aplicação dos isoladores nas linhas de transmissão. Acontece, porém, e a experiência tem nos mostrado que, com o passar do tempo, surgem trincas nos revestimentos, expondo o bastão, expondo o bastão ao meio ambiente, dando início a um processo de degradação, pondo em risco a linha de transmissão e o fornecimento de energia.

A figura 2.12 mostra um isolador posicionado numa máquina de tração horizontal, em fábrica e a figura 2.13, a inspeção dimensional do terminal com um gabarito passa-não-passa.



Figura 2.12 – Máquina de tração horizontal – (PFISTERER – 2009)



Figura 2.13 – Inspeção dimensional do terminal com passa-não-passa – (PFISTERER – 20009)

2.5 Defeitos de fabricação

Uma série de defeitos pode surgir por problemas do processo de fabricação ou falha humana.

A Norma IEC-1109, no seu item 9.1 (Visual Examination) determina que todos os isoladores devem ser examinados visualmente e que defeitos superficiais com áreas menores que 25mm² podem ser aceitos, desde que a soma total desses defeitos não ultrapasse a 0,2% da área total da superfície do isolador e nenhuma com profundidade superior a 1mm.

A especificação da CHESF ET-DSE-160 – Jan. 2006, no seu item 1.3.2.2 (Revestimento) cita claramente que o material do revestimento deve, entre outras coisas, ser resistente a fissuras.

2.6 Degradação do Material de Revestimento de Silicone, Geração de Trincas e Ruptura por Fratura Frágil

Apesar da performance superior do material de silicone em relação a outros materiais utilizados na cobertura polimérica do núcleo de composto dos isoladores elétricos, tais materiais também sofrem degradação sob a ação de chuva ácida e radiação UV, por exemplo, perdendo algumas de suas propriedades importantes.

Os modelos propostos para explicar a degradação do silicone que reveste o núcleo do isolador sugerem que a degradação ocorre devido à dissolução e transformação da carga ATH

em nitrato de alumínio $\text{Al}(\text{NO}_3)_3$, pela ação do ácido nítrico formado devido às descargas corona na superfície do isolador. Neste tipo de deterioração ocorre a formação de fissuras na superfície dos isoladores.

As reações de dissociação dos grupos C-H e Si-C produziria radicais livres que resultariam em perda de grupos metil (CH_3) presentes na amostra (WANG, et al., 1998; IMAKOMA, et al., 1994; SUNDARARAJAN, et al., 2008; HAMID, et al., 2008 e CHAIPANIT, et al., 2001). Na Figura 2.14 são mostradas as reações de fragmentação das ligações silício-carbono. Outro efeito da deterioração, associado à dissolução do carbonato de cálcio (CaCO_3), também utilizado como carga, é o aumento da dureza do silicone, com conseqüente perda de elasticidade e fragilização do material. Essa fragilização propicia o aparecimento de trincas e exposição do bastão. (ZHU, et al., 2005; LIU, et al., 2005; KOSHINO, et al., 1998a, 1998b; JESTIN, et al., 2008; KRIVDA, et al., 2006).

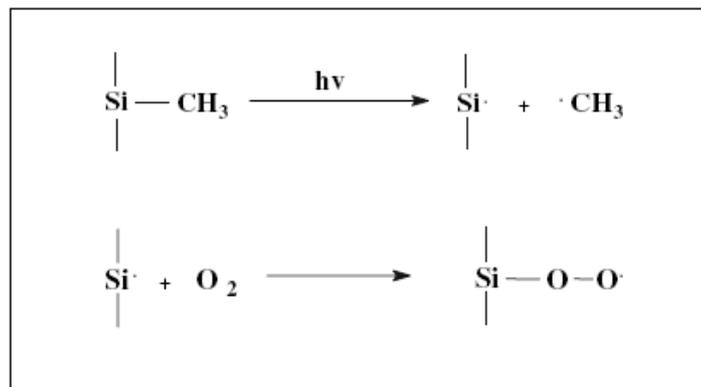


Figura 2.14. Reações de fragmentação das ligações silício-carbono por degradação do silicone (HAMID et al., 2008).

Uma das maneiras de se fazer a verificação da existência de trincas no revestimento é o ensaio radiográfico (PIETRO, 2009).

Os isoladores usados em linhas de transmissão, de um modo geral, ficam sujeitos a vários tipos de cargas, tanto mecânicas como elétricas. Além disso, também ficam sujeitos a diferentes níveis de agressões devido às intempéries, como chuva, radiação solar, umidade, poeira, etc. Todos esses fatores juntos podem levar os isoladores a terem um tempo de vida abaixo do esperado, causando um fenômeno chamado de “*brittle fracture*” (fratura frágil) ou “*stress corrosion cracking*” que na verdade é o rompimento destes isoladores sob devidas circunstâncias que o diferem do fenômeno da fratura normal (GUIDE, 1992). Normalmente a fratura frágil tem características tais como: a região de fratura possui uma parte lisa e outra referente às fibras quebradas, a resina e a fibra rompem-se no mesmo plano, e a região de

fratura é na maioria perpendicular ao eixo do isolador (GUIDE, 2003; CARPENTER; KUMOSA, M., 2000). Na Figura 2.15 é mostrada uma região em que ocorreu uma fratura frágil e como comparação, na Figura 2.16 é mostrada uma região onde ocorreu fratura que não é considerada fratura frágil.

O fenômeno da fratura frágil já vem sendo investigado há bastante tempo por vários grupos de pesquisa ao redor do mundo e seus primeiros registros datam de 1970, na África do Sul e na Itália, onde as primeiras gerações de isoladores de compósito foram instaladas (SCHMUCK; TOURREIL, 2003). Apesar disso, ainda existem alguns pontos necessitando de esclarecimento, pois o fenômeno ainda não está satisfatoriamente compreendido a ponto de ser evitado. Nas Figuras 2.15 a 2.19 pode-se visualizar uma região em que houve a fratura frágil, em diferentes ampliações, em um isolador de compósito de 115 kV.



Figura 2.15 - Região em que ocorreu fratura frágil em isoladores de compósito (GUIDE, 2003).

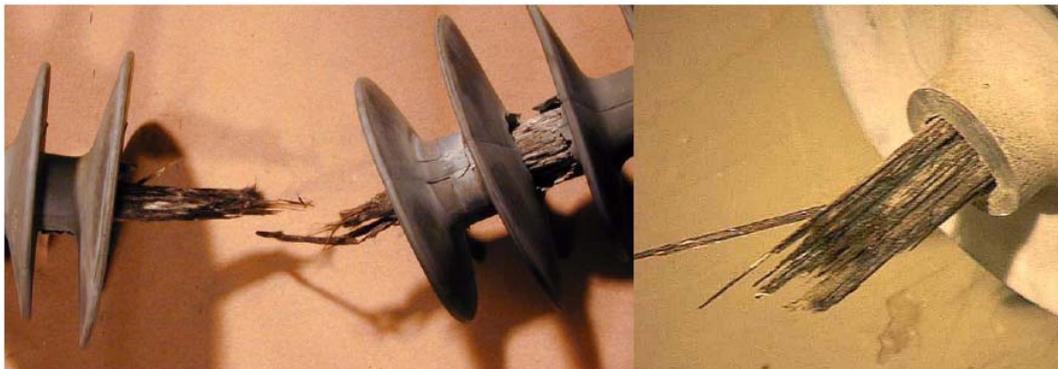


Figura 2.16 - Regiões onde ocorreram fraturas mecânicas não caracterizadas como fratura frágil (GUIDE, 2003).

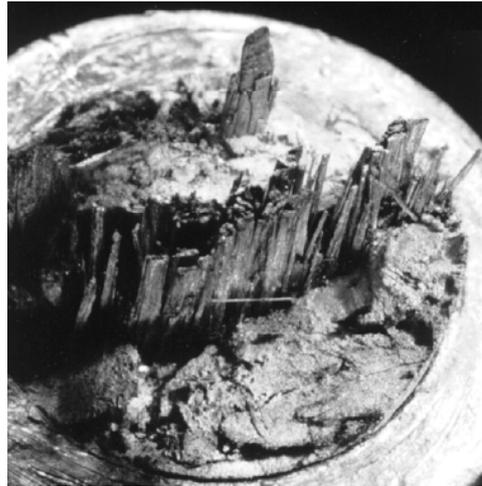


Figura 2.17. Zona de danos em um bastão de isolador de compósito, próxima à extremidade de aço em um isolador de 115 kV que falhou em serviço (KUMOSA, M.et al., 2002).

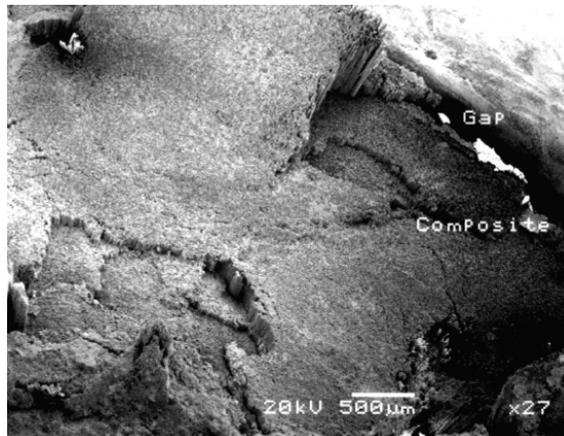


Figura 2.18. Superfícies de fratura no bastão de compósito com ampliação de 27 vezes (KUMOSA, et al., 2002).

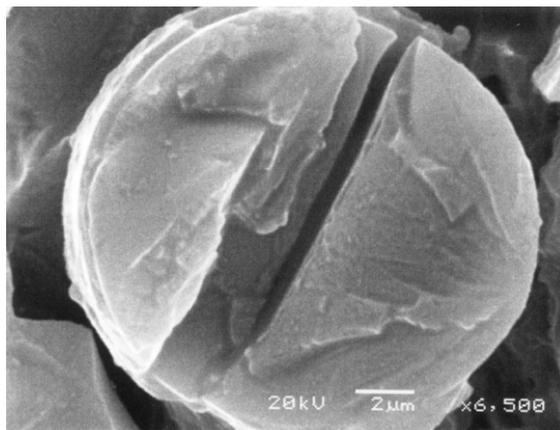


Figura 2.19. Superfície da fratura com ampliação de 6500 vezes (KUMOSA, et al., 2002).

Um relatório recente avaliou o número de fraturas frágeis que ocorreram em alguns países, obtendo um valor que está entre 100 e 200 unidades por ano. Este número corresponde a 0,005% do total de isoladores, que já chega a mais de 3 milhões, tendo os EUA o maior número de fraturas frágeis (BRITTLE, 2000; BURNHAM et al., 2002). A causa provável está

no fato de que os EUA têm a maior variedade de aplicações de isoladores de compósito com diferentes designs. Também foi encontrada uma relação entre a tensão da linha de transmissão e o número de fraturas frágeis, provavelmente porque quanto maior a tensão transmitida pelos cabos maiores os níveis de campo elétrico em cima dos isoladores (SCHMUCK; TOURREIL, 2003). Na Figura 2.20, no eixo horizontal, são mostrados os números de fraturas frágeis registradas nos países, e as tensões das linhas de transmissão conforme legenda. O valor para o Brasil refere-se aos dados da Chesf.

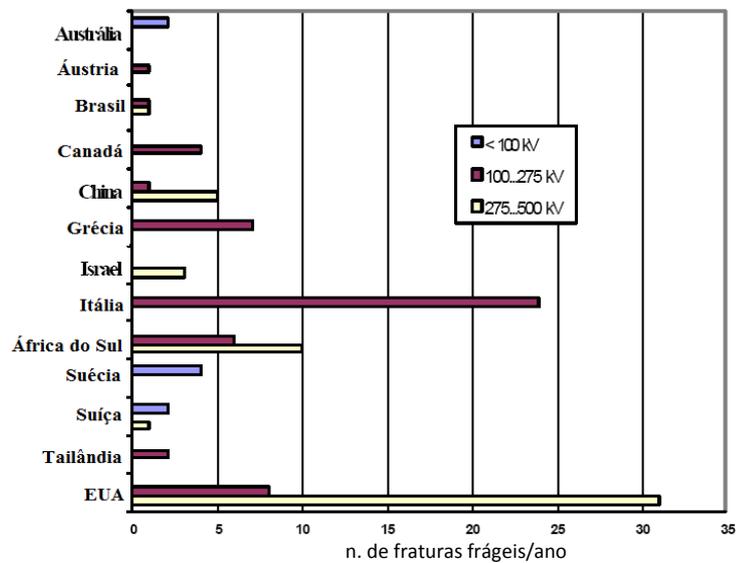


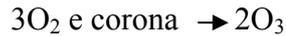
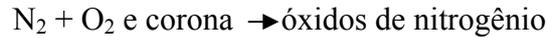
Figura 2.20 - Ocorrências de fraturas frágeis (modificada de BRITTLE, 2000; BURNHAM et al., 2002; PAIVA; SIMÕES, 2009).

Existem vários modelos para explicar a causa da ocorrência da fratura frágil (BURNHAM et al., 2002; KUMOSA, M.; QIU, 1996; KUMOSA, M. et al., 1997; MONTESINOS et al., 2002; TOURREIL et al., 2000) e os pontos importantes destacados são: umidade, temperatura, efeito corona, vibração, altas tensões mecânicas e poluição. Estudos recentes mostram que ocorre a formação de ácido nítrico na superfície dos isoladores sob determinadas condições. Tais estudos atribuem a formação de ácido nítrico na superfície polimérica (CHUGHTAI, et al., 1998) somada às altas tensões mecânicas como fatores preponderantes no mecanismo de fratura frágil. (ELY, et al., 2001; KUMOSA, M., 2005; KUMOSA, L. et al., 1998, 2000; ELY; KUMOSA, M., 2000).

Durante o processo, átomos de alumínio, ferro, magnésio, cálcio e titânio das fibras de vidro são substituídos por íons de hidrogênio. Este processo enfraquece as fibras, que podem ser facilmente quebradas, até mesmo sob baixas tensões mecânicas (KUMOSA, M. et al., 2005).

Um dos modelos explica que a junção do oxigênio, nitrogênio, efeito corona e água podem formar ácidos de acordo com as reações (TOURREIL et al., 2005; KUMOSA, M. et al., 2004):

Reações primárias



Reações secundárias



Na Figura 2.21 são mostradas duas fotos de isoladores de compósito utilizados em LT's pela Chesf que fraturaram em serviço. Na Figura 2.22 é mostrada a evolução de uma trinca formada na cobertura polimérica de um isolador de 500 kV provavelmente devido à ação dos ácidos (KUMOSA, M., 2005). O crescimento dessas trincas poderá permitir o ataque dos ácidos formados na superfície dos isoladores ao bastão do isolador e, ao chegarem ao material compósito, tais trincas evoluem rapidamente dando margem à ocorrência de sua posterior fratura.

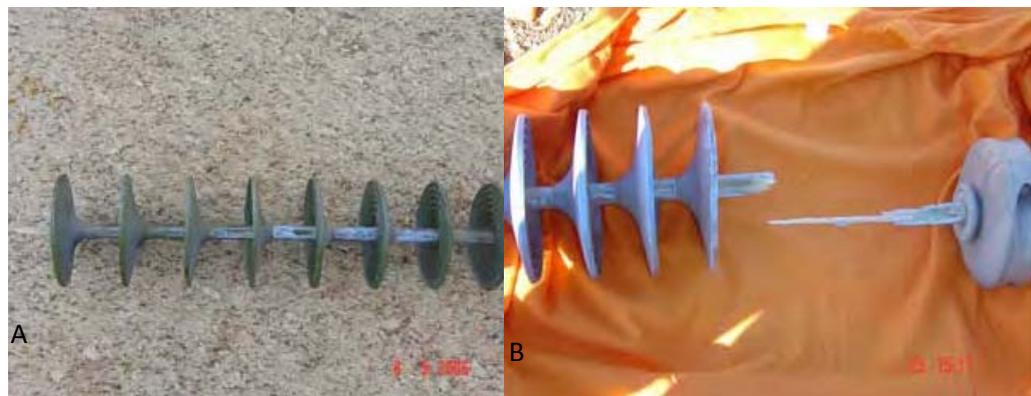


Figura 2.21 - Isoladores de compósito utilizados em LT's da Chesf que fraturaram em serviço. (A) Linha de 230 kV; (B) Linha de 500 kV (PAIVA; SIMÕES, 2009).

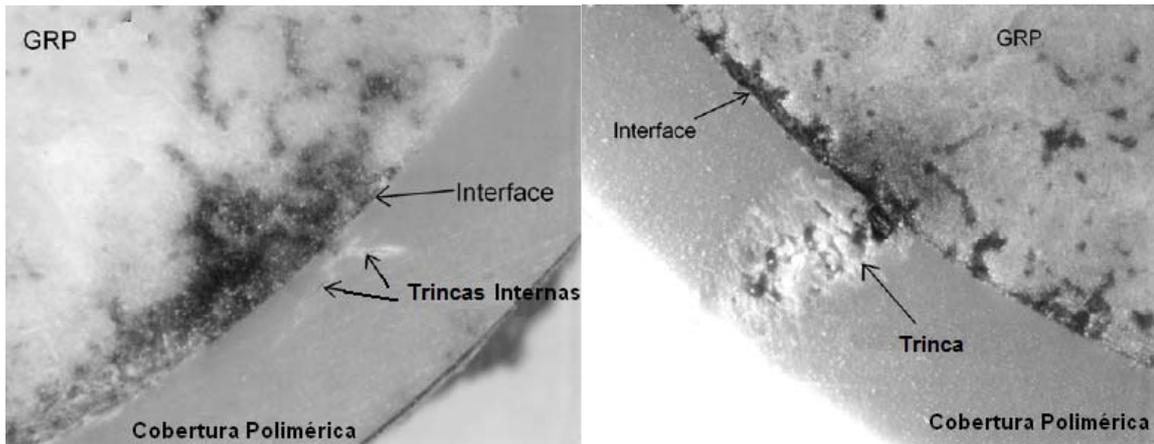


Figura 2.22 - Trincas na cobertura de borracha e diferentes estágios de sua formação (KUMOSA, M., 2005).

Estudos sugerem o uso de fibras de vidro com baixo teor de boro para a composição do bastão dos isoladores, pois tais fibras teriam maior resistência à fratura frágil do que as normalmente utilizadas (ARMENTROUT et al., 2003).

Algumas fibras são revestidas com filmes da ordem de dezenas de nanômetros com a finalidade de proteção. Segundo Montesinos, et al. (2002), fibras revestidas com “sizings” a base de organosilanos têm resistência efetiva contra o ataque de substâncias corrosivas. Em função disso, o estudo sugere que a interface resina/fibra deve ser intermediada por camadas protetoras de *sizings*, formando uma interface resina/*sizing*/fibra. Na Figura 2.23 é mostrado um esquema ilustrando o processo inicial de ataque da corrosão, mostrando que a fibra revestida com camada nanométrica protetora resiste ao ataque dos ácidos que corroeram a resina.

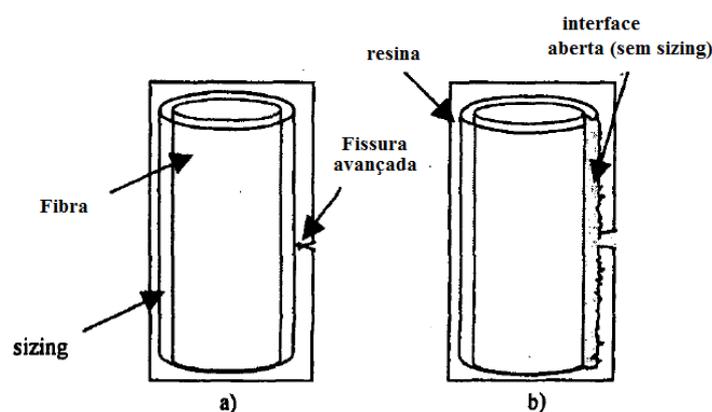


Figura 2.23 - Cenários iniciais para a corrosão da fibra. (a) Sistema eficiente resina/*sizing*/fibra. (b) Interface aberta (desprotegida) da ação dos ácidos (MONTESINOS et al., 2002).

Atualmente não existe norma que regulamente um controle na produção dos isoladores de compósito, ficando o cliente que compra o produto sem nenhuma garantia da qualidade. Esta qualidade do produto poderia ter relação direta com o tempo de vida útil destes

isoladores, pois se apresentassem defeitos na fabricação, tais defeitos poderiam comprometer sua resistência a tensões mecânicas e elétricas intensas.

2.7 A radiografia

2.7.1 Conceitos

Os raios X e os raios gama, são formas de radiação eletromagnéticas de natureza ondulatória, isto é, propagam-se em forma de ondas. Possuem alta frequência e, pequeno comprimento de onda.

O comprimento de ondas desses raios é menor que o da luz visível, dos raios ultravioleta e infravermelho. Conforme mostrado na figura 2.24.

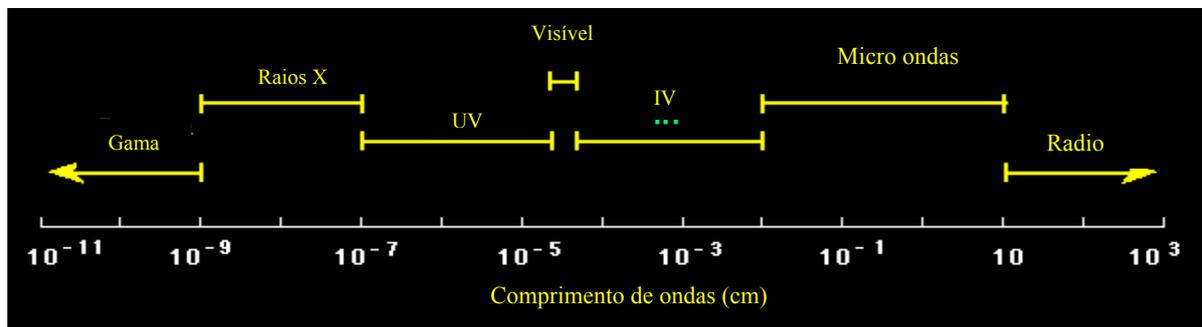


Figura 2.24 – Espectro eletromagnético – (ICGFI/FAO/IAEA)

2.7.2- Unidades geradoras

Os equipamentos de Raios X industriais se dividem geralmente em dois componentes: A unidade geradora e o painel de controle. Figuras 2.26 e 2.27, respectivamente



Figura 2.25 - Unidade geradora - (ERESCO 65 MF4-W – 2009)



Figura 2.26 – Unidade de controle – (ERESCO MF4 – 2009)

- Unidade Geradora

Na unidade geradora está alojada a ampola e os dispositivos de refrigeração. A conexão entre a unidade e o painel de controle é feita através de cabos especiais de alta tensão.

As principais características da unidade são:

a – Tensão máxima;

A tensão se refere à diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo e é expressa em quilovolts (kV)

b - Corrente elétrica máxima;

Refere à corrente elétrica no tubo e é expressa em miliamperes (mA).

c - Tamanho do ponto focal;

É a área do alvo bombardeada pelos elétrons

d - Tipo de feixe de radiação (direcional ou panorâmico);

Depende da forma do anodo. Quando em forma plana, e angulada, propicia um feixe de radiação direcional, e quando em forma de cone, propicia um feixe de radiação panorâmico, isto é, irradiação a 360 graus.

e - Peso e tamanho.

Definem as possibilidades e limitações do aparelho quanto à utilização.

Os equipamentos considerados portáteis, com tensões até 400 kV, possuem peso em torno de 40 a 80 kg, dependendo do modelo.

f- Painel de controle

O Painel de Controle consiste em uma caixa onde estão alojados todos os controles, indicadores, chaves e medidores, além de conter todo o equipamento do circuito gerador de alta voltagem. É através do painel de controle que se fazem os ajustes de voltagem e amperagem, além de comando de acionamento do aparelho.

Filmes radiográficos

Os filmes radiográficos são constituídos de uma emulsão, na qual estão dispersos minúsculos cristais de brometo de prata aplicados em um suporte, denominado Base que é feita de um derivado geralmente derivado de celulose.

Os cristais de brometo de prata quando atingidos pela radiação, tornam-se susceptíveis de reagir com um produto químico chamado revelador. O revelador atua sobre esses cristais provocando uma reação de redução que resulta na prata metálica negra.

Os locais do filme, atingidos por uma quantidade maior de radiação apresentarão, após reação com o revelador, um número maior de grãos negros, que as regiões menos atingidas pela radiação com menor intensidade. Isto permite que, sob a ação da luz, sejam observadas as regiões claras e escuras, compondo a imagem da peça radiografada, figura 2.28.

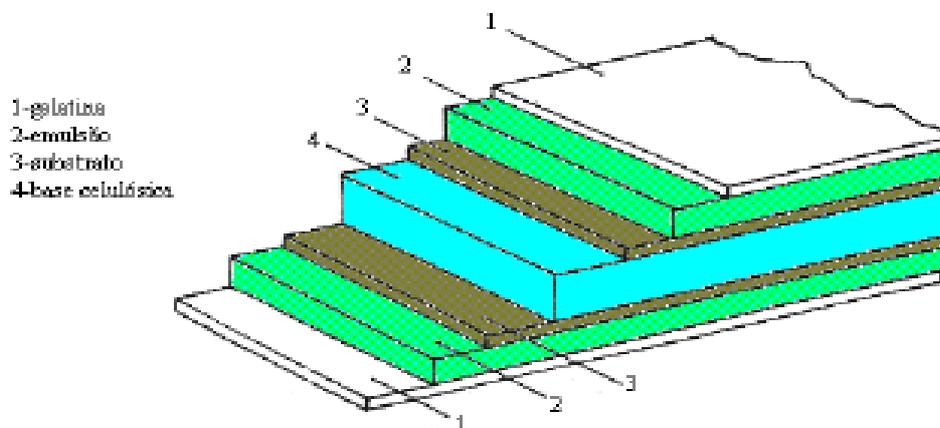


Figura 2.27 – Filme radiográfico. (SCHIMIDT, 2004)

Os filmes radiográficos industriais são capazes de formar imagens apenas dentro de certa escala de densidade óptica, mas nem sempre todas as discontinuidades podem ser detectadas (SIMÕES, et al., 2008).

2.7.3 Granulação

Granulação é o agrupamento das partículas de sal de prata na emulsão da película.

As partículas de sais de prata dispersas na emulsão não são vistas a olho nu. Entretanto quando unidas em massa relativamente grande podem ser observadas.

Os filmes mais rápidos apresentam uma granulação mais acentuada que os filmes lentos.

A granulação é característica da cada filme. Quanto menor o tamanho do grão melhor a definição da imagem.

2.7.4 *Densidade óptica*

Densidade óptica é o grau de enegrecimento do filme.

A imagem formada no filme radiográfico possui áreas claras e escuras evidenciando certo grau de enegrecimento que denominamos de densidade. Matematicamente expressamos a densidade como sendo o logaritmo da razão entre a intensidade da luz visível que incide no filme e a intensidade que é transmitida e visualmente observada. A densidade é calculada a partir da equação abaixo.

$$D = \log (I_0/I)$$

Sendo: I_0 = Intensidade de luz incidente

I = Intensidade de luz transmitida

Pela equação acima podemos dizer que quanto maior for a intensidade do RX, mais escuro será o filme.

O instrumento utilizado para medir a densidade é o densitômetro. Ele mede a quantidade de luz que atravessa determinada região do filme e, a partir da quantidade luminosa incidente conhecida, fornece a densidade óptica.

2.7.5 *Contraste*

É a medida da diferença na densidade do filme entre duas regiões adjacentes, expostas à radiação. Por exemplo: se medirmos a densidade de duas áreas adjacentes de um filme e encontramos os valores $D_1=2$, e $D_2=1,7$ - O contraste será dado pela diferença entre D_2 e D_1 , ou seja 0,4.

2.7.6 *Exposição*

É uma medida de quantidade de radiação que atinge um filme. Ela é representada pelo produto da intensidade da radiação pelo tempo que o filme fica exposto.

2.7.7 *Velocidade ou Sensibilidade*

É o fator que determina a quantidade de radiação que o filme deve receber para obter uma determinada densidade.

A velocidade é uma característica própria de cada filme. Está relacionada com o tamanho do grão dos cristais de prata dispersos na emulsão. Quanto maior o tamanho dos cristais mais rápido é o filme. Uma imagem formada por grãos de grandes dimensões é mais grosseira, ou seja, menos nítida. Portanto, quanto mais rápido o filme, menos nítida será sua imagem (KODAK, 1980)

2.7.8 *Tipos de filmes*

Existem vários tipos de filmes para raios-X industrial. Variam de acordo com a relação sinal-ruído, velocidade de resposta à radiação e granulação.

Filmes de granulação muito fina apresentam uma alta relação sinal-ruído. Requerem comparativamente maiores quantidades de radiação na exposição para produzirem imagens com excelente resolução de detalhes.

Tipo A – Granulação extremamente fina e muito alto contraste. Esse tipo de filme deve ser usado quando se deseja obter uma alta qualidade de imagem em componentes eletrônicos e ligas leves. Pode ser usado em exposição direta ou com telas intensificadoras.

Tipo B - Granulação ultrafina, alto contraste e qualidade. Deve ser usado em ensaios de metais leves ou pesado, ou seções espessas, com radiação de alta energia. Sua granulação não é muito fina como a dos filmes tipo A, mas sua maior velocidade torna-os de grande utilidade prática. É um filme ideal para ampliações ópticas.

Tipo C – Média velocidade, alto contraste, granulação extrafina. Podem ser usados com ou sem telas intensificadoras e com radiação de alta energia.

Tipo D – Filme com granulação muito fina, com alta velocidade e com alto contraste quando utilizado em conjunto com telas intensificadoras de chumbo.

Tipo E – Filme de granulação fina, com alto contraste e velocidade. É o filme mais utilizado na indústria em razão do atendimento em qualidade e maior produtividade.

Tipo F – Filme de granulação média, pouco utilizado na indústria.

A ASTM classifica os filmes em quatro classes.

Classe especial – Apresenta altíssima relação sinal-ruído. São filmes de alta resolução de detalhes e muito lentos.

Classe 1 – Com alta relação sinal-ruído.

Classe 2 – Considerada de moderada relação sinal-ruído.

Classe 3 – Baixa relação sinal-ruído.

A tabela 2.1 apresenta a equivalência entre os filmes segundo os sistemas de classificação das normas EN 584-1, ASTM E-1815-96, ISO 11699-1 e JIS-K7627. Estas normas identificam os vários tipos de filmes de raios X, classificando-os quanto as suas performances.

Tabela 2.1 – Classificação dos filmes (CATÁLOGO AGFA)

Qualidade de imagem & classes dos filmes				
Tipo de filme AGFA NDT	CEN EM 58 4- 1	ASTM E 1815 - 96	ISO II699 - 1	JIS - -K7627
D2	C1	Especial	T1	T1
D3	C2	I	T1	T1
D4	C3	I	T2	T2
D5	C4	I	T2	T2
D7	C5	II	T3	T3
D8	C6	III	T4	T4

Os fabricantes de filmes radiográficos procuram produzir algumas variedades de filmes, de forma a atender a uma gama de aplicações e que sejam economicamente viáveis.

A AGFA produz diversos filmes. Cada um com suas características e aplicações específicas. Conforme mostra a tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Características e aplicações de filmes (CATÁLOGO AGFA)

Referência	Característica	Aplicação
AGFA NDT D2	Grão extremamente fio e contraste muito alto. Ideal para exposição que requerem nitidez de detalhes.	Componentes eletrônicos, compósitos, ligas leves fundidas. Múltiplas técnicas.
AGFA NDT D3	Grão ultrafino, contraste muito alto. Para exposição direta ou com écrans. Pode utilizar tanto raios X como raios gama.	Componentes eletrônicos, compósitos, soldas de alta qualidade, indústria nuclear, indústria aeronáutica e espacial. Múltiplas técnicas.
AGFA NDT D4	Grão extrafino, contraste muito alto. Largamente utilizado em diversas aplicações.	Componentes eletrônicos, compósitos, fundidos, soldas de alta qualidade, indústria nuclear, aeronáutica e espacial Múltiplas técnicas.
AGFA NDT D5	Grão muito fino, contraste alto. Excelente para visualização de descontinuidades	Soldas, fundidos, indústria naval, aeroespacial e aeronáutica. Múltiplas técnicas.
AGFA NDT D7	Grão fino, contraste alto e alta velocidade	Soldas, fundidos, indústria naval, aeroespacial e aeronáutica. Múltiplas técnicas.
AGFA NDT D8	Grão médio, contraste alto e velocidade muito alta. Indicado para exposição direta ou com utilização de écrans. Proporciona boas imagens com um curto tempo de exposição	Concreto, construções pesadas e fundidos. Múltiplas técnicas.

2.7.9 Curva Característica do Filme de Raios-X

A curva característica de um filme, chamada curva sensitométrica ou curva H&D (Hunter-Driffield), relaciona a exposição a qual um filme foi exposto com a densidade

resultante. A curva característica é a resposta de um tipo de filme à radiação de uma energia particular.

Como a densidade é um logaritmo, escalas log-log são usadas para plotar valores. Escalas log-log não fazem apenas a interpretação gráfica, mas também todos os valores da exposição relativa podem ser derivados facilmente, subtraindo um valor do outro.

2.7.10 Definição de imagem

Observando-se com detalhe a imagem formada no filme radiográfico, veremos que a mudança de densidade uma área para outra não se faz de forma brusca. A imagem apresenta uma região de transição entre as duas bordas, com uma densidade intermediária. Quanto mais estreita for esta faixa de transição melhor será a definição da imagem.

Caso as fontes se resumissem a um ponto, teríamos uma imagem bastante nítida, porém na realidade as fontes não são pontuais e possuem dimensões definidas, fazendo com que na imagem do filme revelado surja uma área de penumbra, perdendo sua definição. Esta área de penumbra também sofre influência da distância fonte-objeto. Quando a distância fonte-filme for muito pequena, não a podemos desconsiderar, para efeito do cálculo da penumbra. A definição é função da dimensão da fonte de radiação e da posição do material situado entre a fonte e o filme.

Para obtermos imagens bem definidas ou próximas do tamanho do objeto, devemos ter:

- Diâmetro da fonte emissora de radiação deve ser o menor possível;
- A fonte emissora deve estar posicionada o mais afastado possível do material a ensaiar;
- O filme deve estar o mais próximo possível do material;
- O feixe de radiação deve se aproximar o mais possível, da perpendicularidade em relação ao filme;
- O plano do material e o plano do filme devem ser paralelos

2.7.11 Cálculo da Penumbra

Tendo em vista que a fonte de radiação proveniente do tubo de raios X não é pontual, sempre ocorre o efeito da penumbra geométrica, que é uma região sombreada na borda da imagem, correspondente a variações na geometria da peça. Quanto maior o tamanho do foco, maior a geração da penumbra.

Porém esse efeito está ligado à distância foco-objeto, objeto-filme e foco-filme, espessura da peça, ou seja; ao arranjo utilizado para se realizar a radiografia. As figuras 2.30 e 2.31, abaixo ilustram o fenômeno.

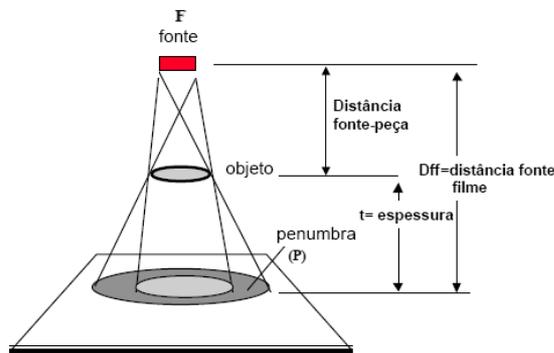


Figura 2.28 - Penumbra formada pela geometria do arranjo

Ponto focal pequeno

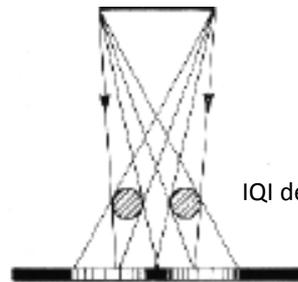


Imagem dos fios separada

Ponto focal grande

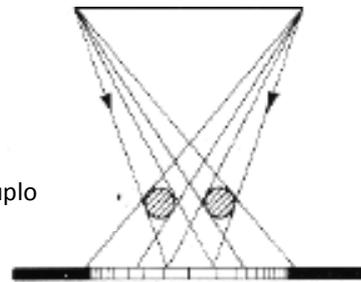


Imagem dos fios confundidas

Figura 2.29 – Influência do tamanho foco na imagem

A distância fonte-objeto (D) pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$D = \frac{F \times t}{U_g}$$

Onde:

U_g = Penumbra geométrica

F = Dimensão do ponto focal

t = Espessura do objeto

D = Distância da fonte ao objeto

O código ASME, no artigo 2 da seção V, define os valores máximos aceitáveis das penumbras em função da espessura do material, conforme tabela 2.3, abaixo.

Tabela 2.3 – Valores máximos aceitáveis para penumbra segundo ASME V

Espessura do material polegadas (mm)	Valor máx. da penumbra polegadas (mm)
abaixo de 2 (51 mm)	0,020 (0,508 mm)
de 2 até 3 (76 mm)	0,030 (0,76 mm)
acima de 3 até 4 (102mm)	0,040 (1,02 mm)
maior que 4 (102 mm)	0,070 (1,78 mm)

2.7.12 Indicadores da qualidade de imagem (IQI)

Alguns fatores interferem na qualidade da imagem obtida no filme. A alteração ou utilização inadequada de um desses poderá fazer com que detalhes da peça ou defeitos existentes não seja captados pelo filme, levando a se cometer erros nos laudos quanto à integridade da peça.

Importante se faz considerar os seguintes fatores:

- - Material inspecionado;
- - Tensão
- - Corrente
- - Tipo e espessura da tela;
- - Distância foco-filme;
- - Tipo de filme;
- - Tempo de exposição;
- - Tempo de revelação;
- - Temperatura de revelação

Para termos certeza de que a qualidade da imagem da radiografia está adequada, utilizamos pequenos dispositivos denominados de Indicadores da Qualidade de Imagem (IQI),

também chamados de Penetrômetros. Os IQI's devem ser de material radiograficamente similar ao material inspecionado e são colocados sobre a área de interesse.

Considerando a diversidade de materiais, necessário se faz a confecção de diversos IQI', de forma a se dispor de IQI's radiograficamente similares ao material que se quer radiografar. Tanto o ASME quanto a ASTM padronizam os IQI's segundo seus critérios.

2.7.13 IQI de fio duplo

Ele é constituído de uma série de pares de fios de alta densidade (tungstênio e platina), onde cada par de fios de diâmetro (d) está separado um do outro de uma distância igual a esse diâmetro. Conforme mostram as figuras 2.34 e 2.35.

A imagem revelada mostrar que a separação de determinado par de fio não poderá mais ser observada, fundindo-se as imagens em uma só. O diâmetro (d) deste par de fios é a medida da penumbra da imagem radiográfica. O IQI de fio duplo mede apenas a resolução espacial. A tabela 2.5 mostra os parâmetros do indicador

Atualmente sua principal utilização tem sido para medir a resolução espacial total nos radioscópios e em experimentos de laboratórios. A norma EN-462, parte 5: 1996 mostra as características deste IQI.

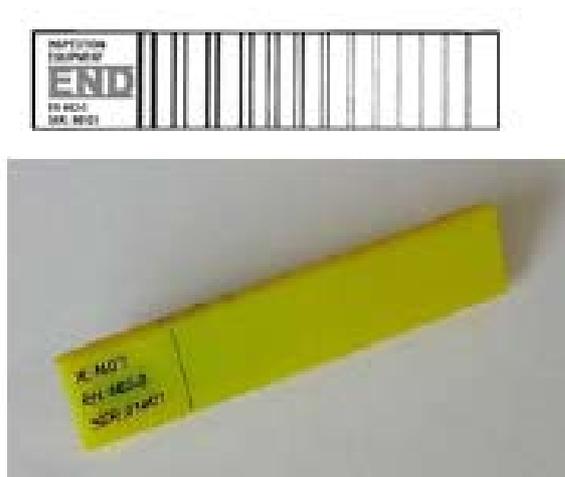


Figura. 2.30 – IQI ASTM tipo fio duplo. . OLIVEIRA, David F. Avaliação da qualidade de imagem em sistemas de radiografia computadorizada e image plates. Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/panndt.2007/papers/40.pdf>>. Acesso em abr. 2009

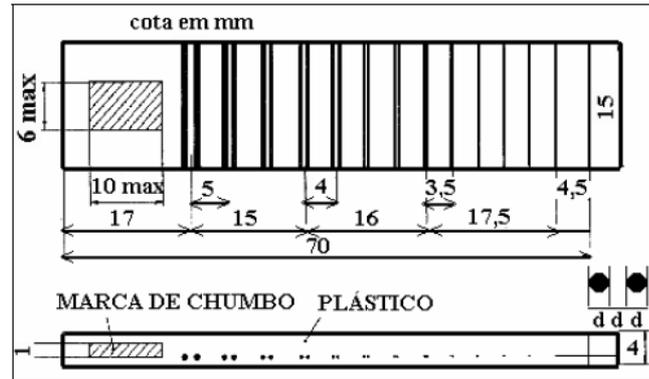


Figura 2.31 – IQI ASTM tipo fio duplo. OLIVEIRA, David F. Avaliação da qualidade de imagem em sistemas de radiografia computadorizada e image plates.

Tabela 2.4 – Parâmetros do IQI de fios duplos

Elemento	Desfocagem Geométrica (mm)	Diâmetro do fio (mm)	Tolerância	Pl/mm
13D	0,10	0,050	± 0,005	10,000
12D	0,13	0,063		7,936
11D	0,16	0,080		6,250
10D	0,20	0,100		5,000
9D	0,26	0,130		3,846
8D	0,32	0,160	± 0,01	3,125
7D	0,40	0,200		2,500
6D	0,50	0,250		2,000
5D	0,64	0,320		1,563
4D	0,80	0,400	± 0,02	1,250
3D	1,00	0,500		1,000
2D	1,26	0,630		0,794
1D	1,60	0,800		0,625

David F. Avaliação da qualidade de imagem em sistemas de radiografia computadorizada e image plates.

2.8 Radiografia computadorizada

A radiografia computadorizada utiliza os mesmos conceitos básicos da radiografia convencional, e podem utilizar tanto raios-X como gama. É uma técnica que utiliza o IP – “Image Plate”, que é um detector bidimensional que acumula a radiação ionizante utilizando fósforo foto estimulável, para formação de uma imagem latente. Após a exposição o Image Plate é inserido em um escâner especial a laser que converte a imagem latente em sinal digital, e o transfere para um computador para que forme a imagem digital.

A radiografia computadorizada oferece a vantagem de permitir o processamento e armazenagem das imagens digitalmente e uma das principais vantagens é a de que o image plate é cerca de dez vezes mais sensível que o filme convencional.

2.8.1 Image Plate - IP

Os IP's são constituídos de um suporte de poliéster, uma camada de fósforo foto estimulável, com grãos de aproximadamente $5\mu\text{m}$. Essa camada além de conter os grãos de fósforo, tem em sua composição um polímero orgânico de modo a unir os grãos e proporcionar uma formação uniforme do filme. A Figura 2.36 mostra um diagrama funcional (a) e a estrutura física das camadas de um IP

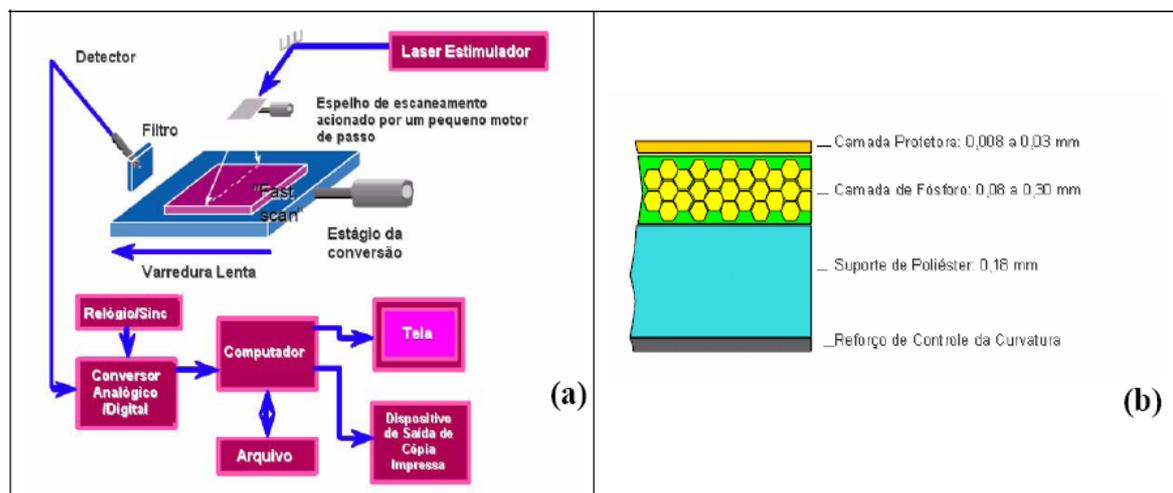


Figura 2.32 - Sistema digital (a) e composição das camadas de um IP (b). OLIVEIRA, David F

Os image plates apresentam linearidades superiores aos filmes convencionais. Como pode ser observado no gráfico da figura 2.37, o image plate é sensibilizado antes do filme convencional, comprovando que com um nível menor de energia a impressão da imagem se inicia.

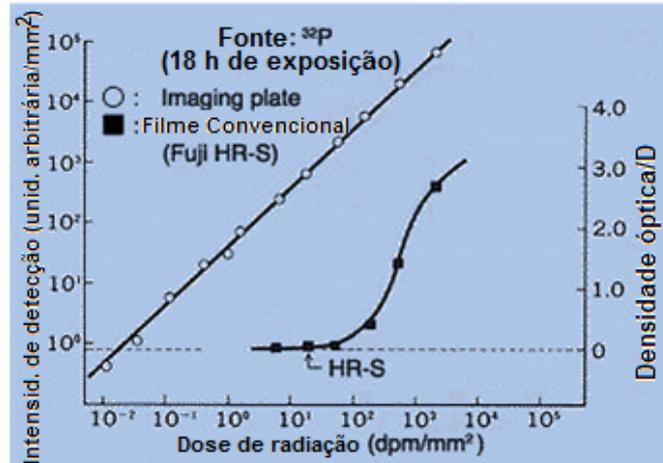


Figura. 2.33 – Comparação da linearidade dos detectores IP e filme de raios-X . (FUJI, 2008)

2.8.2 Processo de gravação e leitura

O processo de gravação e leitura da imagem nos filmes IP's baseia-se no fenômeno da estimulação dos cristais foto estimuláveis, que ao serem atingidos pela radiação ionizante, têm seus elétrons promovidos para níveis de energia mais altos. Quando um feixe de laser atinge a superfície do filme, os átomos excitados são estimulados e seus elétrons excitados decaem para níveis mais baixos, emitindo assim radiação visível que é detectada em um scanner especialmente projetado para este fim. Depois de utilizado, a informação gravada no filme IP pode ser apagada expondo-se a superfície do filme à luz branca. Tais filmes podem ser reutilizados diversas vezes. A figura 2.38 mostra a seqüência do processo de exposição, leitura e apagamento da imagem radiográfica, quando deixa o IP em condições para nova gravação.

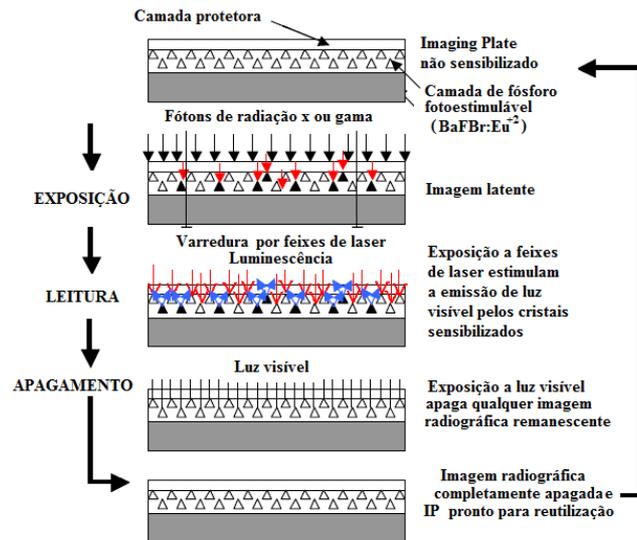


Figura 2.34 – Seqüência do processamento do IP. (por exemplo, SHINOHARA et al. , 2002)

2.9 Tomografia computadorizada

2.9.1 Princípios

A imagem obtida em ma tomografia computadorizada (TC), é uma imagem resultante do processamento informático dos dados de uma série de projeções angulares de raio X. Simplificadamente traduz uma secção transversal da peça que foi submetida a esta técnica.

Basicamente, uma TC indica a quantidade de radiação absorvida por cada porção analisada, traduz essas variações numa escala de cinza, produzindo uma imagem. Como a capacidade de absorção de raios X de um material está relacionada com a sua densidade, zonas de diferentes densidades terão diferentes cores, permitindo distingui-las. A figura 2.39 mostra de forma esquemática o arranjo.

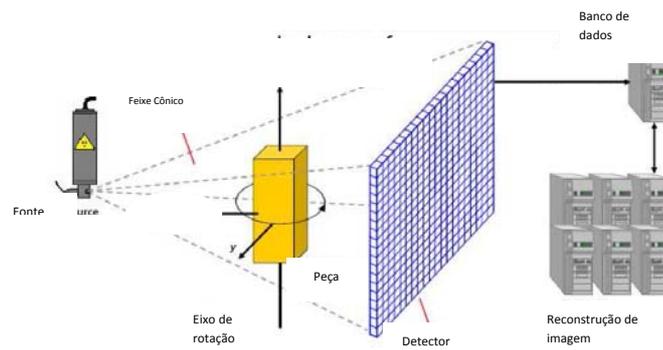


Figura 2.35 – Tomógrafo – (DOVE, 2001)

A tomografia computadorizada permite a visualização da estrutura interna das peças através de imagens 2-D e 3-D. Esta técnica gera imagens de alta definição, o que não é possível com técnicas de radiografia convencional e radiografia computadorizada. A grande vantagem da tomografia é que permite a formação bidimensional e tridimensional da imagem da peça, permitindo assim uma melhor avaliação, mostrando a posição espacial de detalhes e de possíveis defeitos da peça. Outra vantagem é a altíssima resolução atingida nas imagens tomográficas. Diferenças de coeficientes de atenuação de até 0,1% entre materiais podem ser medidas, em espessuras de até 2 mm (JACOBS, et al., 1995).

Para a aquisição destas informações e construção da imagem, tanto a fonte pode se movimentar ao redor do objeto, como a fonte pode ficar em repouso e o objeto girar em torno do seu eixo sob o feixe de raios X. Essas disposições estão mostradas na Figura 2.36.

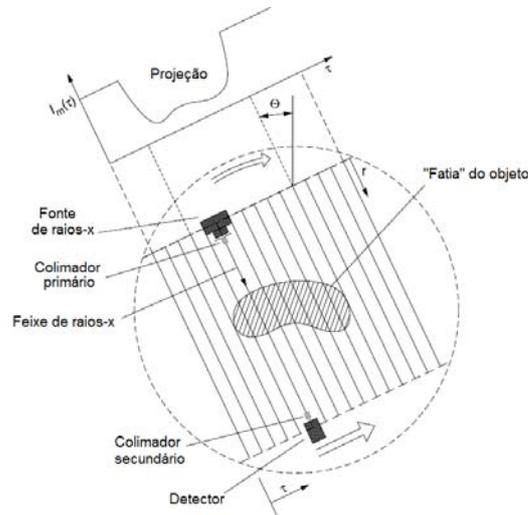
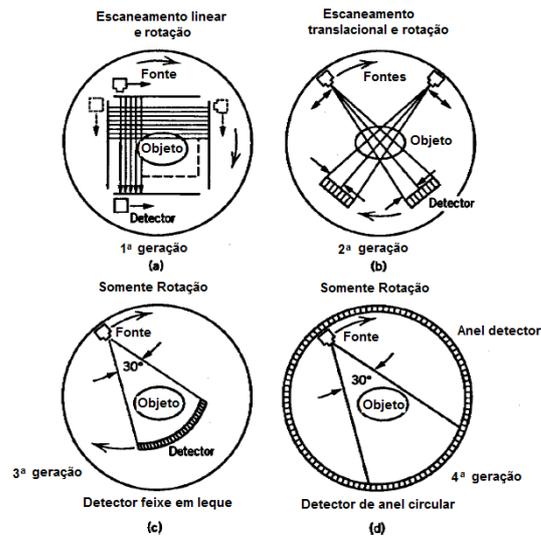


Figura 2.36 - Gerações de sistemas de tomografia computadorizada (DOVE, 2001)

2.10 Radioproteção

O Conselho Nacional de Energia Nuclear – CENEN, através da sua Norma (Diretrizes Básicas de proteção radiológica – CNEN-NN-3.01) de janeiro de 2005, estabelece os requisitos básicos de proteção radiológica das pessoas em relação à exposição à radiação ionizante.

Em seu item em seu item 2, a CNEN-NN-3.01 define:

- “DOSE ABSORVIDA”, como sendo, a grandeza dosimétrica fundamental expressa por $D = d\varepsilon/DM$, onde $d\varepsilon$ é a energia média depositada pela radiação em um volume elementar de matéria de massa DM . A unidade do sistema internacional é o joule por quilograma (j/kg), denominada Gray (Gy).

- “DOSE EVITÁVEL”, como sendo, a que pode ser evitada por uma ou mais ações de proteção.

Abaixo seguem algumas vantagens do método através da radiografia computadorizada, (VIDEIRA, et. al., 2003).

- - O baixo nível de energia que necessita para realizar o ensaio, em comparação ao método que utiliza filmes convencionais;
- - Diminui o risco de acidentes pessoais radiológicos;
- - Facilita o monitoramento de áreas adjacentes aos trabalhos de radiografia;
- - Elimina a necessidade de produtos químicos para revelação;
- - Substituição do tempo de revelação e fixação dos filmes;
- - Menor dose de radiação recebida pelos trabalhadores radiográficos;
- - Rapidez do processamento das imagens radiográficas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

No presente trabalho, dois tipos de isoladores de compósito de linhas de transmissão foram analisados com a técnica de radiografia computadorizada visando avaliar a detectabilidade das falhas de fabricação, defeitos tais como trincas geradas em operação. Também um estudo de correlação entre os pontos quentes nos isolador tipo-II, observados com termografia e imagens de radiografia computadorizada.

Os isoladores de compósito que denominamos de tipo-I são isoladores para 230 kV, com revestimento de silicone de cor azul, os quais foram retirados da linha de transmissão da CHESF após dez anos de aplicação, pelo fato de um dos isoladores ter apresentado ruptura mecânica do núcleo e levado o cabo elétrico ao chão. Por precaução, a CHESF retirou da linha dezenas de isoladores de compósito da região. Esses oitos isoladores foram detalhadamente analisados por radiografia computadorizada no Laboratório de Ensaio Não Destrutivos e Monitoramento da Integridade Estrutural do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE (SILVA, 2009). O isolador possui 21 aletas e projetado para suportar uma carga mecânica de até 222 KN e possui um peso em torno de 9 kg. Seus terminais são do tipo concha/bola, conforme mostram a figura 3.1 e esquematizado na figura 3.2.



Figura. 3.1 – Isolador tipo I utilizado para retirada da amostra

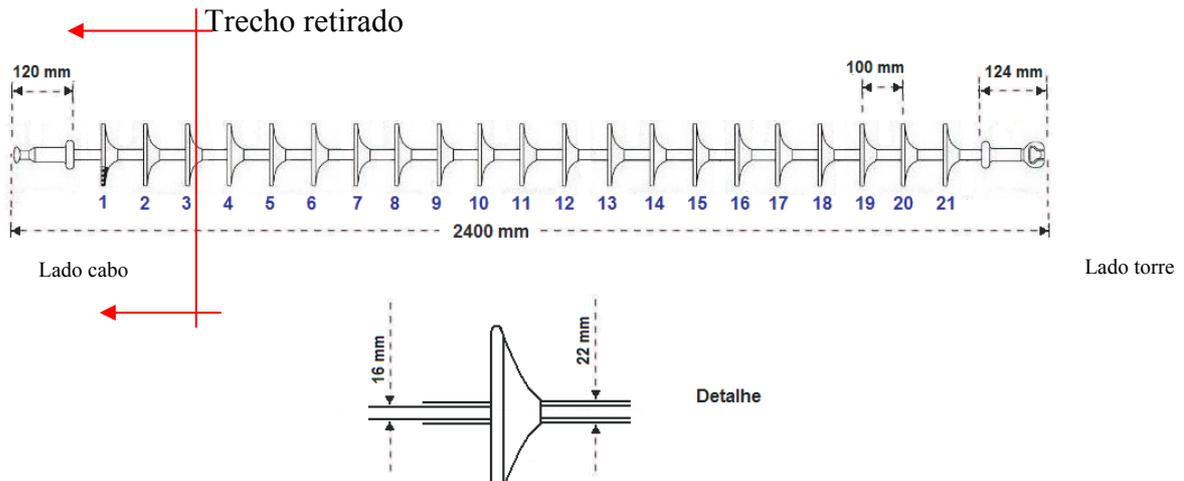


Figura. 3.2 – Esquema da localização do trecho retirado para inspeção por microtomografia e radiografia computadorizadas e, também por radiografia convencional

Foram feitas diversas imagens radiográficas e avaliações nos oito isoladores tipo-I no Laboratório de Ensaio Não Destrutivos e Monitoramento da Integridade Estrutural da UFPE. Como resultado, das oito unidades avaliadas, quatro unidades apresentaram trincas entre a primeira aleta e o terminal metálico do lado do cabo elétrico, possivelmente pela influência do intenso campo elétrico (Silva, 2009).

Para este trabalho foram utilizadas duas das amostras de isoladores das quais já se tinha o conhecimento de que uma das amostras apresentava trincas e a outra sem os defeitos. Esse conhecimento prévio se deveu ao fato de que estas mesmas amostras haviam sido radiografadas com um sistema de radiografia digital, constituído por uma fonte portátil de raios-X de 270 kVp, modelo XRS-3 da Golden Engineering, filmes IP – Imaging Plate da Perkin-Elmer dos tipos SR (Super Resolution) e SS (Super Sensitive), de dimensões 12,5 cm x 43 cm, e para a leitura dos filmes foi utilizado um scanner a laser de 16-bit modelo Cyclone da Perkin-Elmer, totalmente controlado por computador.

O procedimento utilizado no Laboratório do DEMEC/UFPE, serviu para um conhecimento prévio da existência das trincas, mas não fez parte do presente estudo. Portanto está citado apenas para esclarecer o porquê do conhecimento prévio da situação da integridade das amostras dos isoladores.

O presente estudo apresenta imagens radiográficas obtidas através da microtomografia computadorizada, pelo método digital, realizado BAM e as realizadas em São Paulo, através do método convencional. Dentre os oitos isoladores, para um estudo detalhado com microtomografia computadorizada, radiografia computadorizada de alta resolução e radiografia convencional, duas amostras foram selecionadas e mostradas na figura 3.3.



Figura 3.3 - Amostras selecionadas para inspeção

O isolador de compósito tipo-II, que foi analisado no presente trabalho, nesse caso, somente com radiografia computadorizada, trata-se de um isolador de uma linha de 230 kV da CHESF, com mais de cinco anos em operação, que apresentou três pontos quentes quando foi inspecionado no campo com a técnica de termografia (Fig.3.4).

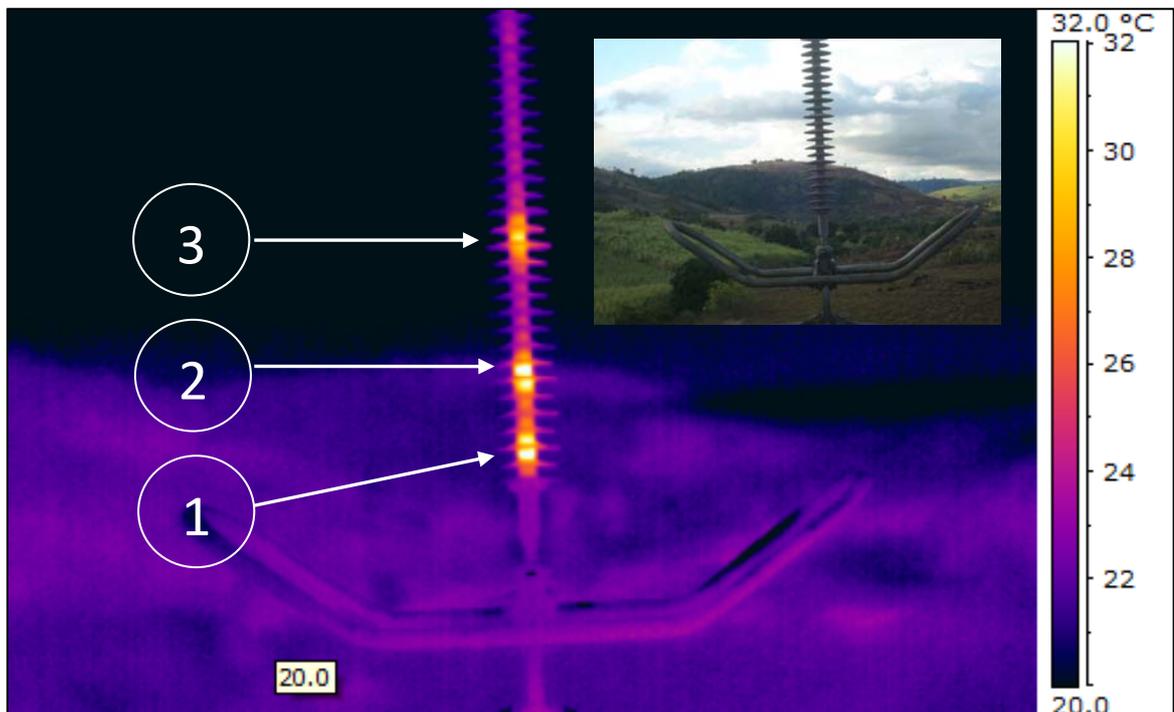


Figura 3.4 - Imagem da termovisão de infravermelho. $T_{\max} = 35,1\text{C}$; $T_{\min.} = 22,7\text{C}$; Radiância = 8.600 lux; $T_a = 23,8\text{ C}$. A imagem inserida refere-se a fotografia do isolador de compósito obtida com uma câmera digital.

Para inspeção minuciosa do isolador de compósito, o isolador foi retirado da linha para inspeção nos laboratórios da UFPE e seccionado em quatro segmentos, como mostram as figuras 3.5 e 3.6.

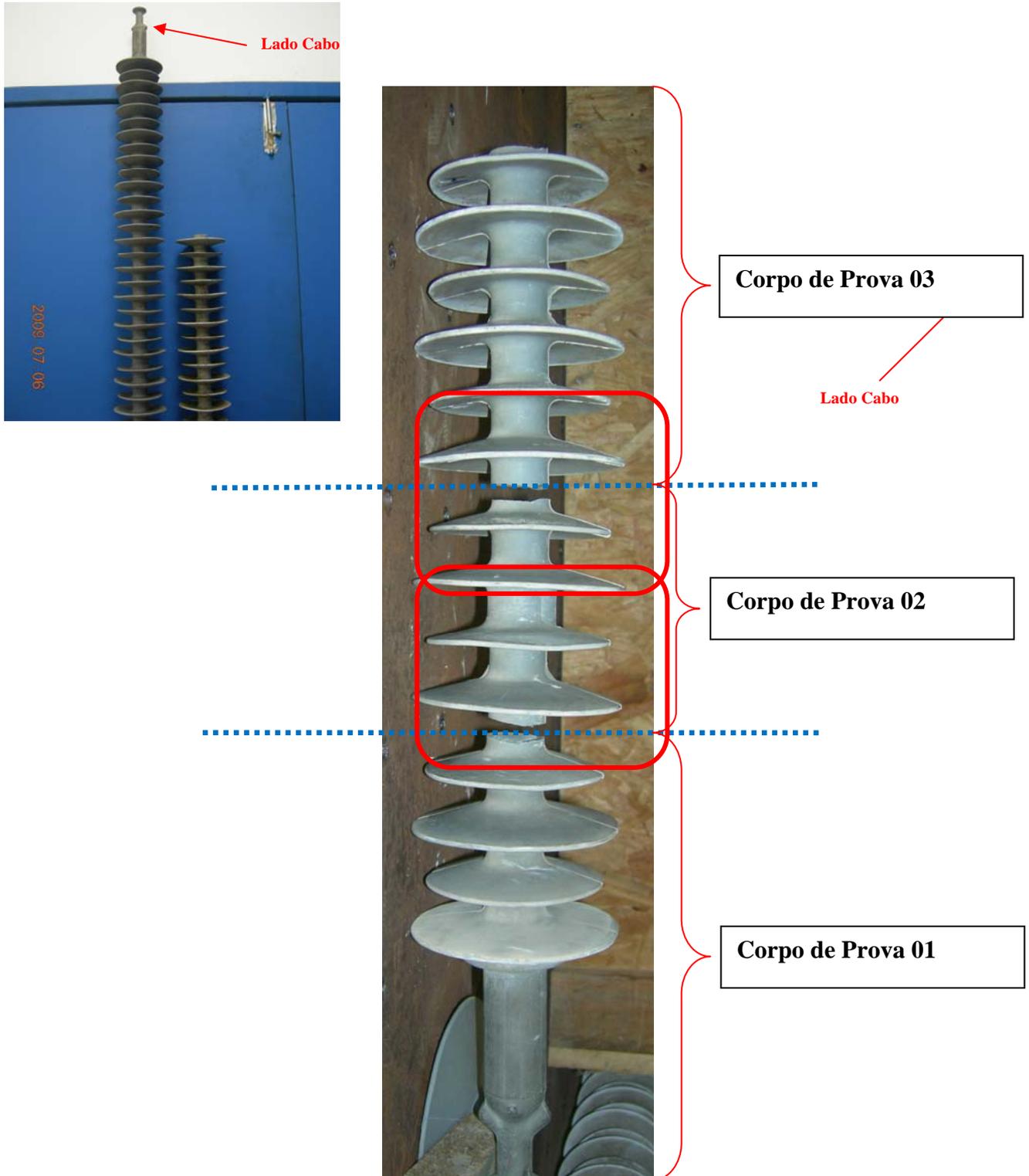


Figura 3.5 – Amostras seccionadas do isolador tipo II inspeccionadas no laboratório da UFPE

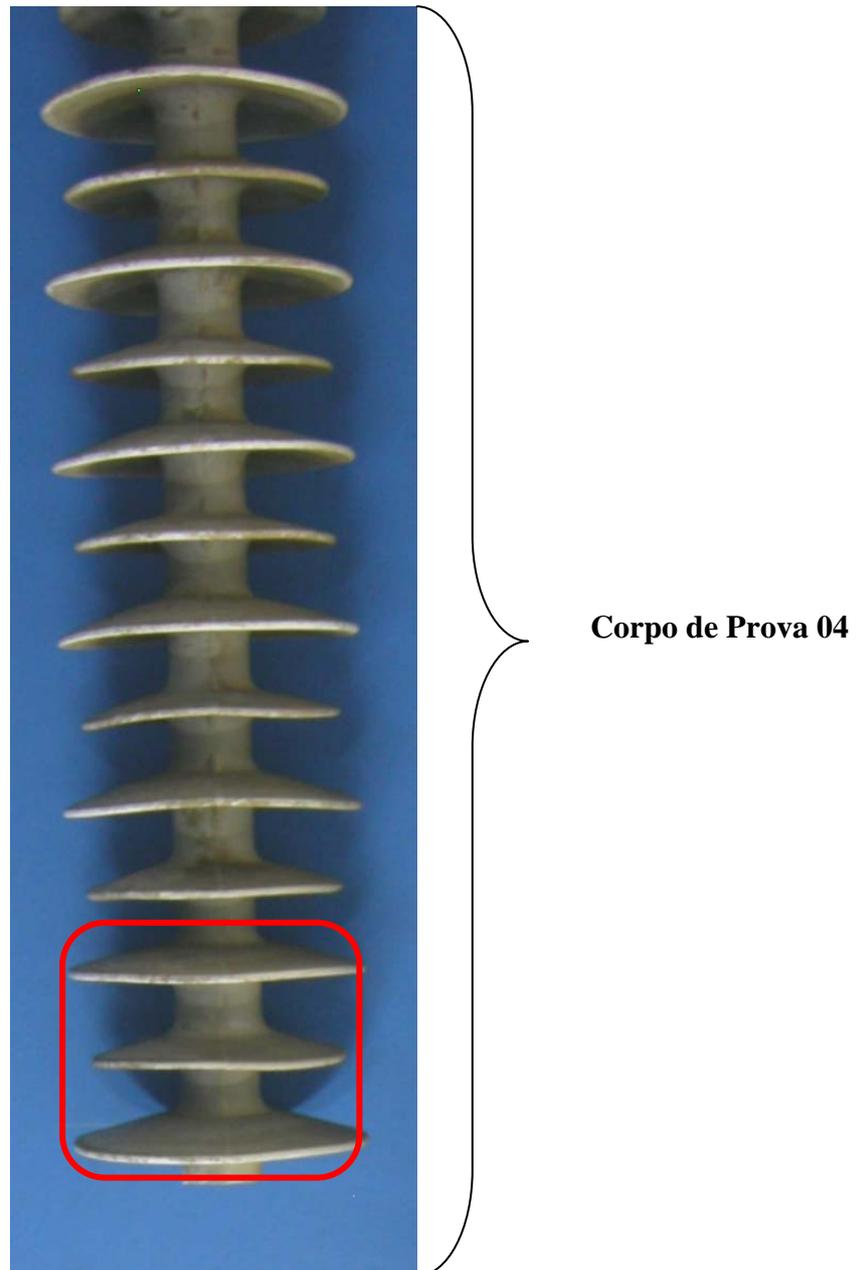


Figura 3.6. Segmento 04 do isolador tipo II inspecionado no laboratório da UFPE

3.2 Inspeção dos Isoladores de Compósito Tipo-I com a Microtomografia computadorizada

Inicialmente, os isoladores de compósito selecionados foram analisados com a técnica de microtomografia computadorizada no BAM.

O microtomógrafo usado, foi desenvolvido pelo BAM e utiliza um tubo de Raios-X micro focal da Comet-Feinfocus Business Unit, de até 225 kV de de 10 μm e detector tipo flat panel de silício amorfo, com resolução de 2048x2048 pixels, com pixel de 200 μm . A tensão usada no tubo para o ensaio foi de 120 kV. Tal sistema possibilita que a resolução espacial da imagem chegue a 5 μm e o feixe empregado foi de “cone-beam”. Na Figura 3.7 é mostrado o arranjo experimental utilizado para tomografar os isoladores de compósito no BAM. As imagens tomográficas 2D foram reconstituídas a partir de 900 imagens coletadas para cada isolador, e serão utilizadas como referência para avaliar as imagens obtidas com a técnica de radiografia computadorizada e imagens de radiografia convencional com filme de raios-X.

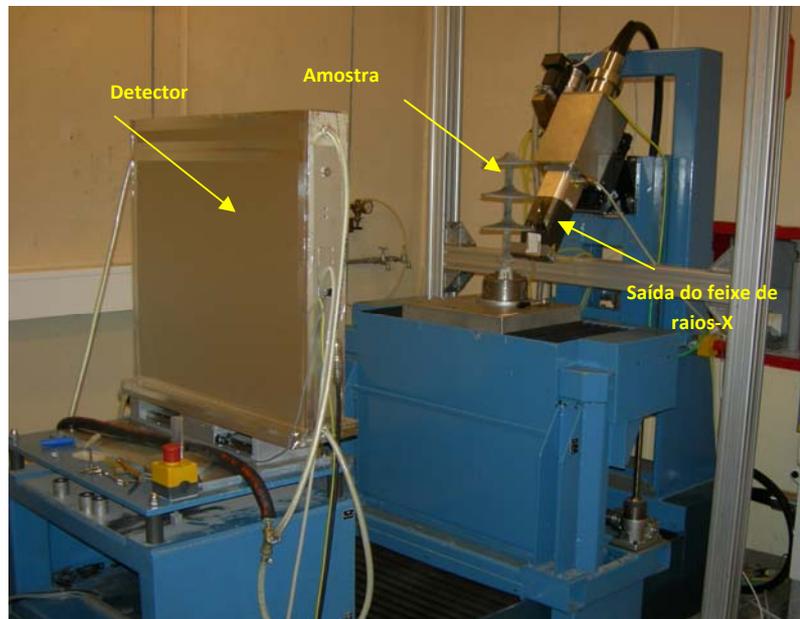


Figura 3.7-Arranjo experimental do sistema de microtomografia computadorizada - BAM

3.3 Inspeção dos Isoladores de Compósito Tipo-I com Radiografia Computadorizada utilizando Leitor de IP de Alta Resolução.

No sistema de radiografia computadorizada de alta resolução do BAM foi usada uma fonte de raios-X modelo SEIFERT X-ray Tubehousing ISOVOLT 320 / 13 da General Electric, 2 tipos de sistemas de radiografia computadorizada, um modelo FCR XG-1 NDT da Fujifilm e outro modelo HD CR-35 NDT da Durr. A distância fonte-filme utilizada foi de

1200 mm, com as tensões no tubo variando de 60 a 120 kV e correntes variando de 2 mA a 3 mA. Os tempos de exposição também variaram de 30 s a 2 min. Figura 3.8

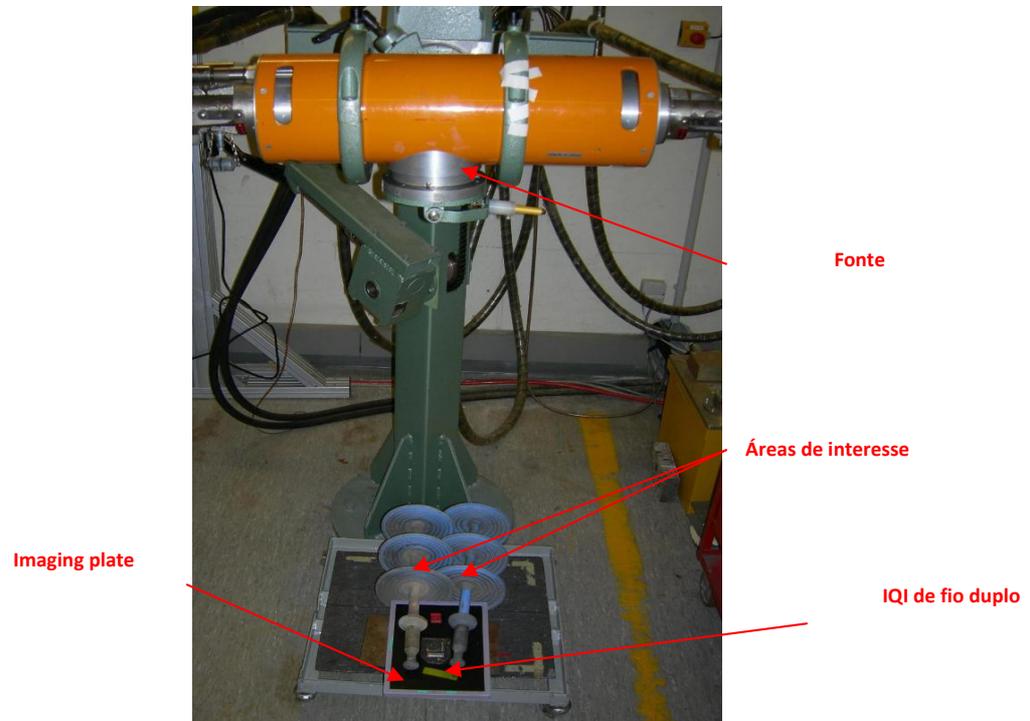


Figura 3.8 - Arranjo experimental do sistema de radiografia digital de alta resolução – BAM

Para simplificar as referências aos sistemas de radiografia computadorizada utilizados no presente trabalho, foram usados os códigos baseando-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Códigos utilizados para cada sistema

Fabricante	Sistema	Detector	Laboratório	Código
Epson	–4990 PRO com 8 bit e 16 bit	Filme D4 e D7	COMPOENDE	D
Fujifilm	FCR XG-1 NDT	IP ST-VI 35X43cm	BAM	CR - Fuji
Durr	HD CR-35 NDT	IP HD 10x24cm	BAM	CR - Durr

3.4 Inspeção do Isolador de Compósito Tipo-I com Método radiográfico convencional

Os ensaios foram realizados no laboratório da COMPOENDE, na cidade de Tremembé - SP, Empresa qualificada pelo Centro Técnico Aéreo espacial (CTA/IFI), de acordo com a NAS 410 E ANSI/ASNT CP198 e com experiência em radiografia para o seguimento aeronáutico.

Foram utilizados dois tipos de filmes, classe 1 e classe 2, conforme classificação da ASTM E1815-96.

Filme classe 1 (STRUCTURIX D4 FW (35X43cm) da AGFA) - Grão extrafino, contraste muito alto. Largamente utilizado em diversas aplicações. Recomendado para componentes eletrônicos, compósitos, fundidos, soldas de alta qualidade, indústria nuclear, aeronáutica e espacial.

Filme classe 2 (STRUCTURIX D7 FW-35X43cm da AGFA) - Grão fino, contraste alto e alta velocidade Recomendado para Soldas, fundidos, indústria naval, aeroespacial e aeronáutica.

Foi utilizada uma fonte marca Eresco 160/5 da RICH, SEIFERT & CO, calibrada em 23/04/08, validade até 23/04/09, com potência máxima de 160kV e amperagem máxima de 5mA e foco de 1,2 X 1,2mm, mostradas pelas figuras 3.8 e 3.9. Figura 3.10 mostra o painel de comando do conjunto.

Foi utilizado o revelador STRUCTURIX G128 da AGFA, com sua validade adequada ao prazo de validade.

Foi utilizado o fixador STRUSTURIX G328 da AGFA. Com sua validade adequada ao prazo de validade.

Na disposição do arranjo geométrico do conjunto (Foco, Objeto, Filme), foi mantida a mesma distância Foco-filme que se utilizou no Federal Institute for Materials Research and Testing in Berlin Germany- BAM, ou seja; 1200mm. Esta decisão deveu-se ao fato de garantirmos que a distância foco filme não fosse a responsável pelas possíveis diferenças e variações as imagens obtidas entre os dois métodos. Ver figuras 3.9 e 3.10.



Figura. 3.9 - Vista geral do arranjo para radiografia convencional



Figura. 3.10 – Medição da distância foco-filme

As amostras foram radiografadas juntas, em duas posições, defasadas de 90° uma em relação à outra, com um filme classe I. O mesmo procedimento foi adotado com um filme classe II. A figura 3.11 mostra a identificação das duas direções em relação ao feixe radiográfico.



Figura. 3.11 – Marcações 0° e 90°.

Esse procedimento permitiu detectar possíveis indicações, que devido as suas orientações não sejam detectadas, radiografando-se com uma única direção de incidência do feixe. Também sob o filme foi utilizada uma placa de chumbo de 10mm de espessura , a fim de minimizar influência das radiações dispersas. A figura 3.12, mostra o cuidado na colocação do filme sob as amostras, observando-se a orientação das mesmas.



Figura. 3.12 - Colocação do filme sob as amostras.

Realizada a centragem do feixe radiográfico em relação à área de interesse e posicionamento do filme e das amostras. Esta conferência foi realizada com a utilização de um fio de prumo, como pode ser visto na figura 3.13.



Figura. 3.13 - Conferência da centragem do feixe através de fio de prumo.

Foram utilizados três tipos de IQI para uma avaliação das imagens, de fios duplos, cedido pelo Prof. Dr. Ricardo Tadeu Lopes da UFRJ, de fios simples e de furos. Sendo que os

IQI de fios simples, DIN e o ASTM, de furos, foram apenas para uma referência, já que interesse foi comparar a resolução espacial das imagens em relação às imagens obtidas no BAM, que utilizou o IQI de fios duplo. A figura 3.14 mostra os IQI's utilizados e a figura 3.15, mostra como os IQI's foram dispostos sobre o filme.

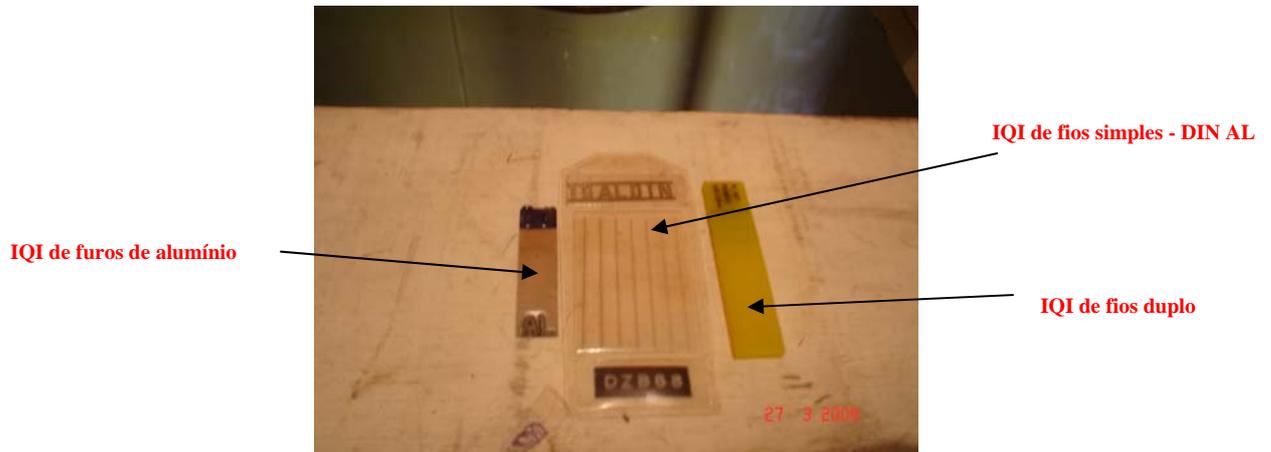


Figura. 3.14 - IQI disponibilizados

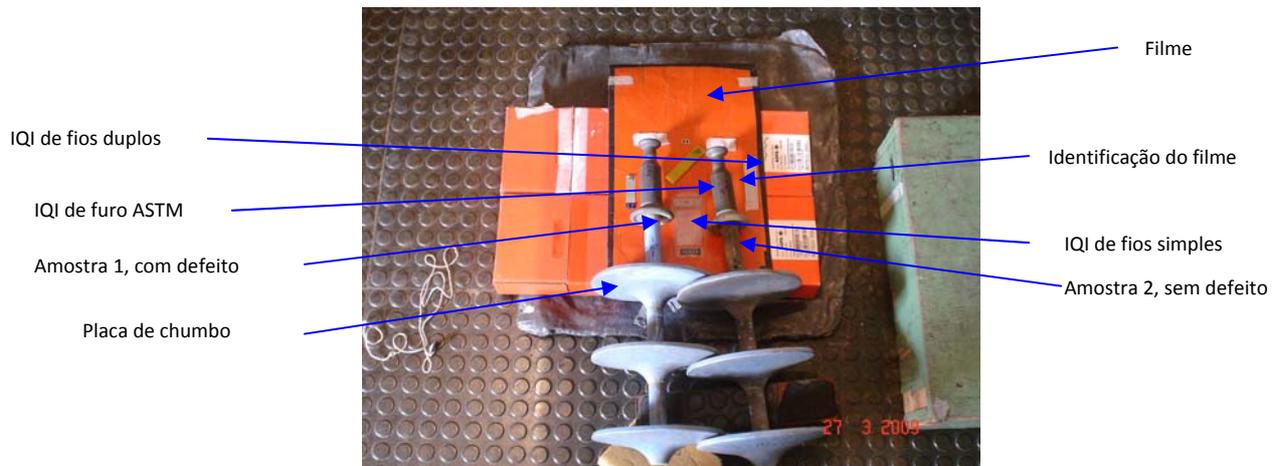


Figura. 3.15 – Disposição dos IQI's

Os filmes foram dispostos no arranjo e receberam as seguintes identificações:

- - CL 1 – Significa que o filme é classe 1;
- - CL 2 – Significa que o filme é classe 2;
- - 0 – Significa a posição a zero grau em relação à direção do feixe radiográfico;
- - 90 - Significa que as amostras estão giradas de 90 graus em relação à direção do feixe radiográfico;
- - PC 1 – Significa amostra nº 1 (Esta amostra é a que apresenta trincas);
- - PC 2 – Significa amostra nº 2 (Esta amostra é a que não apresenta trincas);

- - AL e .12 – É a identificação do IQI de furos, ASTM de alumínio;
- - 10AL DIN – Identificação do IQI de fios da DIN.

A figura 3.16, mostra como as identificações aparecem na imagem radiográfica.

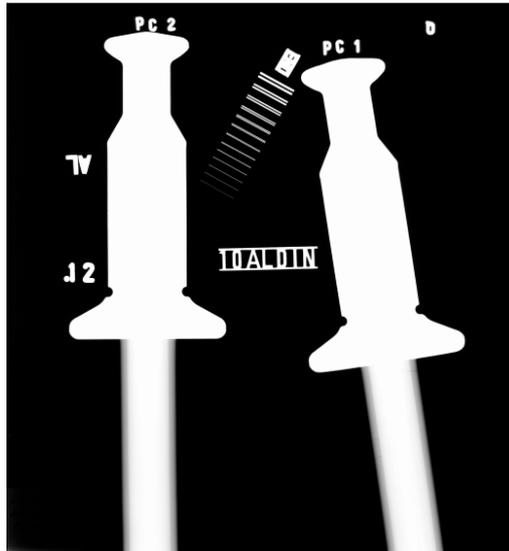


Figura. 3.16 – Visualização das identificações

Para as duas primeiras radiografias (Uma com as amostras a zero grau e outra com as amostras a noventa graus), utilizou-se um filme classe 1 (AGFA D4), com os seguintes parâmetros de ensaio:

- - Distância foco-filme = 1200mm
- - Tensão = 80kV
- - Corrente = 5mA
- - Tempo de exposição = 1min

Para as duas últimas radiografias (Uma com as amostras a zero grau e outra com as amostras a noventa graus), utilizou-se um filme classe 2 (AGFA D7), com os seguintes parâmetros de ensaio:

- - Distância foco-filme = 1200mm
- - Tensão = 60kV
- - Corrente = 5mA
- - Tempo de exposição = 1min

O revelador utilizado foi o STRUTURIX G128 da AGFA e teve sua validade conferida antes de ser utilizado, com uma diluição na proporção de 1 X 4 de H₂O, a uma temperatura de 24°C e o tempo de revelação 4 min.

O fixador utilizado foi o STRUTURIX G328 da AGFA e também teve sua validade conferida antes de ser utilizado, com uma diluição na proporção de 1 X 5 de H₂O, a uma temperatura de 24°C; tempo de fixação. A figura 3.17 mostra uma vista da câmara escura do laboratório da COMPOENDE.



Figura 3.17 - Câmara escura – Cubas do revelador, da água e do fixador

A tabela 3.2, abaixo mostra os valores dos parâmetros utilizados para a realização de cada radiografia .

Tabela 3.2 – Parâmetros do ensaio

Filmes	Classe 1 a 0°	Classe 1 a 90°	Classe 2 a 0°	Classe 2 a 90°
Distância Foco- Filme	1200mm	1200mm	1200mm	1200mm
Tensão	60kV	60kV	80kV	80kV
Amperagem	5mA	5mA	5mA	5mA
Tempo de exposição	1min.	1min.	1min.	1min.
Tempo de revelação	4min.	4min.	4min.	4min.
Temperatura do banho	24°C	24°C	24°C	24°C
Tempo de fixação	5 min.	5 min.	5 min.	5 min.
Temperatura do banho	24°C	24°C	24°C	24°C
Secagem em estufa	Com ventilação a 35°			

Após a revelação e secagem dos filmes em estufa com temperatura controlada, durante 15 minutos, foi verificada a densidade nas áreas de interesse dos filmes.

A verificação da densidade foi realizada utilizando-se um Densitômetro da KONICA CORPORATION, modelo PDA-85, o qual foi calibrado através de uma fita densitométrica aferida. Figura nº 3.18

A figura 3.19 mostra o densitômetro e a fita densitométrica utilizados e os valores registrados na tabela 3.3, abaixo

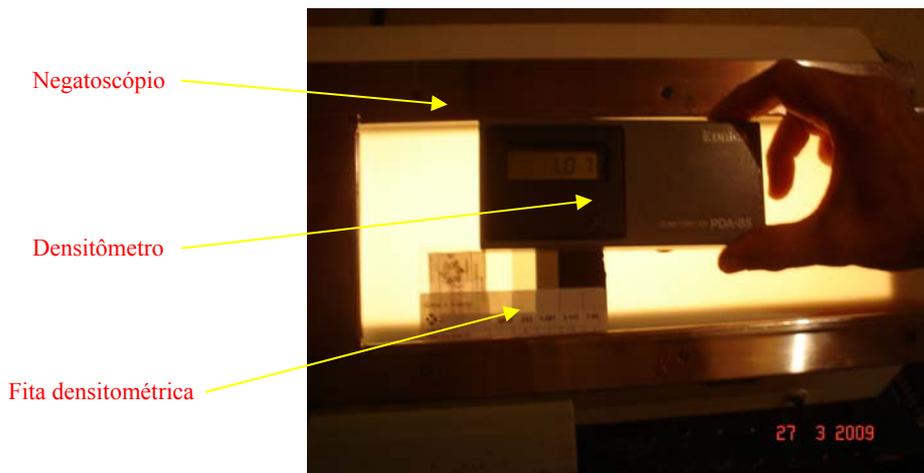


Figura. 3.18 - Calibração do densitômetro



Figura. 3.19 –Densitômetro e fita densitométrica

Tabela 3.3- Densidade dos filmes convencionais

Filmes	Classe 1 AGFA – D4	Classe 1 AGFA – D4	Classe 2 AGFA – D7	Classe 2 AGFA – D7
Incidência do feixe	0°	90°	0°	90°
Densidade	1,33	1,33	1,25	1,25

Após o procedimento de calibração do densitômetro, as densidades nas áreas de interesse dos filmes foram conferidas. Os filmes foram analisados, utilizando-se um negatoscópio e constatamos que todas as imagens se mostraram satisfatórias em termos de definição. Figuras 3.20.



Figura. 3.20 - Conferência da densidade e Análise dos filmes

Posteriormente os filmes de raios-X foram digitalizados no Laboratório de Ensaios Não Destrutivos & Monitoramento da Integridade Estrutural do DEMEC da Universidade Federal de Pernambuco, com o auxílio de um escâner comercial da EPSON, modelo 4990 PRO, o qual foi importado dos Estados Unidos. Os filmes de raios-X foram escaneados com 16 bits e 8 bits de resolução. Figura 3.21 mostra o escâner sendo preparado para digitalização do filme de raios-X.



Figura. 3.21 – Scanner utilizado na UFPE

3.5 Inspeção do Isolador de Compósito Tipo-II que Apresentou Pontos Quentes por Radiografia computadorizada

Recentemente, no final de maio de 2009, Laboratório do DEMEC da UFPE, fez aquisição de uma fonte de raios-X portátil da empresa belga ICM, modelo CP120B, com tamanho focal de 0,5 mm x 0,8 mm. , foram realizadas as radiografias das amostras dos isoladores de 230 kV.

A figura 3.22 mostra a fonte e o scanner utilizados (fonte fabricada pela ICM, Modelo CP 120B -Tensão 40kV – 120kV ; Corrente 1,0mA – 1,5mA ; Dimensão do foco 0,8mm x 0,5mm. Scanner a laser de 16-bit modelo Cyclone da Perkin-Elmer.

Os filmes IP da Perkin-Elmer dos tipos SR (Super Resolution) e ST (Super Sensitive), ambos de dimensões 12,5 cm x 43 cm.



Figura. 3.22 – Fonte e scanner utilizados nos experimentos adicionais

As radiografias foram realizadas em segmentos de um isolador de 69kV, com mais seis anos de uso, retirado de uma linha de transmissão, no qual foram detectados pontos quentes, através da câmara de infravermelho, durante uma inspeção de rotina.

Foi realizada uma inspeção visual da superfície do revestimento para observar indícios de possíveis danos, os quais podem dar falsas indicações nas imagens radiográficas, e também, seu estado quanto ao acúmulo de resíduos provenientes da poluição. Figura 3.23.



Figura. 3.23 – Inspeção visual e estado da superfície da amostra

Os image plates escolhidos foram inspecionados visualmente e expostos à luz branca para apagar possíveis registros remanescentes. Figura 3.24.

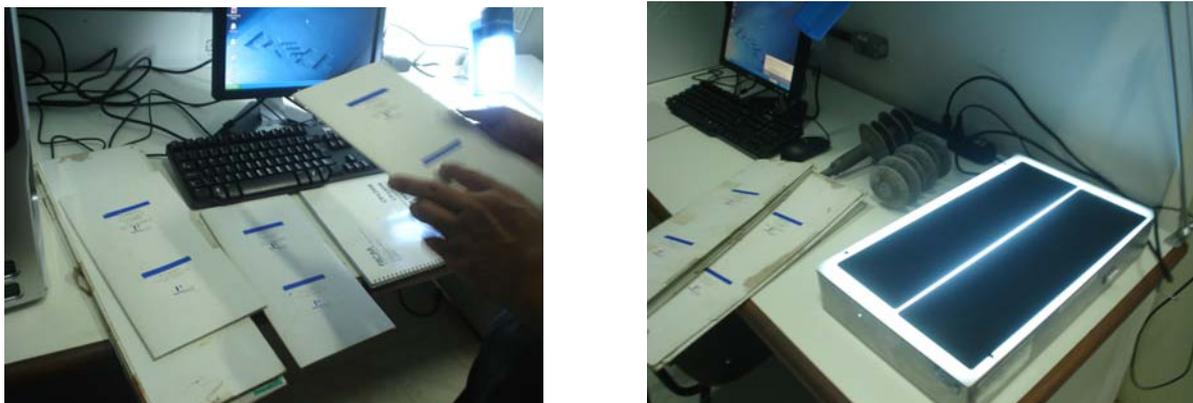


Figura. 3.24 – Inspeção dos IPs e apagamento de registros remanescentes

O arranjo utilizado para obter as imagens radiográficas dos segmentos do isolador está mostrado na figura 3.25.

Filme: IP Super Resolution Type SR PerkinElmer

Distância foco/filme = 600mm ;

1º - Tensão = 60kVk ; Corrente = 1,5mAm ; Tempo de exposição 10seg.

2º - Tensão = 60kVk ; Corrente = 1,5mAm ; Tempo de exposição 30seg.

3º - Tensão = 60kVk ;

Corrente = 1,5mAm ;

Tempo de exposição 30seg. (Amostra rotacionada a 90º)

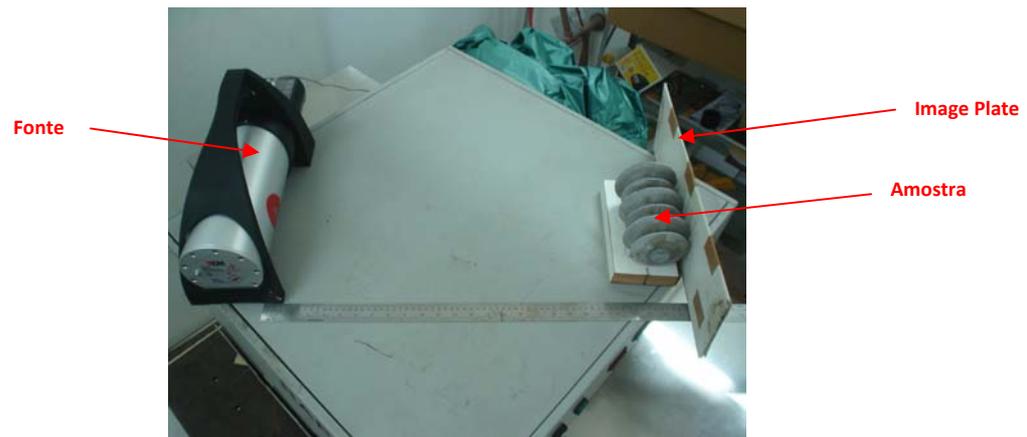


Figura. 3.25 – Arranjo no laboratório do DEMEC-UFPE

Após a obtenção das imagens lançou-se mão da versão demo do software Isee, o qual permitiu realizar a análise das imagens e verificações dimensionais, tais como; medidas de perfis, diferenças de espessuras de paredes, localização e medição de defeitos.

O Isee foi desenvolvido pelo BAM - Berlim para promover novas aplicações da radiologia digital.

Existem duas versões disponibilizadas; O Isee, que é uma versão completa e requer uma licença para utilização e uma segunda versão; O Isee-demo.exe, a qual não requer licença, porém nesta versão não é possível salvar os dados. Esta versão é disponibilizada gratuitamente e foi a utilizada para se efetuar as medições.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Inspeção por Microtomografia computadorizada

O tomógrafo oferece recursos por imagens que permitem uma avaliação dimensional precisa, conhecer a localização espacial e a geometria das indicações detectadas.

A imagem gerada permitiu visualizar a existência de uma trinca com origem na região de aderência, entre o bastão e o revestimento de silicone. Detalhe que só pode ser observado com precisão através do tomógrafo. O nível de ruído que aparece na figura 4.2, mostra-se compatível com imagem da figura 4.1.

O software Isee!-demo.exe, utilizado para processar as imagens radiográficas a imagem da figura 4.2, mostra, da esquerda para a direita, o pico A, referente à interface entre o revestimento e o bastão e o ponto “B” a interface, diametralmente oposta.

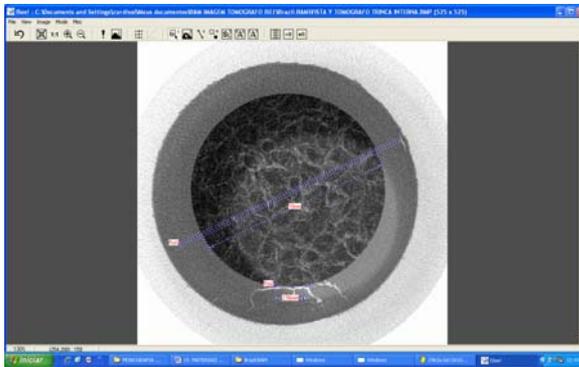


Figura 4.1 – Trinca entre bastão e revestimento – BAM.

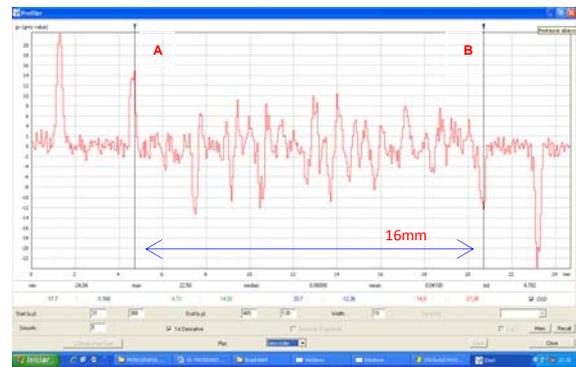


Figura 4.2 – Medição do diâmetro do bastão.

A tomografia computadorizada possui recursos que nos permite visualizar a geometria das trincas, com suas ramificações internas na estrutura do silicone, o que pode contribuir para um estudo do mecanismo de evolução dessas trincas. Ainda é possível fazer cortes em vários planos. Abaixo uma das imagens geradas, mostra a secção na qual está localizado um agrupamento de defeitos. Figura 4.3.

Também é possível se efetuar medições. Como mostra a figura 4.4, temos o dimensionamento do diâmetro do bastão e distância entre trincas, como exemplo.

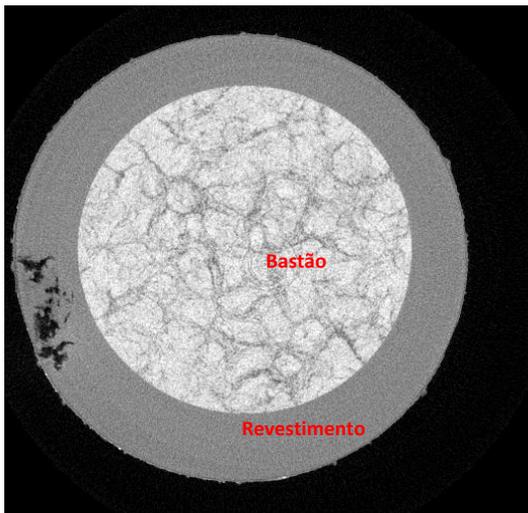


Figura 4.3 – Corte A-B de um defeito – BAM.

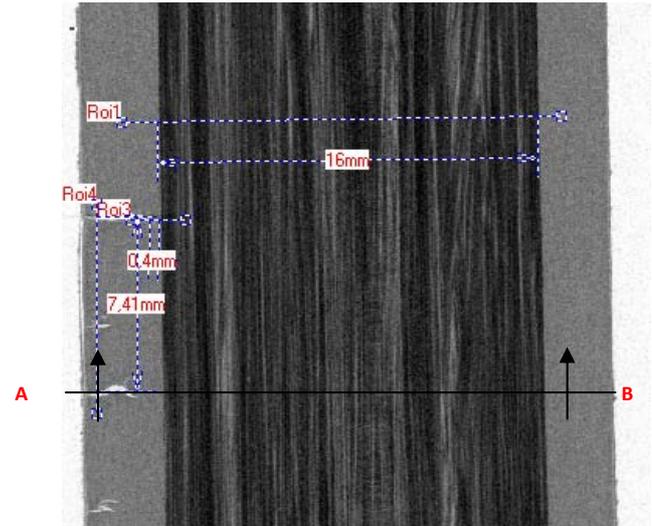


Figura 4.4 – Medições – BAM.

Outra análise conduzida foi a confirmação da falta de concentricidade entre o bastão de compósito e o revestimento. A avaliação da espessura foi realizada com o uso do software Isee, Figura 4.6. A comprovação da diferença de espessura no revestimento de silicone foi realizada medindo secções de um segmento do isolador de compósito, as quais estão mostradas na Figura 4.5.

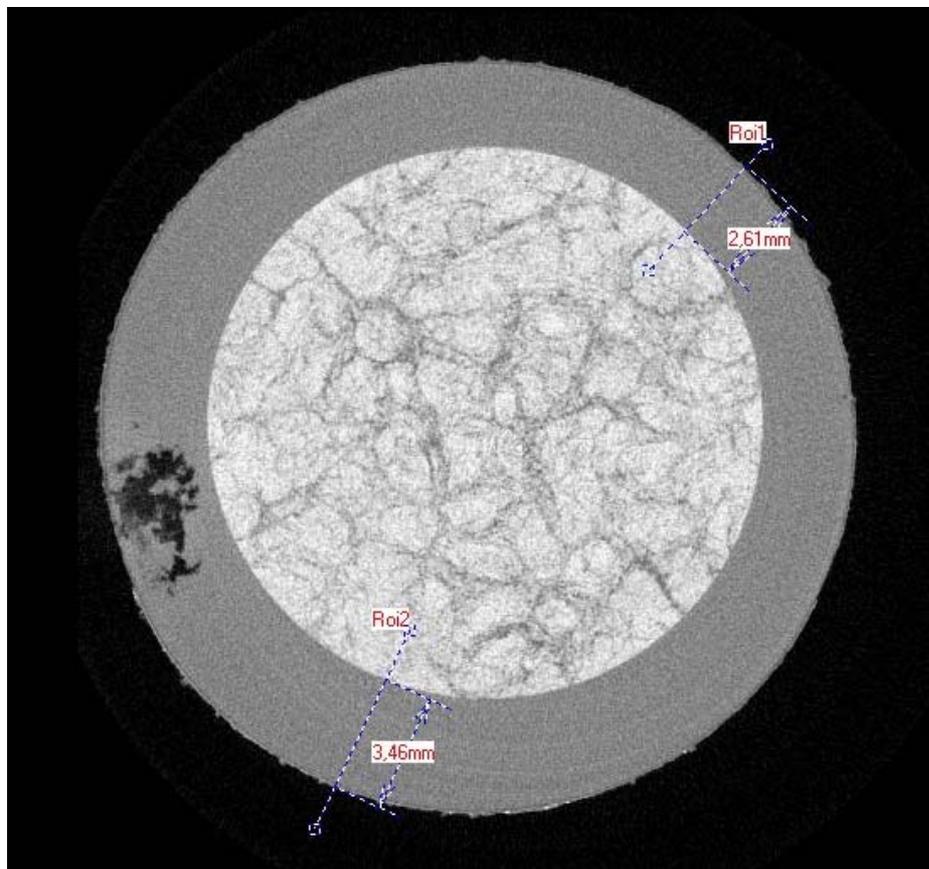


Figura 4.5 - Estimativa da espessura da camada polimérica em lados opostos do isolador.

A diferença de espessura devido à falta de concentricidade entre o bastão de compósito e cobertura de silicone foi confirmada medindo-se as secções retiradas perpendicularmente e longitudinalmente do mesmo isolador, as quais estão mostradas na Figura 4.6. Na prática, uma consequência negativa por esta falta de concentricidade pode comprometer o tempo de vida útil dos isoladores, pois o ataque ácido tende a chegar mais rápido no bastão de compósito se as fissuras ocorrerem na parte menos espessa da cobertura polimérica.

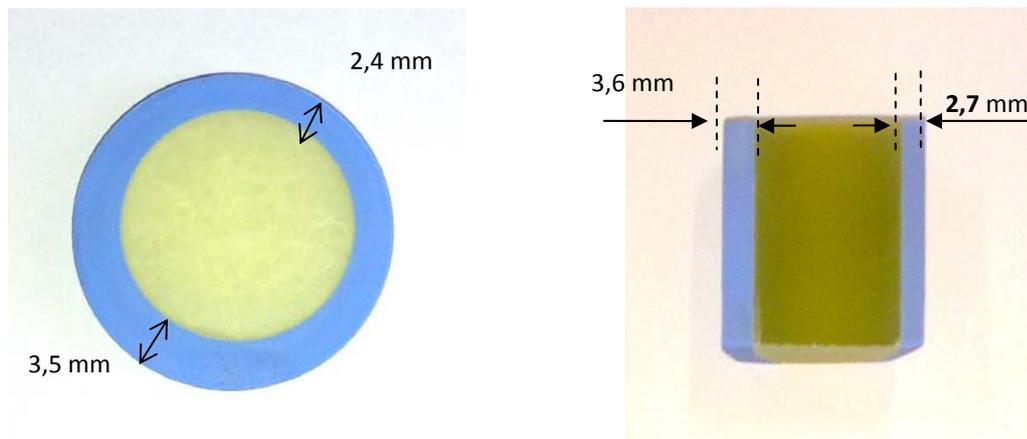


Figura 4.6. Corte transversal e longitudinal do bastão de um isolador composto de 230 kV.

A seguir uma seqüência de imagens obtidas, na direção **Y**, obtidas através do tomógrafo, onde são mostradas várias secções e defeitos existentes no revestimento de silicone. Figura 4.7.

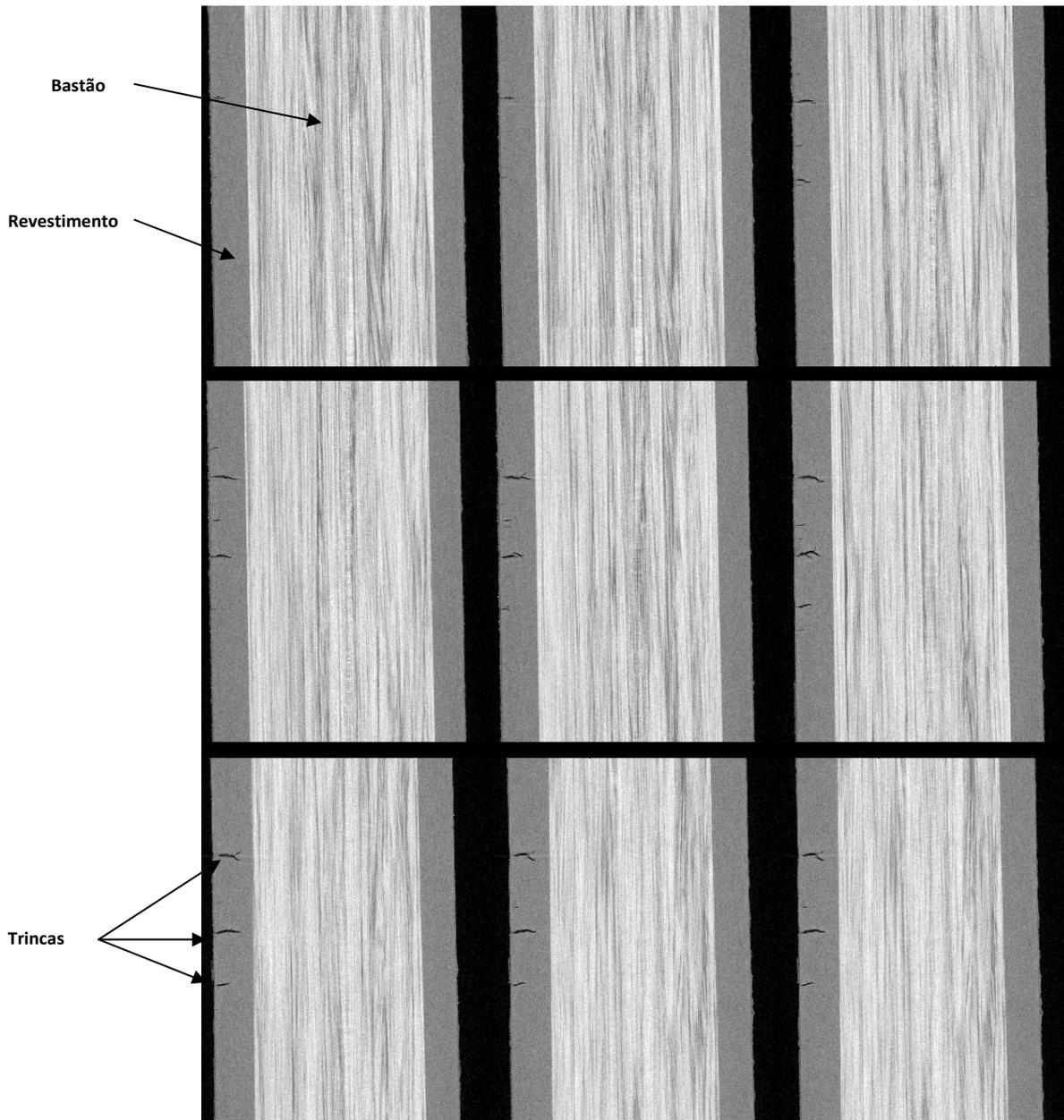


Figura 4.7. - Imagens na direção y mostrando trincas na cobertura de silicone – BAM

A figura 4.8 mostra uma seqüência de imagens de 1 a 9, realizadas pelo tomógrafo na direção Z. Pelas imagens podemos constatar que se trata de um mesmo defeito onde pode ser observada sua geometria em nove planos consecutivos, bem próximos nos dos outros, na secção transversal do isolador e não da imagem de diversos defeitos. Este recurso disponível pelo tomógrafo nos permite uma avaliação mais precisa que as outras técnicas.

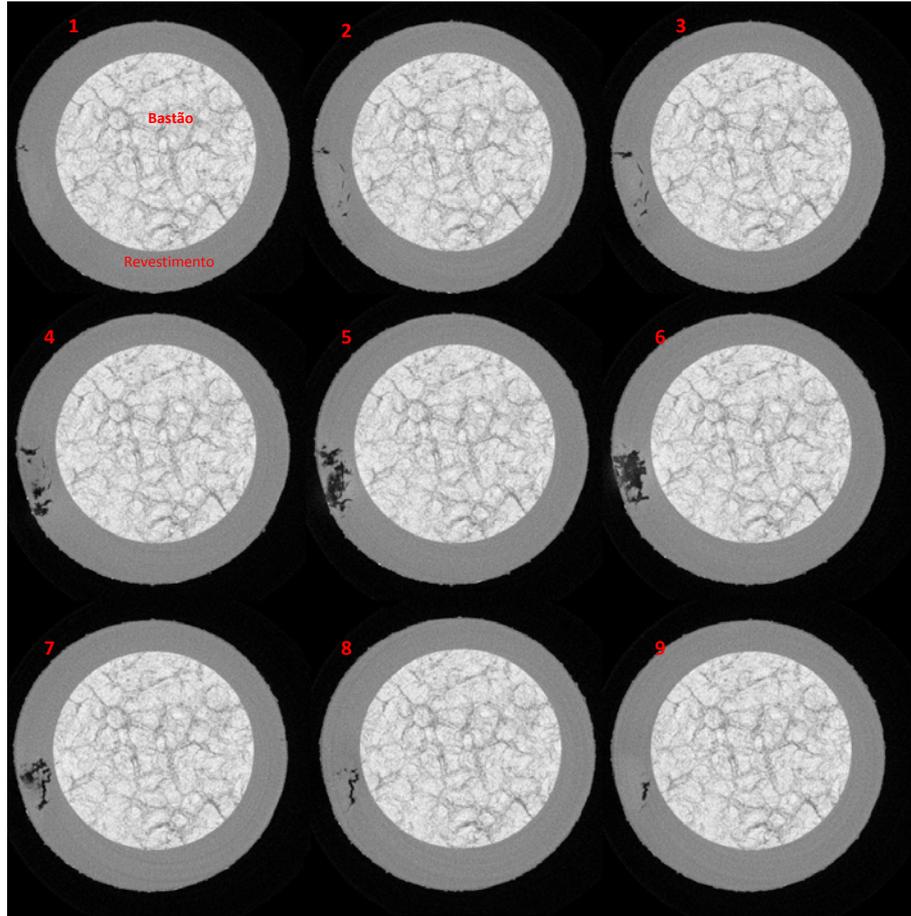


Figura 4.8. Imagens na direção **Z** mostrando um defeito no revestimento de silicone - BAM

A figura 4.9, abaixo mostra a seqüência de imagens de um defeito que se originou entre a superfície do silicone e a do bastão. Esta constatação servirá de subsídio para equipe de projeto da CHESF, que avaliará as possíveis causas desse tipo de defeito.

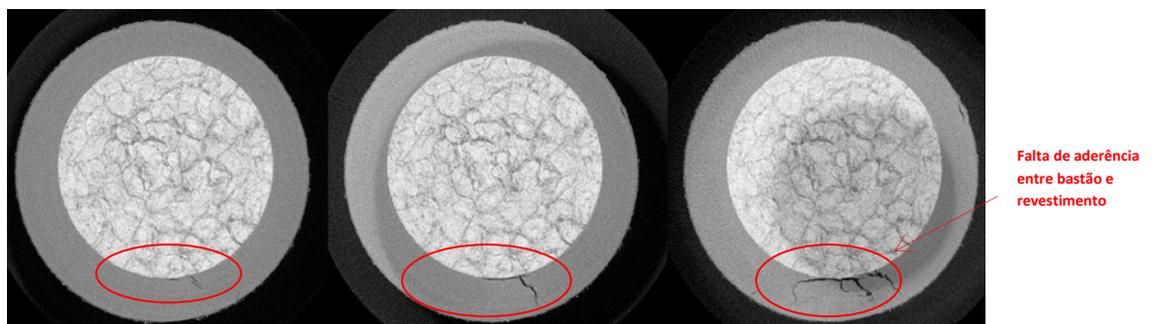


Figura 4.9 – Defeito entre bastão e revestimento – BAM

Na figura 4.10, pode-se constatar a pequena espessura que resta para que as trincas atinjam o bastão de compósito.

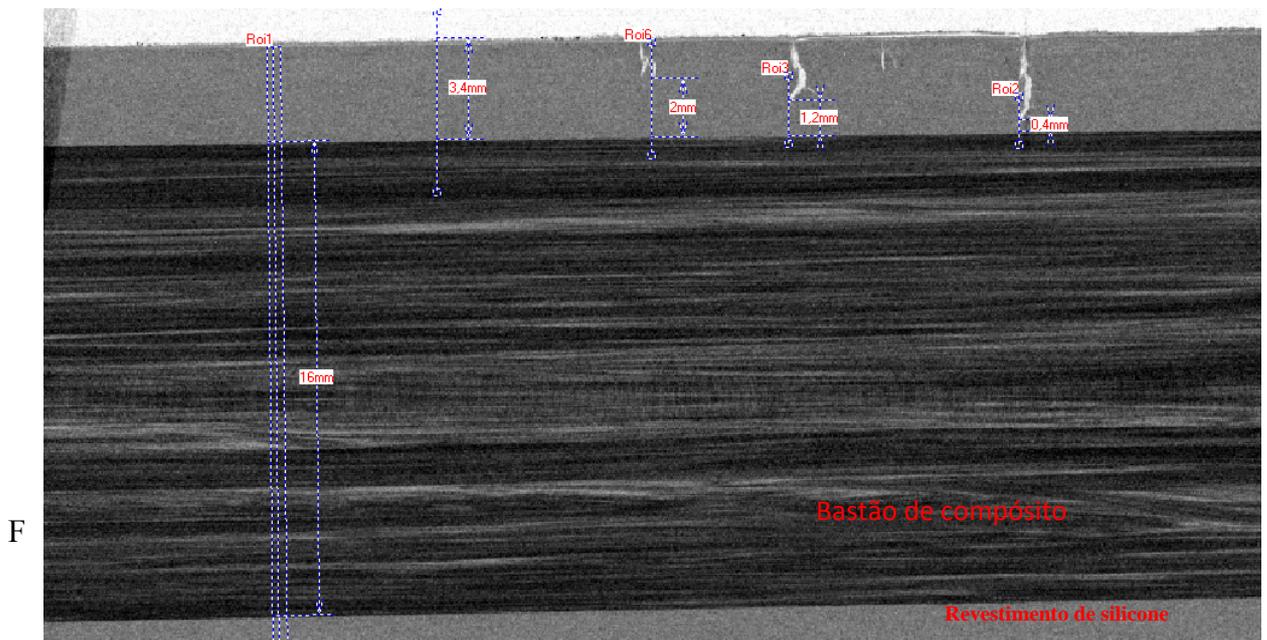


Figura 4.10 – Medição da espessura residual – BAM

A figura 4.11 mostra detalhe da incrustação na superfície do revestimento de silicone, problema constante nas regiões poluídas. A camada de incrustação não permite que as trincas sejam observadas por inspeção visual.

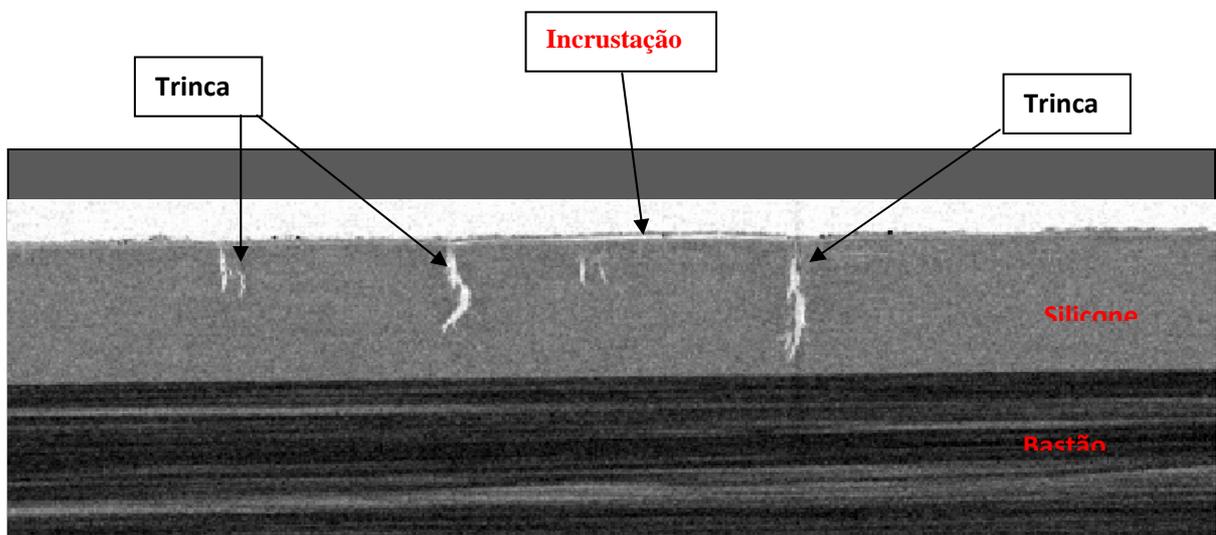


Figura 4.11 – Incrustação no revestimento de silicone – BAM

As radiografias computadorizadas foram realizadas no laboratório do BAM.

4.2 Resultados apresentados pela radiografia convencional digitalizada

4.2.1- Resultados das imagens digitalizadas com 16 bits

- Contraste

O método radiográfico convencional, seguido da digitalização, proporcionou imagens de boa qualidade.

As imagens obtidas digitalizadas permitiram a visualização das trincas no revestimento de silicone, conforme mostra a figura 4.16 (ampliada), as figuras 4.12 a 4.16 são as imagens obtidas por este método.

Abaixo seguem as imagens obtidas das duas amostras reveladas. Isso é; sem que as imagens tenham sofrido qualquer tipo de processamento, com 16 bits de resolução.

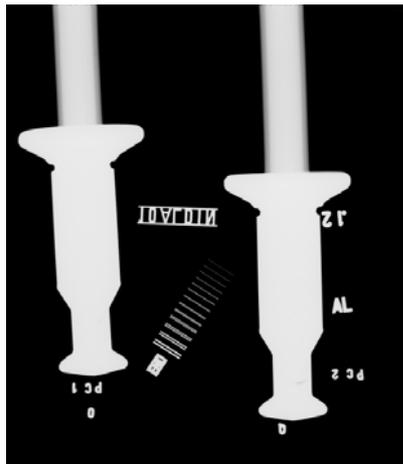


Figura – 4.12 – Filme cl. II - 0° (AGFA D 7) t

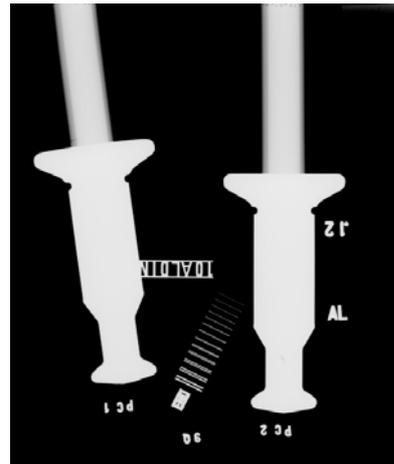


Figura – 4.13 – Filme cl. II - 90° (AGFA D7) –16bit

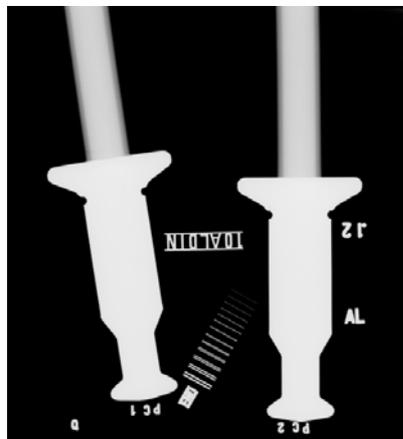


Figura - 4.14 – Filme cl. I - 0° (AGFA D4) – 16bit

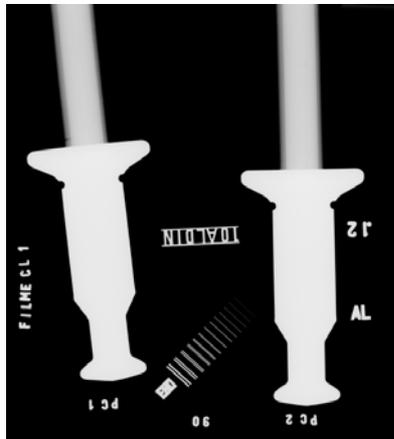


Figura - 4.15 – Filme cl. I - 90° (AGFA D4) – 16bit

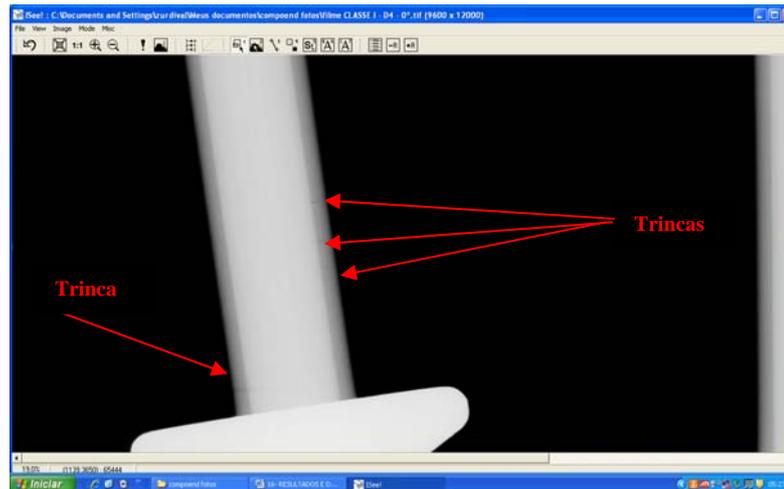


Figura nº 4.16 - Imagem sem processamento - Filme Classe I (AGFA D4) - 0° - 16 bits

O contraste foi suficiente para permitir que, através do negatoscópio, as trincas existentes na amostra nº 1, fossem visualizadas e analisadas. Os valores da densidade encontrados na região próxima às trincas estão mostrados na tabela 4.3.

Tabela 4.1 – Densidade do filme 1

Filmes	Classe 1 AGFA – D4	Classe 1 AGFA – D4	Classe 2 AGFA – D7	Classe 2 AGFA – D7
Ângulo de incidência do feixe	0°	90°	0°	90°
Densidade óptica	1,33	1,33	1,25	1,25

- Resolução espacial das imagens digitalizadas com 16 bits, através do software Isse- demo.exe

O sistema apresentou uma excelente resolução.

Como a discernibilidade de um sistema é definida pelo primeiro par de fios não resolvido e este é determinado quando a diferença entre o valor máximo e mínimo de intensidade é menor do que 20% da sua intensidade máxima. Como se pode observar o último par de fios, o par de fios nº 13, ainda apresentou uma intensidade de aproximadamente 100% da intensidade máxima. [Davi F.]

Os filmes foram digitalizados no scanner EPSON. Lançando-se mão do software, para processar as imagens obtidas e tomando-se por exemplo, a amostra nº 1, no filme Classe II - 0° (AGFA D4) –16bit, foi possível realizar algumas observações e análise.

A figura 4.17, mostra que a resolução da imagem, até o último par de fios, está resolvida.

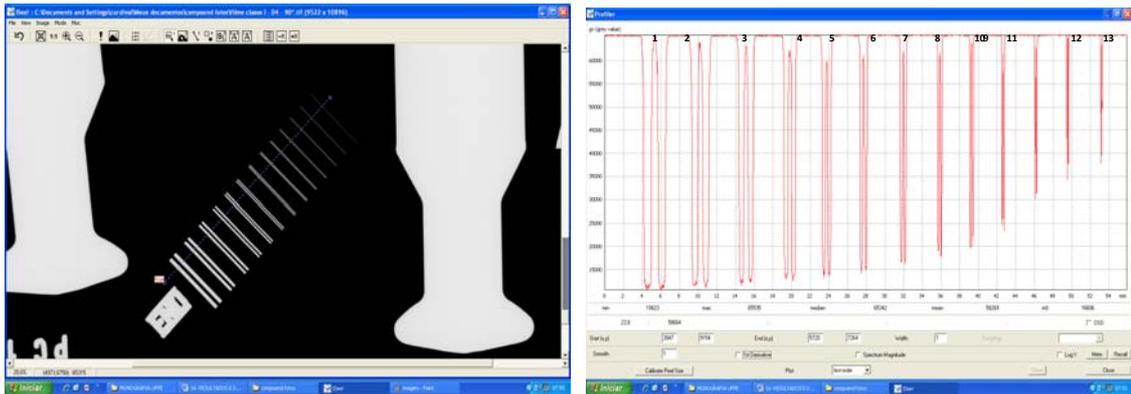


Figura 4.17 - Perfil da resolução espacial através do IQI de fios duplos – Software ISEE! – 16 bits – Imagem 90°.

Na conferência da resolução espacial das imagens dos pares de fios 10, 11, 12 e 13, constatamos, através do software ISEE, a boa resolução espacial. Figuras 4.18 a 4.20, respectivamente.

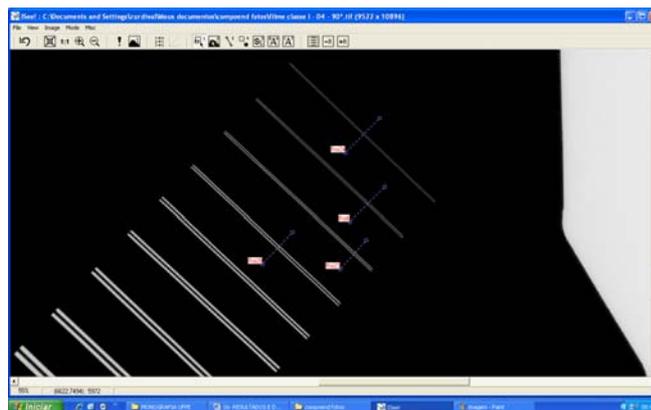


Figura 4.18 – Visualização dos pares nº 10,11, 12 e 13 – 16 bits – Imagem 90°

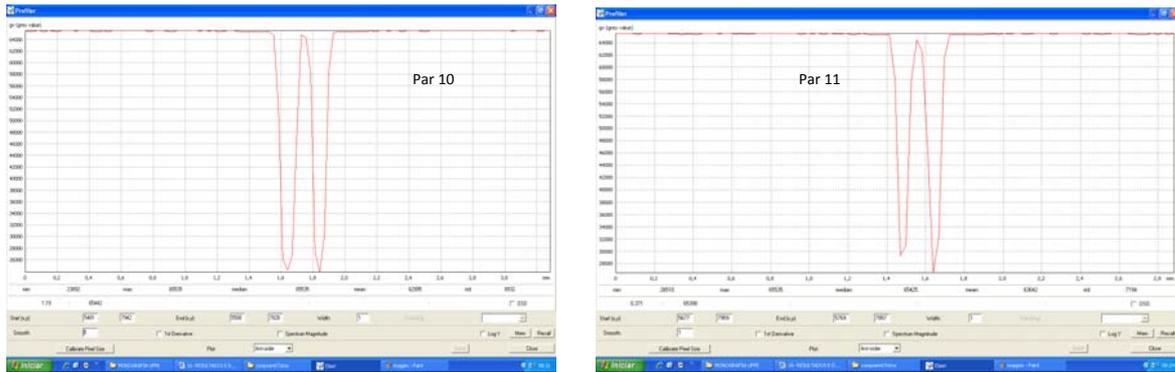


Figura 4.19 – Par de fios 10 e Par de fios 11

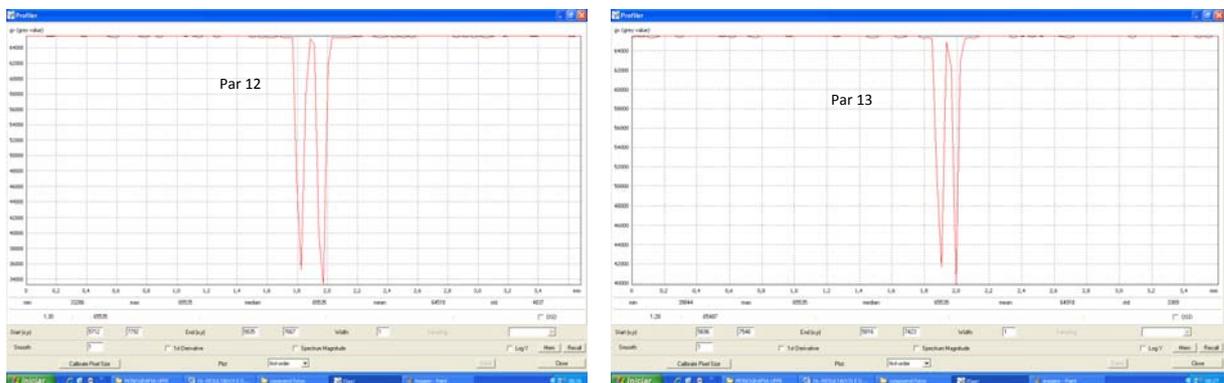


Figura 4.20 – Par de fios 12 e Par de fios 13

- Conferência da eficiência do software ISEE para verificações dimensionais.

Antes de se fazer as medições, realizou-se a conferência do diâmetro de um dos fios do IQI de fios duplos em seis seções, ao longo de seu comprimento, para se ter uma idéia da precisão da medição, através do software, já que todos os fios têm seus diâmetros calibrados e conhecidos.

Foi escolhido um dos fios do par nº1, cujo diâmetro é de $0,8\text{mm} \pm 0,02\text{mm}$ e a imagem do filme Classe II (AGFA D4) - 0°-16bit, como mostra a figura nº 4.21 e os resultados obtidos estão registrados na tabela 4.4.

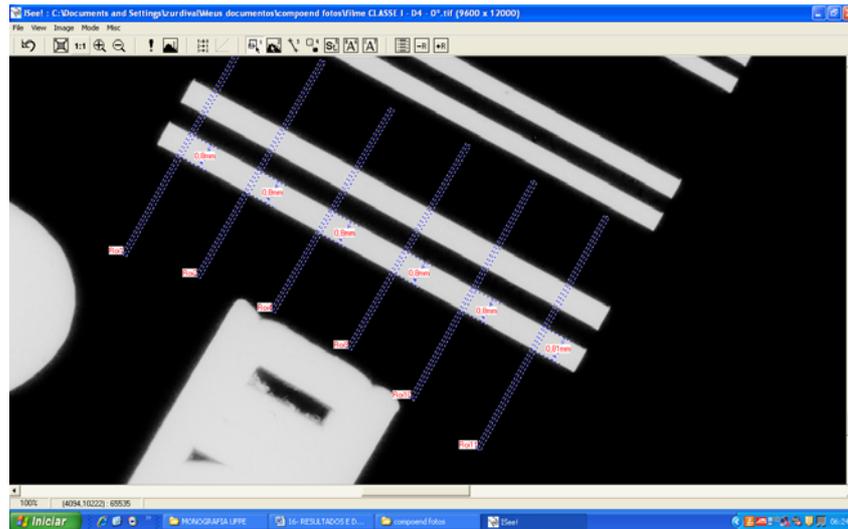


Figura 4.21 - Medição com smoothing 1 – Imagem 16bit

Tabela 4.2 – Medição do fio do Par 1 – 16 bits

Medições realizadas na imagem do filme classe II 0° - Par de fio 1 - 16 bits							Média
Dimensões reais	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Valores medidos	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,81	0,8016

Para se realizar a medição acima se utilizou um dos recursos do Isee-demo.exe que, a partir da curva primária, traça a curva da primeira derivada, mostrando os pontos de inflexão daquela curva, obtendo-se assim a posição de onde podemos realizar a medição. A figura 4.22, mostra essas duas curvas.

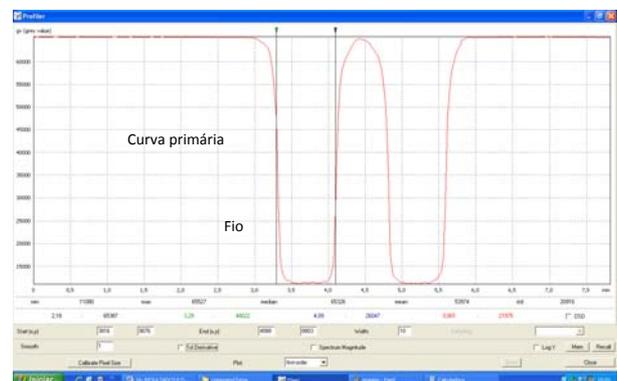
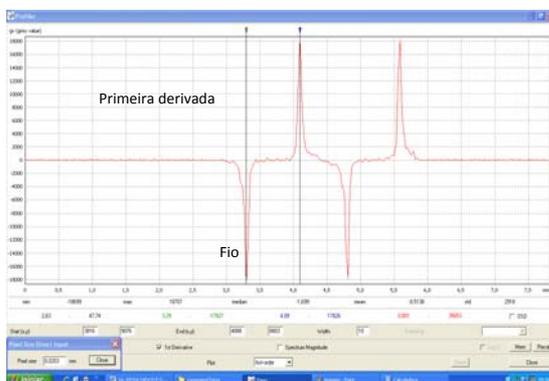


Figura 4.22 - Curva da primeira derivada e Curva Primária – 16 bits

- Resultado da medição da excentricidade do revestimento de silicone em relação ao bastão

A qualidade da imagem obtida permitiu a realização da medição com precisão. A afirmação se deve ao fato do conhecimento prévio das dimensões de projeto do isolador. Figura 4.23.

Para isso, foi usada a imagem do filme Classe II (AGFA D4) - 90° - 16 bits, a qual visualmente apresentava uma excentricidade mais acentuada.

Primeiramente mediu-se o diâmetro externo do bastão + o revestimento de silicone, depois o diâmetro do bastão de compósito e depois a diferença de espessura e deduzimos a excentricidade. Figuras. 4.24 a 4.26.

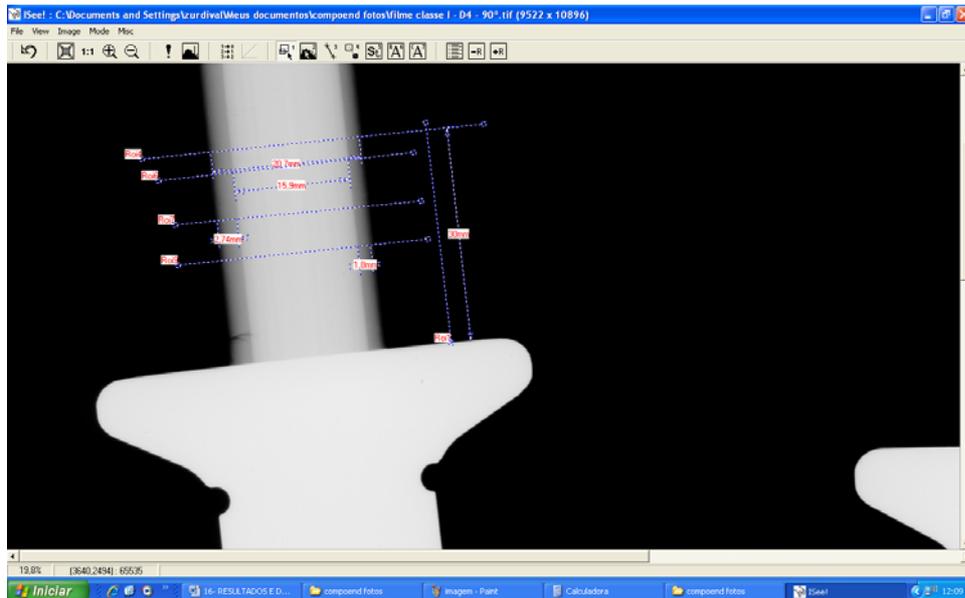


Figura 4.23- Medição da excentricidade do revestimento de silicone



Figura 4.24 - Medição do diâmetro do bastão de compósito com o revestimento – valor encontrado 20,7mm



Figura 4.25 - Medição do diâmetro do bastão de composto sem o revestimento – valor encontrado 15,9mm

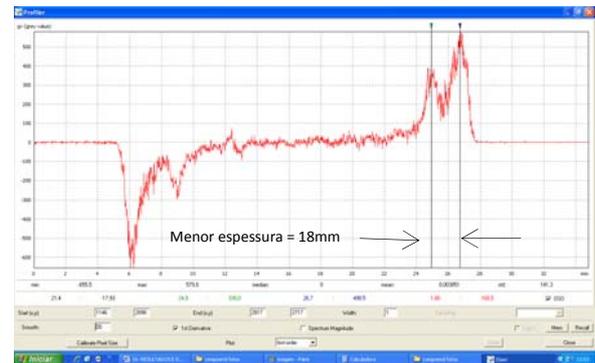
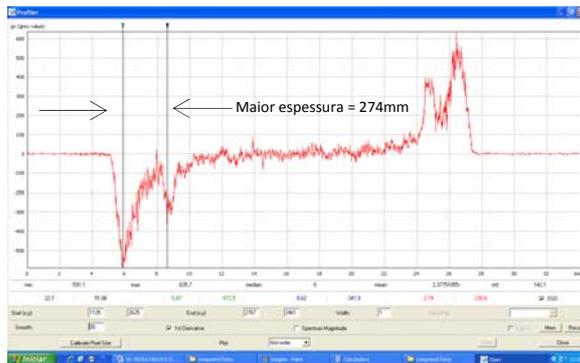


Figura 4.26 - Medição do revestimento em pontos diametralmente opostos – valores encontrados 2,74mm e 1,80mm

Excentricidade encontrada = $(2,74 - 1,80) / 2 = 0,47\text{mm}$.

- Medição da penumbra pelo software ISEE!

Utilizando o mesmo procedimento descrito para a medição do diâmetro do fio, obteve-se o valor da penumbra de 0,34mm. Como mostra a figura 4.27.

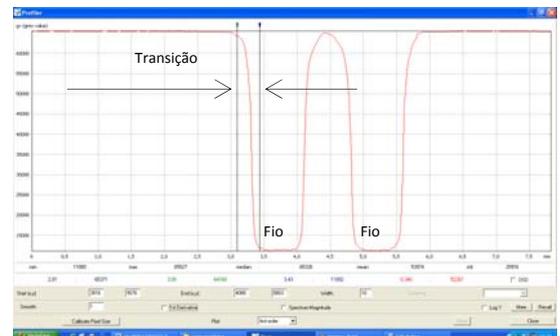
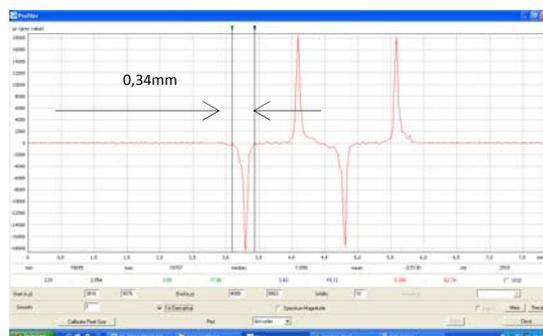


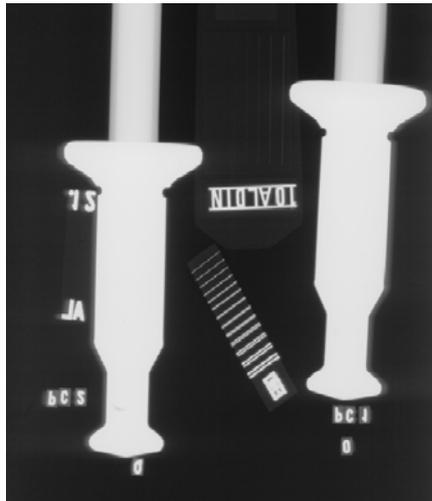
Figura 4.27 – Curva da primeira derivada e Curva Primária – 16 bits

4.2.2- Resultados obtidos pelo método convencional com imagens digitalizadas - 8bits

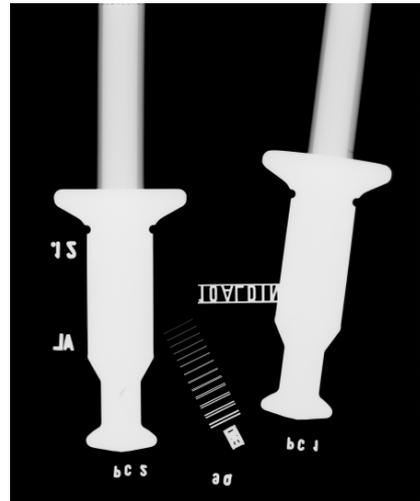
- Contraste

As imagens digitalizadas com 8 bits, também permitiram a visualização de trincas no revestimento de silicone, conforme mostram as figuras 4.28 e 4.29.

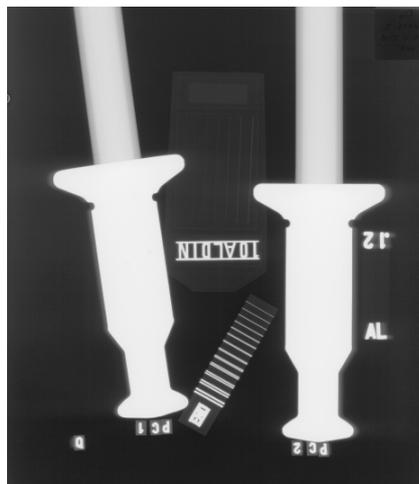
Abaixo seguem as imagens obtidas das duas amostras reveladas. Isso é; sem que as imagens tenham sofrido qualquer tipo de processamento.



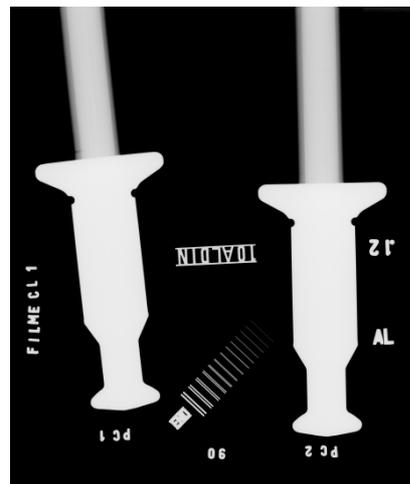
Classe II - 0° (AGFA D7) - 8 bits



Classe II - 90° (AGFA D7) - 8 bits



Classe I - 0° (AGFA D4) - 8 bits



Classe I - 90° (AGFA D4) - 8 bits

Figura 4.28 – Imagens dos filmes digitalizados com 8 bits

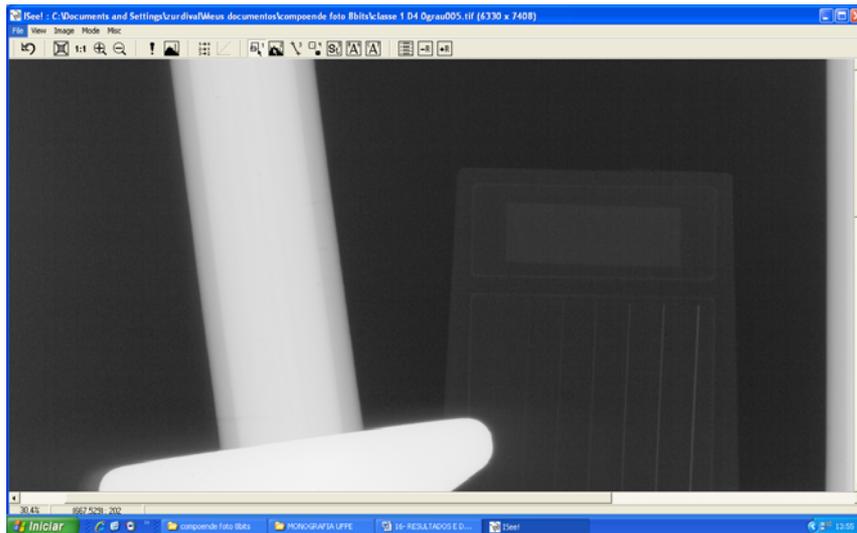


Figura 4.29 - Imagem sem processamento do filme Classe I (AGFA D4) - 0° – 8bits

- Resolução espacial das imagens digitalizadas com 8 bits , através do software Isse-demo.exe

O software Isse-demo.exe, permitiu constatar a excelente resolução do sistema através da imagem do IQI de fios duplos.

Como se pode observar, o último par de fios, o par de fios nº 13, ainda apresentou uma intensidade de aproximadamente 100% da intensidade máxima. Figura 4.30.

Os filmes foram digitalizados no scanner EPSON. Lançando-se mão do software ISEE, para processar as imagens obtidas e tomando-se por exemplo, a amostra nº 1, no filme Classe II - 0° (AGFA D4) –8 bits, e de maneira similar ao que foi feito com a imagem digitalizada com 16 bits, as mesmas observações e análise foram feitas, cujos resultados apresentamos abaixo:

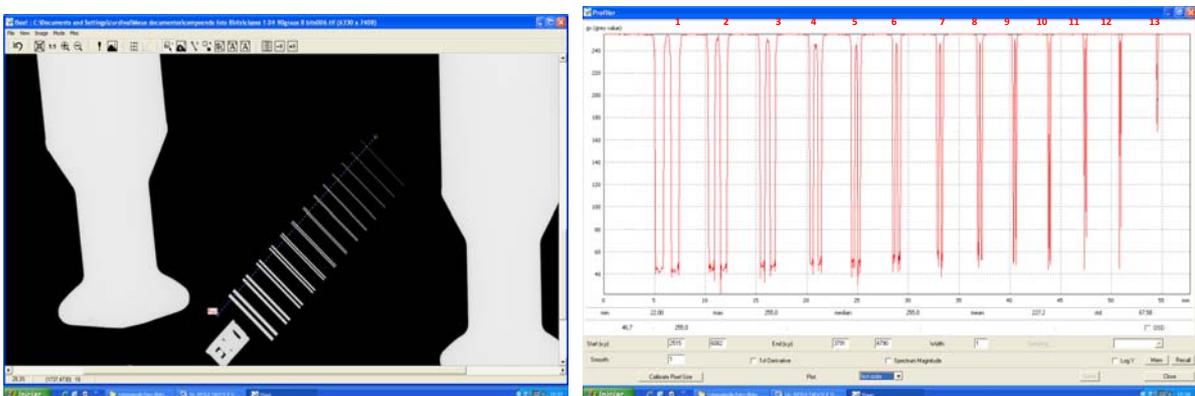


Figura 4.30 - Perfil da resolução espacial através do IQI de fios duplos – Software ISEE! – 8 bits – Imagem 90°

A exemplo das imagens digitalizadas com 16 bits, constatou-se também, uma boa resolução espacial, as figuras 4.31 a 4.33 mostram que a resolução das imagens, até o último par de fios, está satisfatória pois a densidades entre fios está acima dos 20%.

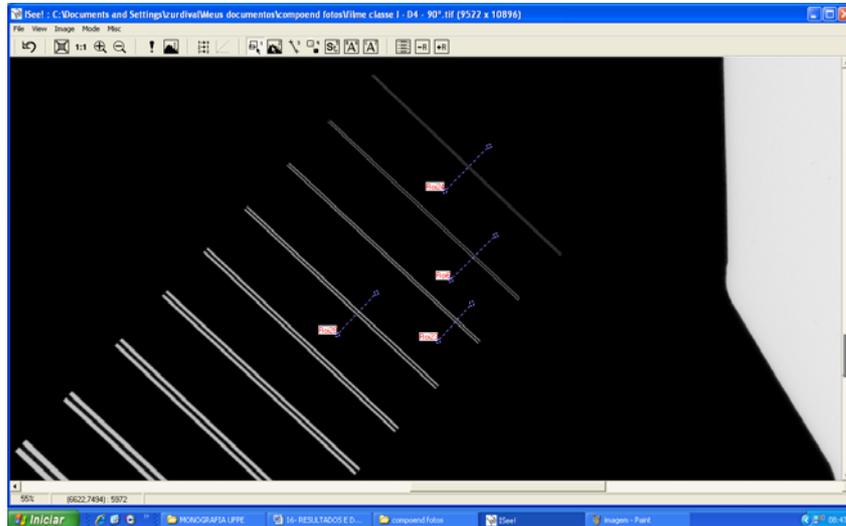


Figura 4.31 – Visualização dos pares n° 10,11, 12 e 13 – 8 bits – Imagem 90°

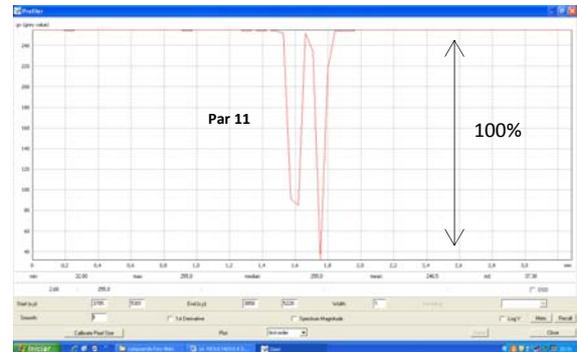
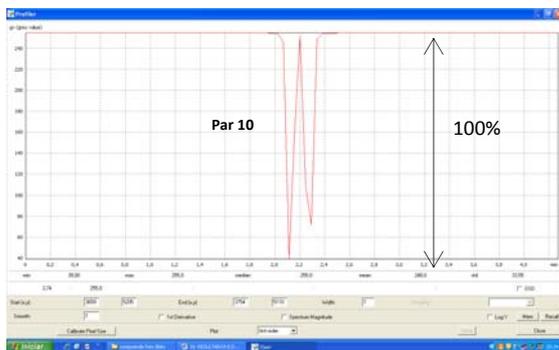


Figura 4.32 – Par de fios 10 e Par de fios 11 – 8 bits

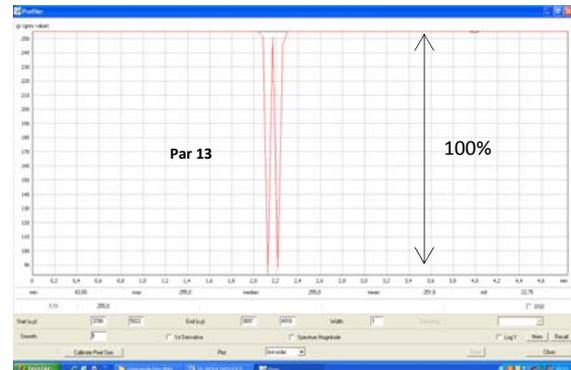
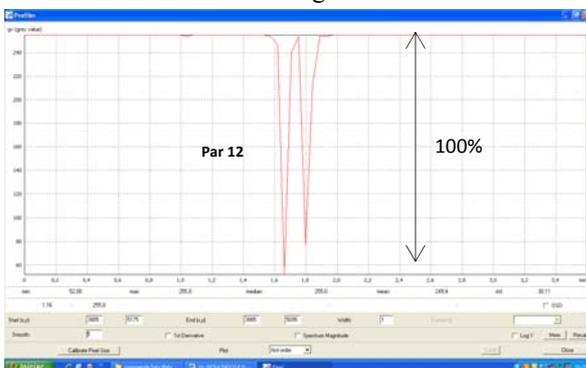


Figura 4.33 – Par de fios 12 e Par de fios 13 – 8 bits

- Conferência da eficiência do Isee-demo.exe para verificações dimensionais sobre a imagem digitalizada com 8 bits.

Adotando o mesmo procedimento utilizado com a imagem digitalizada com 16 bits, realizou-se a conferência do diâmetro de um dos fios do IQI de fios duplos em seis secções, ao longo de seu comprimento, para se ter uma idéia da precisão da medição, através do software, com essas imagens.

Também foi escolhido um dos fios do par nº1, cujo diâmetro é de $0,80\text{mm} \pm 0,02\text{mm}$ e a imagem do filme Classe II (AGFA D4) - 0° -16 bits, como mostra a figura 4.34 e os resultados obtidos estão registrados na tabela 4.5.

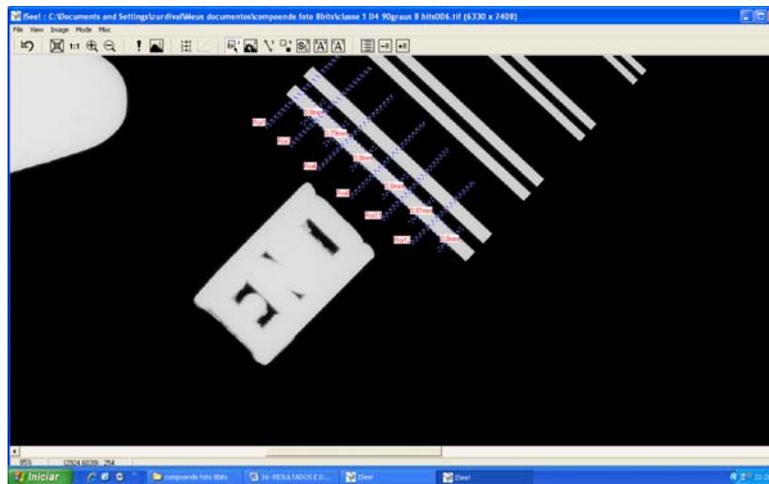


Figura 4.34 – Medição – Par de fios 1 – Imagem 8 bits0,

Tabela 4.3 – Medição do fio do Par 1 – 8 bits

Medições realizadas na imagem do filme classe II - 0° - Par de fio 1 - 8 bits							Média
Dimensões reais	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Valores medidos - 8 bits	0,80	0,79	0,80	0,80	0,80	0,81	0,80

Foi repetido o mesmo procedimento utilizado na medição sobre as imagens digitalizadas com 16bits. Através do software traçamos a curva da primeira derivada, obtendo-se assim o ponto onde podemos realizar a medição e a uma curva, que podemos chamar de primária com o perfil da resolução da imagem. Figuras 4.35.

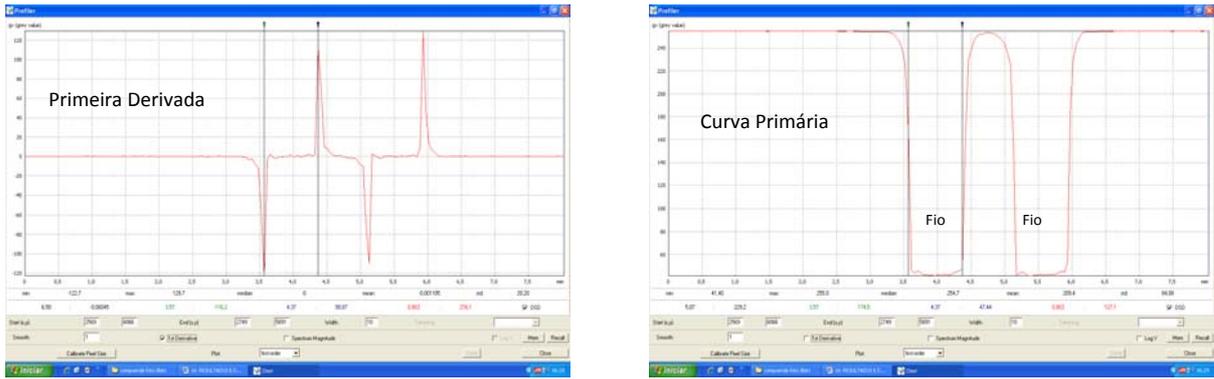


Figura 4.35 – Curva da primeira derivada e Curva Primária – 8 bits

- Medição da excentricidade do revestimento de silicone em relação ao bastão

Para isso se usou a imagem do filme Classe II (AGFA D4) - 90° - 8 bits, o qual visualmente apresentava uma excentricidade mais acentuada. Figuras 4.36 a 4.39, abaixo.

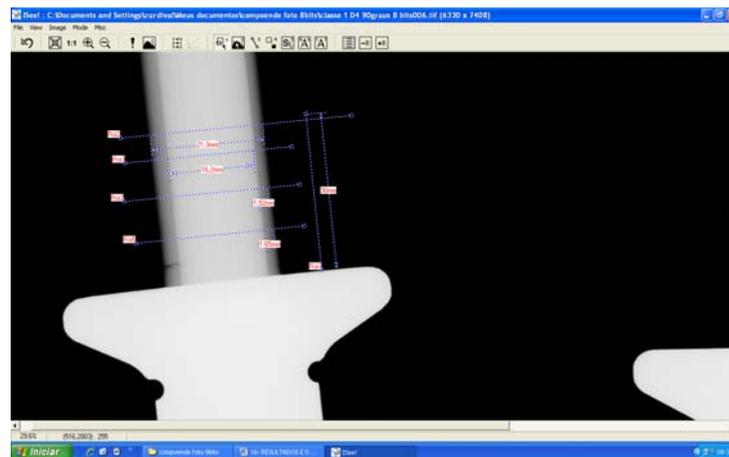


Figura 4.36 – Esquema da medição em 8 bits



Figura 4.37 - Medição do diâmetro do bastão com o revestimento – valor encontrado 21,3mm



Figura 4.38 - Medição do diâmetro do bastão sem o revestimento – valor encontrado 16,2mm – 8 bits

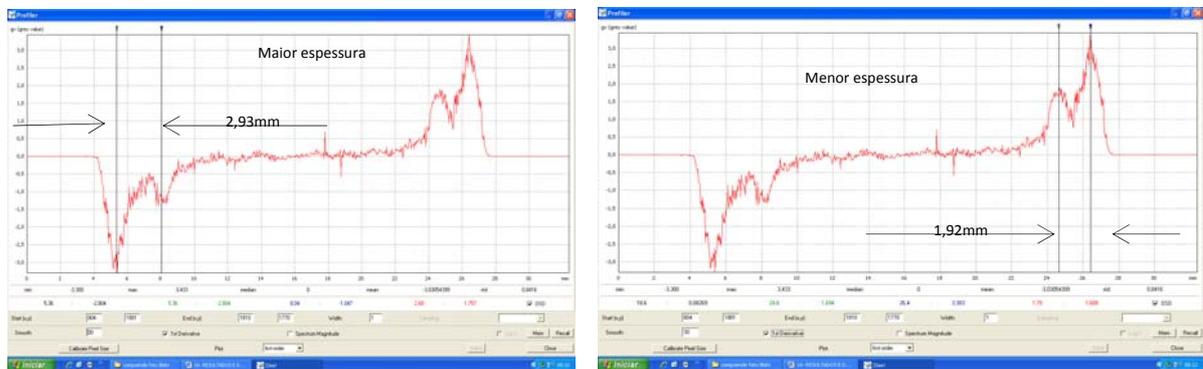
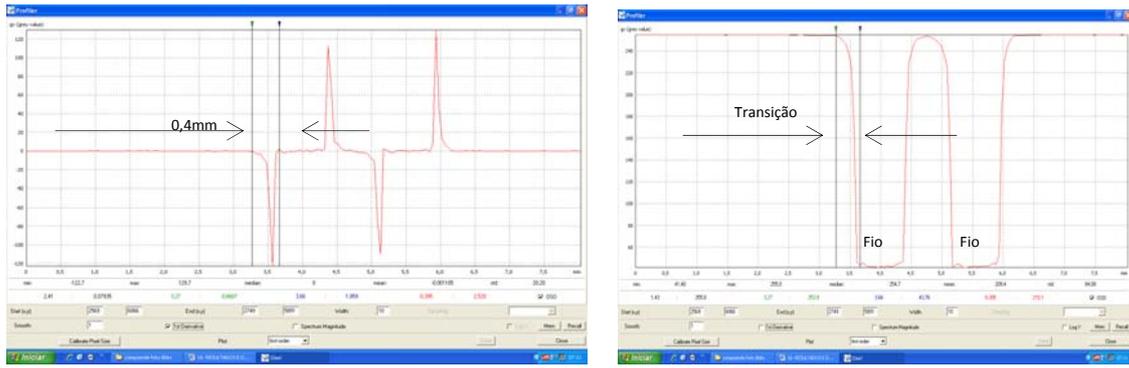


Figura 4.39 - Medição do revestimento de silicone em pontos opostos – valores encontrados 2,93mm e 1,92mm – 8 bits

Excentricidade encontrada = $(2,93 - 1,92) / 2 = 0,50\text{mm}$.

- Medição da penumbra pelo software Isse-demo.exe

Utilizando o mesmo procedimento descrito para a medição do diâmetro do fio do Par 1, obtivemos o valor da penumbra de 0,4mm. Como mostra a figura 4.40, sendo a imagem scanada com 8 bits



Figura

4.40 – Curva da primeira derivada e Curva Primária - 8 bits

4.3– Resultados apresentados pela radiografia computadorizada realizadas no BAM



Figura 4.41 - Radiografia digital - Sistema CR-Fuji - BAM

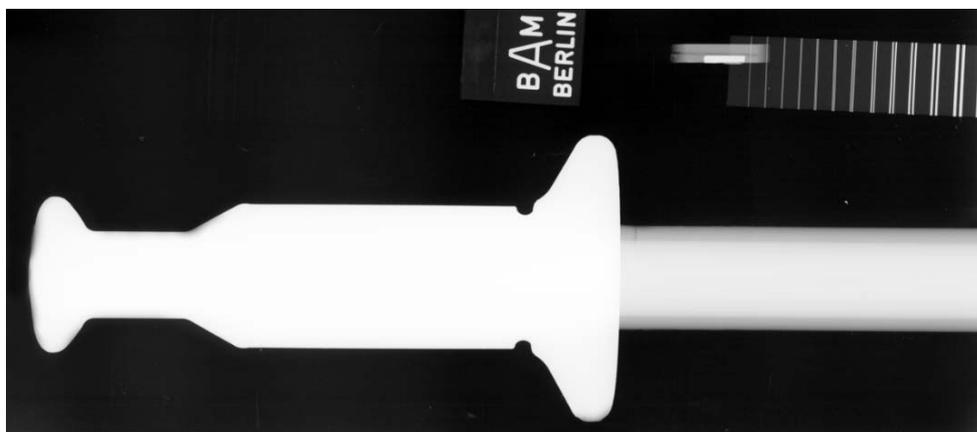


Figura. 4.42 - Radiografias digital - Sistema de radiografia HR-CR-Durr - BAM

4.3.1- Medições através das imagens computadorizadas - sistema CR-FUJI – Laboratório BAM

- Resultado da resolução espacial, sendo as imagens digitalizadas com 8 bits – Sistema CR-FUJI, através do software *Isse- demo.exe* .

Para se realizar as medições sobre as imagens realizadas no BAM, com o sistema CR-FUJI, também foi utilizado o software *Isse-demo.exe*.

Como se pode observar o último par de fios com imagem definida é o de número 7. Do oitavo par em diante, a imagem já não apresenta boa definição, pois está no limite para ser considerada satisfatória, ou seja, a menos de 20% da intensidade máxima. Do nono par em diante, não foi mais possível se distinguir os dois fios e a definição de imagem é insatisfatória, como mostram as Figuras 4.43.

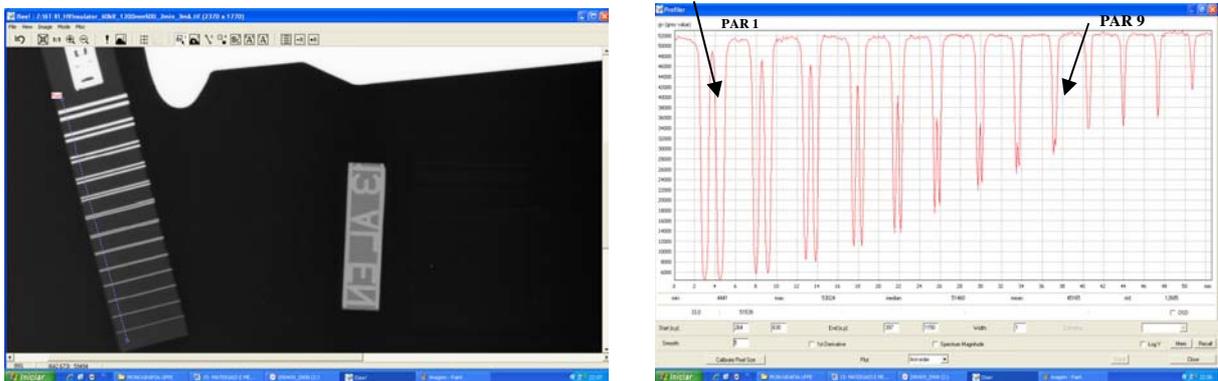


Figura 4.43- Perfil da resolução espacial através do IQI de fios duplos – 8 bits – Imagem 90°

A exemplo das imagens digitalizadas com 16 bits e 8 bits, realizou-se também, através do software *Isse-demo.exe*, as medições individuais nos pares de fios 7, 8, 9 e 10.

Constata-se que até o par de fios 7 a imagem apresenta uma definição satisfatória. Quanto à imagem do par número 8 ver-se que estar no limite para ser considerada satisfatória, ou seja de 20%. Do par 9 em diante, não é mais possível se distinguir os dois fios e a definição de imagem é insatisfatória, como mostram as Figuras nº 4.44 a 4.46. Como se pode verificar, não é possível visualizar a região entre os fios do par número 10. Figura 4.17.

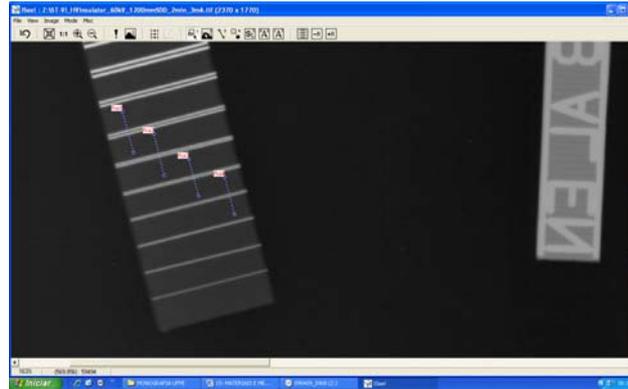


Figura 4.44 – Imagem CR-FUJI, utilizada na medição com o Isse-demo.exe

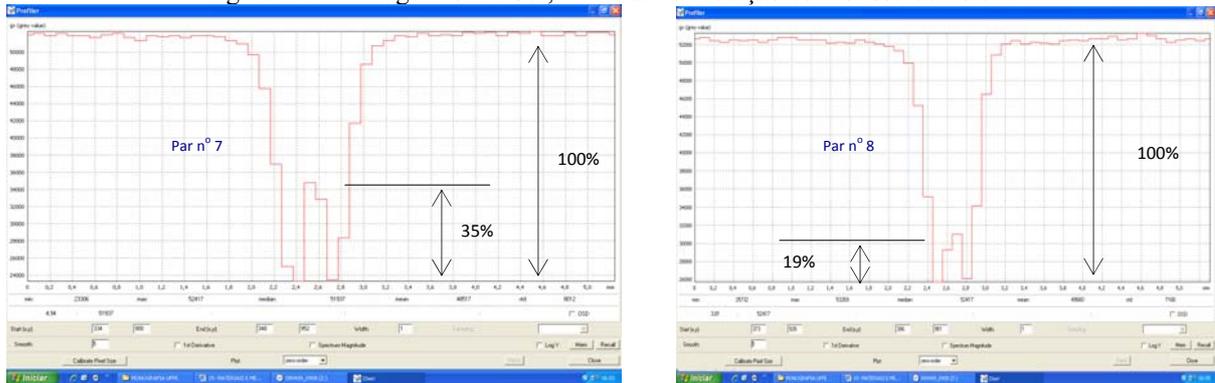


Figura 4.45 – Par de fios 7 e Par de fios 8 - CR FUJI

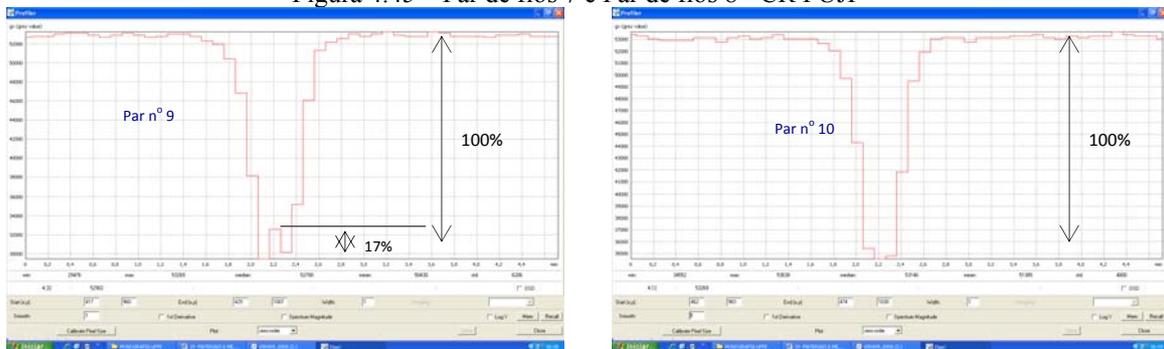


Figura 4.46 – Par de fios 9 e Par de fios 10 - CR FUJI

- Conferência da eficiência do software Isse-demo.exe para verificações dimensionais.

Antes de realizarmos as verificações, utilizando o Isse-demo.exe, foram executadas seis medições do diâmetro de um dos fios do par número1, do IQI de fios duplo, cujo diâmetro é $0,8\text{mm} \pm 0,02\text{mm}$ figura 4.47.

Foram realizadas seis medições e os resultados obtidos estão registrados na tabela 4.1

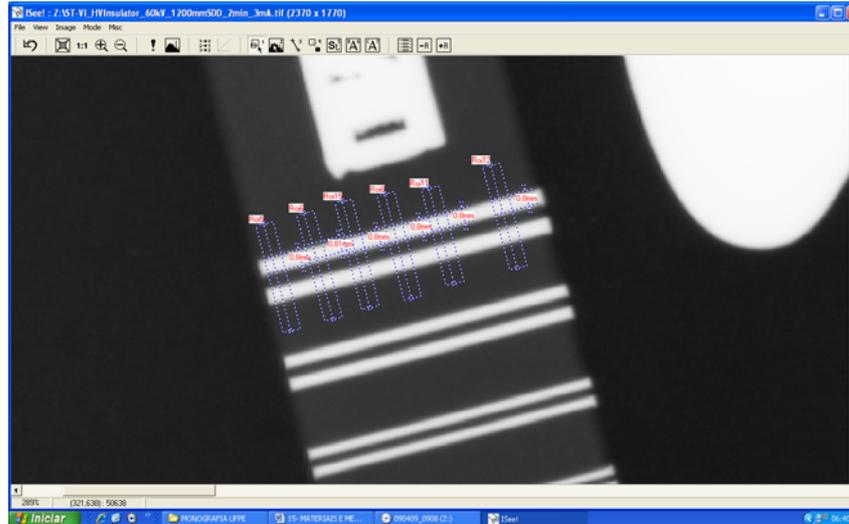


Figura 4.47 – Medição -Utilizando smoothing 1 – Imagem CR-FUJI - BAM

Tabela 4.4 – Medição do Par 1 - FUJI

	Medições realizadas na imagem do filme - CR - FUJI - Par de fios n° 1						
	1	2	3	4	5	6	Média
Dimensões reais	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Valores medidos 8 bits	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80

- Resultado da medição da excentricidade do revestimento de silicone em relação ao bastão

O Isse-demo.exe disponibiliza um recurso que, a partir do perfil da curva do grau de cinza, pode-se obter a curva da primeira derivada, onde são mostrados os pontos de inflexão. A medição foi realizada utilizando-se este recurso. Conforme mostrado nas figuras 4.48 a 4.50.

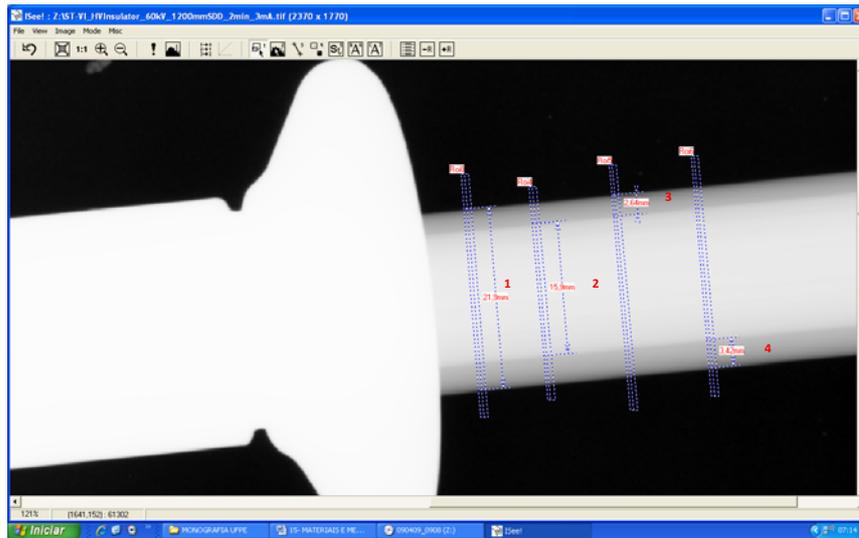


Figura 4.48 – Medição da excentricidade



Figura 4.49 - Medição dos diâmetros de revestimento e bastão – valores encontrado 21,9mm e 15,9mm



Figura 4.50 - Medição do revestimento em dois pontos diametralmente opostos – valores encontrados 2,64mm e 3,42mm – 8 bits

$$\text{Excentricidade encontrada} = (3,42 - 2,64) / 2 = 0,39\text{m}$$

Esse valor encontrado difere do medidos no Brasil por conta do feixe de raios X não ter incidido sobre o isolador na mesma posição.

- Medição da Penumbra

Utilizando-se o mesmo procedimento, obteve-se o valor de 0,39mm. Com estas imagens utilizou-se a função PLOT – FIRST ORDER., para efetuar uma melhor leitura, conforme mostra a figura 4.51.

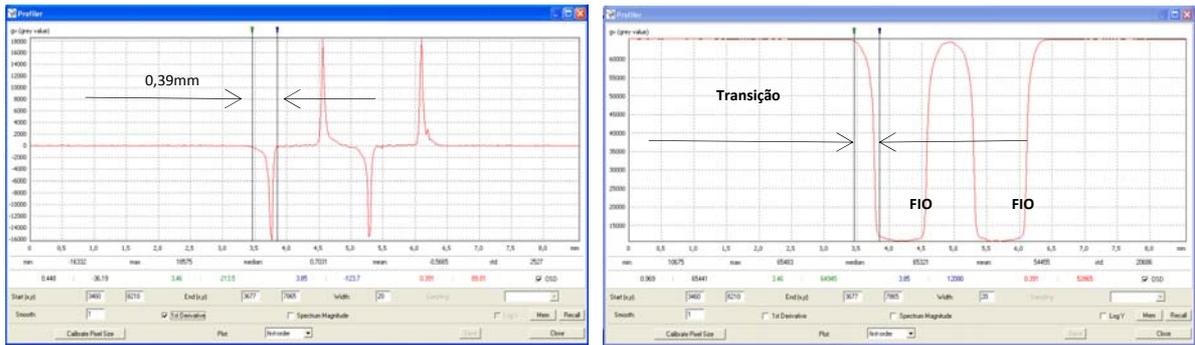


Figura 4.51 - Curva da 1ª derivada e perfil da curva primária utilizada na medição da penumbra

4.3.2- Medições através das imagens computadorizadas - sistema CR- DUR - Laboratório BAM

- Resolução espacial, sendo as imagens digitalizadas com 8 bits – Sistema CR-DUR, através do software *Isse- demo.exe* .

A medição através do software *Isse-demo.exe*, mostra que a resolução das imagens, sem que tenha sido processada, permite uma boa definição até o par de fio nº11, como mostram as figuras 4.52 a 4.54.

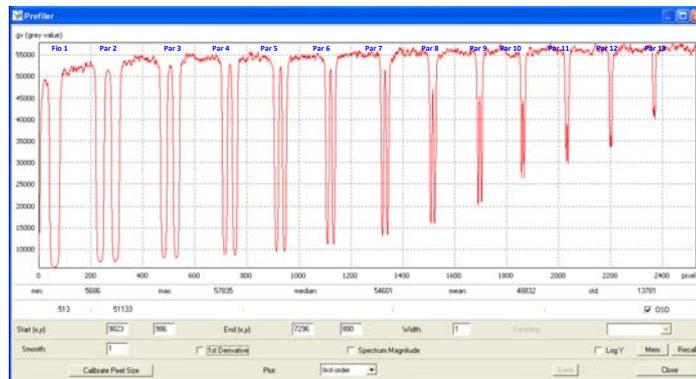


Figura 4.52 - Perfil da resolução espacial através do IQI de fios duplos

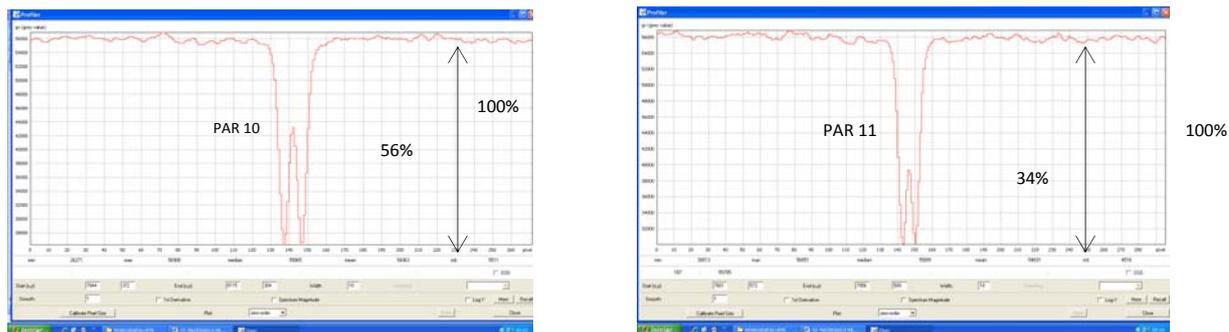


Figura 4.53 – Par de fios 10 e Par de fios 11 - CR – DUR

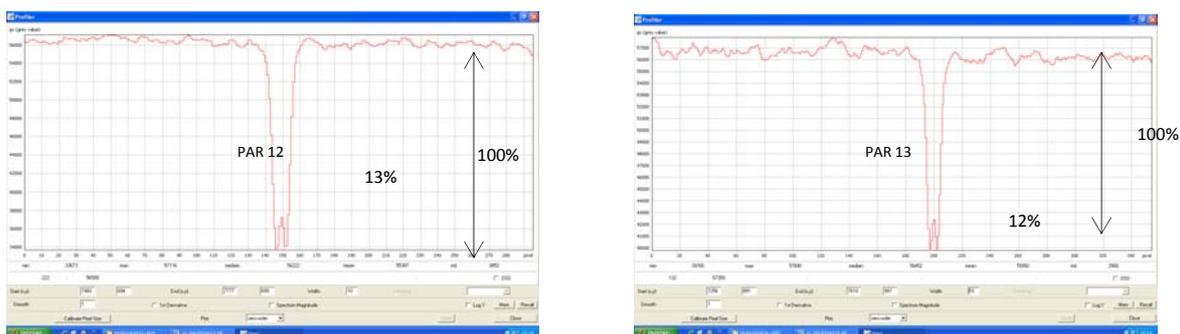


Figura 4.54 – Par de fios 12 e Par de fios 13 - CR - DUR

- Conferência da eficiência do software Isse-demo.exe para verificações dimensionais.

Para esta verificação utilizou-se o par de fios nº 12, cujo diâmetro é $0,63\text{mm} \pm 0,005\text{mm}$, por conta de que o par 13 não aparece completamente na imagem recebida pelo BAM. Fig. 4.55.

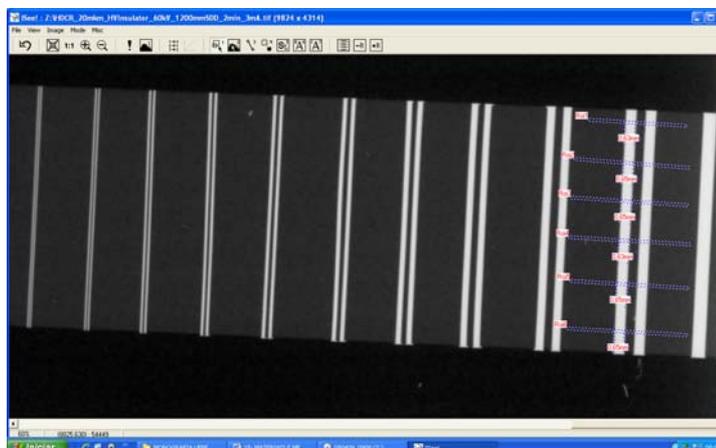


Figura 4.55 – Medições do fio do Par 2 - BAM

Tabela 4.5 – Medição do fio do Par 2 – RC-DUR

	Medições realizadas na imagem do filme – CR – DUR – Par de fios nº2						
	1	2	3	4	5	6	Média
Dimensões reais	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63

- Medição da excentricidade do revestimento de silicone em relação ao bastão.

Ver figuras de 4.56 a 4.58 , abaixo.

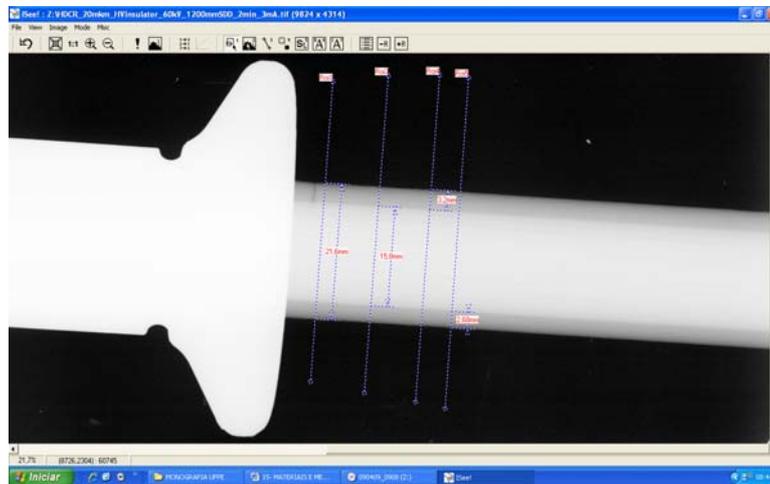


Figura 4.56 – Imagem usada para medição da excentricidade

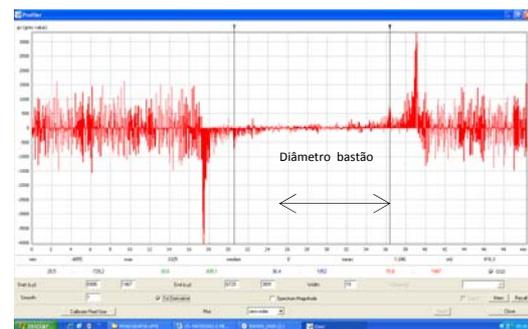
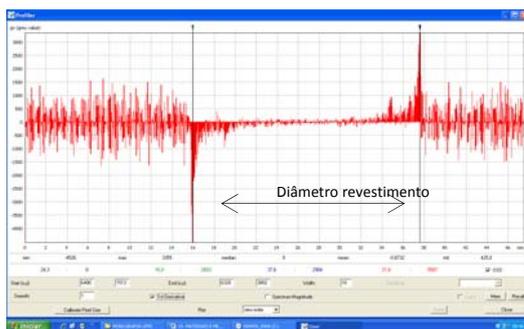


Fig. 4.57. - Medição dos diâmetros do revestimento e do bastão– valores encontrados: 21,6mm e 15,8mm

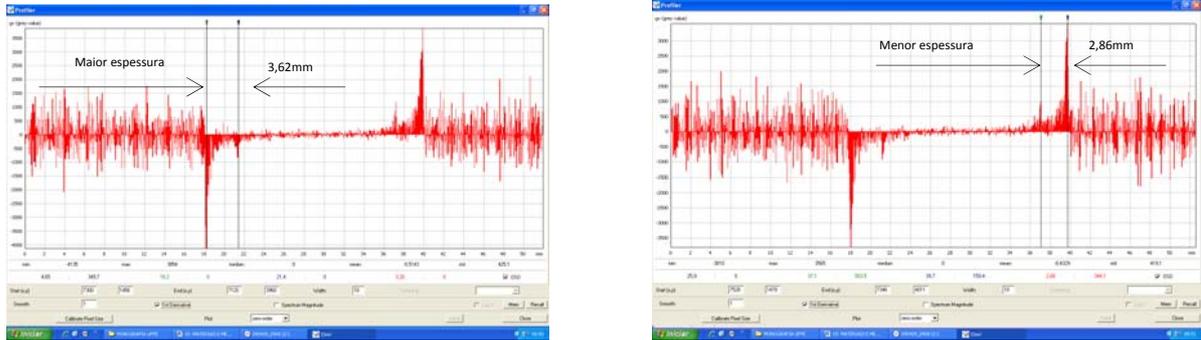


Figura 4.58 - Medição do revestimento em pontos diametralmente opostos – valores encontrados: 3,62mm e 2,86mm – 8 bits

$$\text{Excentricidade encontrada} = (3,62 - 2,86) / 2 = 0,26\text{mm}$$

Esse valor encontrado difere do medidos no Brasil e das imagens realizadas com sistema FUJI, por conta do feixe de raios X não ter incidido sobre o isolador na mesma posição.

- Medição da penumbra

Utilizando-se o mesmo procedimento, obtivemos o valor de 0,63mm, conforme mostra a figura 4.59. Com estas imagens teve-se que utilizar a função PLOT – FIRST ORDER., para efetuar uma melhor leitura.



Figura 4.59 - Medição da Penumbra

4.4- Resultados apresentados pela radiografia computadorizada – DEMEC/UFPE

- Contraste

As imagens pelo sistema digital realizado no laboratório de ensaios não destrutivos da UFPE apresentaram bons resultados e permitiram a visualização de defeitos no revestimento de silicone.

Abaixo seguem as imagens obtidas das duas amostras retiradas do isolador tipo II, sem processamento. A figura 4.60 mostra a imagem do terminal, lado cabo, na qual não foi detectada nenhuma indicação.

Como resultado de análise por radiografia computadorizada, na figura 4.60, é mostrada a imagem de radiografia computadorizada do corpo de prova-01. Apesar de apresentar ponto quente, quando foi inspecionado com o termovisor no campo, observa-se que através de imagem radiográfica não há defeitos no interior do isolador de compósito.

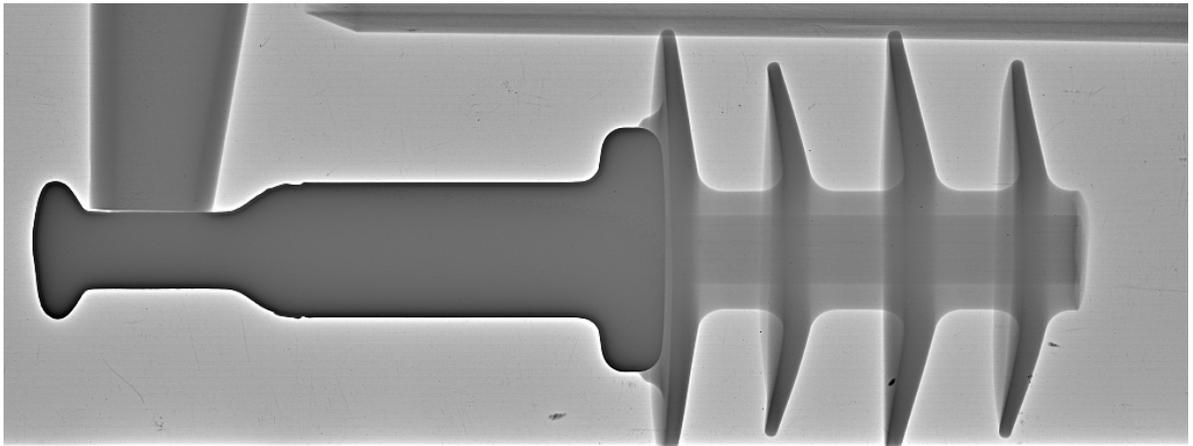


Figura 4. 60 - Imagem do corpo de prova-01 do isolador tipoII, livre de falhas - radiografia computadorizada

A figura 4.61 mostra o trecho seguinte, onde o detalhe salientado destaca a existência de trincas e vazios no revestimento de silicone. Esta região, com indicações, foi um dos locais onde se detectou ponto quente, através da câmera de infravermelho, durante uma inspeção de rotina da linha.

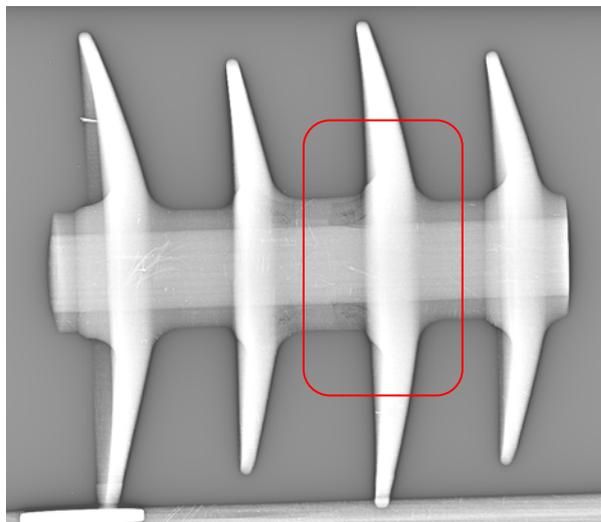


Figura 4.61 - Radiografia computadorizada do corpo de prova-02 com a presença de inúmeros vazios.

Na figura 4.62 está salientada a área com defeitos no corpo de prova 04, trecho que é continuação do corpo de prova n.03 e está mostrada na figura 4.63. Nesta área foi onde se detectou o terceiro ponto, uma posição mais distante da fase

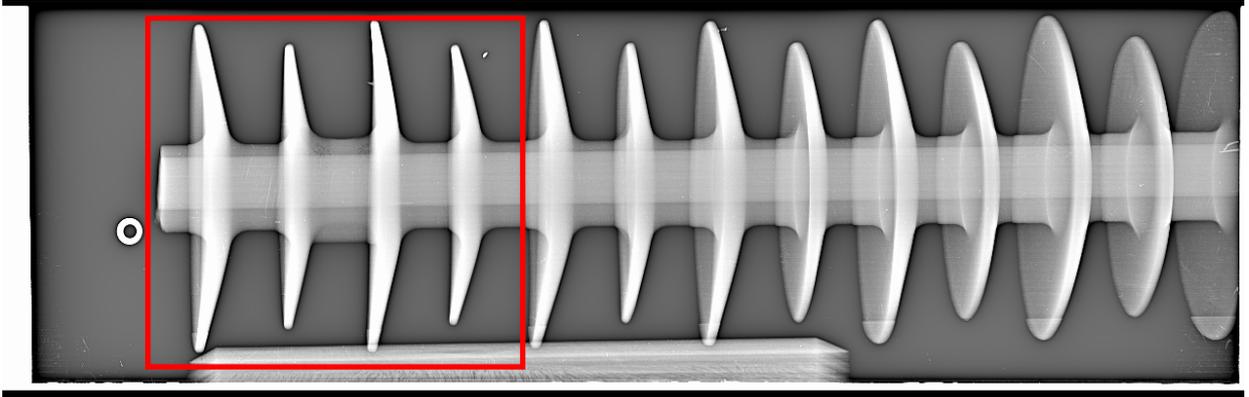


Figura 4.62. Vista geral da imagem de radiografia computadorizada do corpo de prova 04.

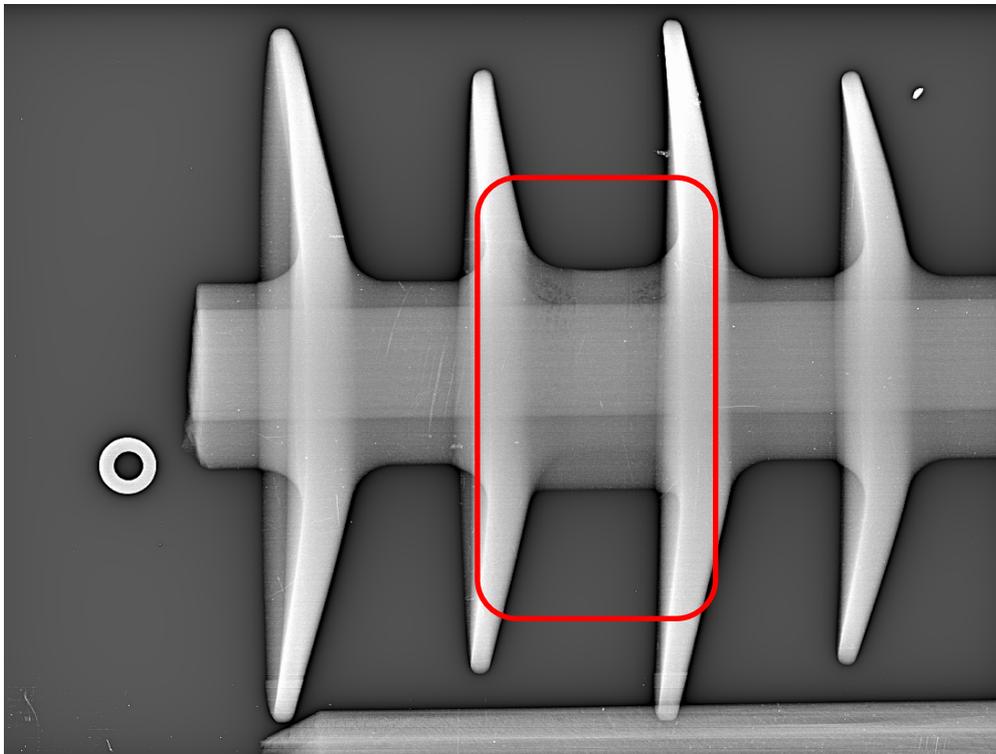


Figura 4.63. A região demarcada com linha vermelha. Nota-se também nesta região a presença de vazios.

Através de análise das imagens das radiografia computadorizadas com processamento de imagem, verificou-se que dos pontos quentes “1”, “2” e “3” detectados com o

termovisorde infravermelho no campo, figura 2.64, somente os pontos “2” e “3” coincidem com os locais em que os vazios foram detectados por radiografia, sugerindo que possui uma certa correlação com os defeitos existentes no material de revestimento e os pontos quentes.

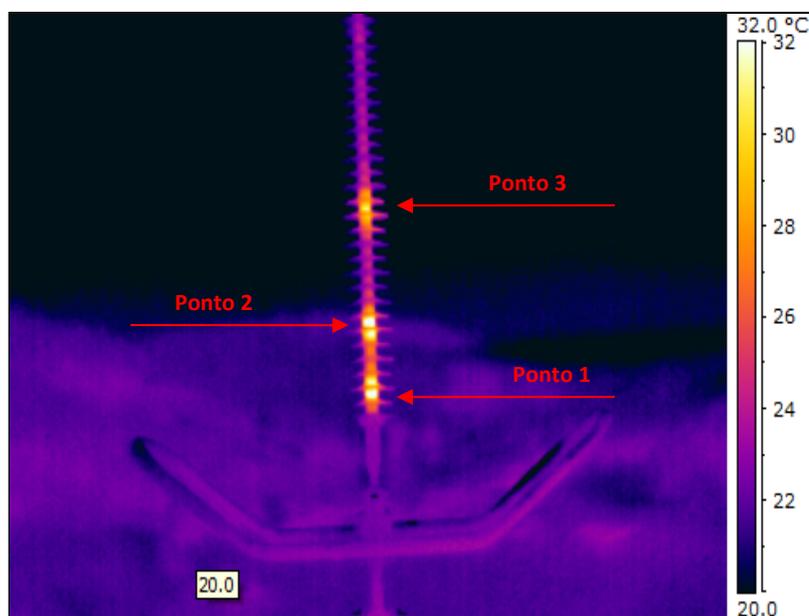


Figura 4.64 – Imagem feita através da termovisão – pontos 1, 2 e 3 (Pacheco)

Com respeito ao ponto quente “1”, analisando outras imagens de termovisor, figura 4.65, notou-se que, com início da incidência dos raios solares no isolador de compósito, os pontos quentes “2” e “3” desaparecem e, permanecendo visual somente o ponto quente “1” ao termovisor. Como foi mencionado acima, nenhum defeito similar aos que foram encontrados nas amostras 02 e 04 foram detectados, sugerindo que o ponto quente “1” deve estar relacionado com outro tipo de efeito térmico tal como efeito do intenso campo elétrico.

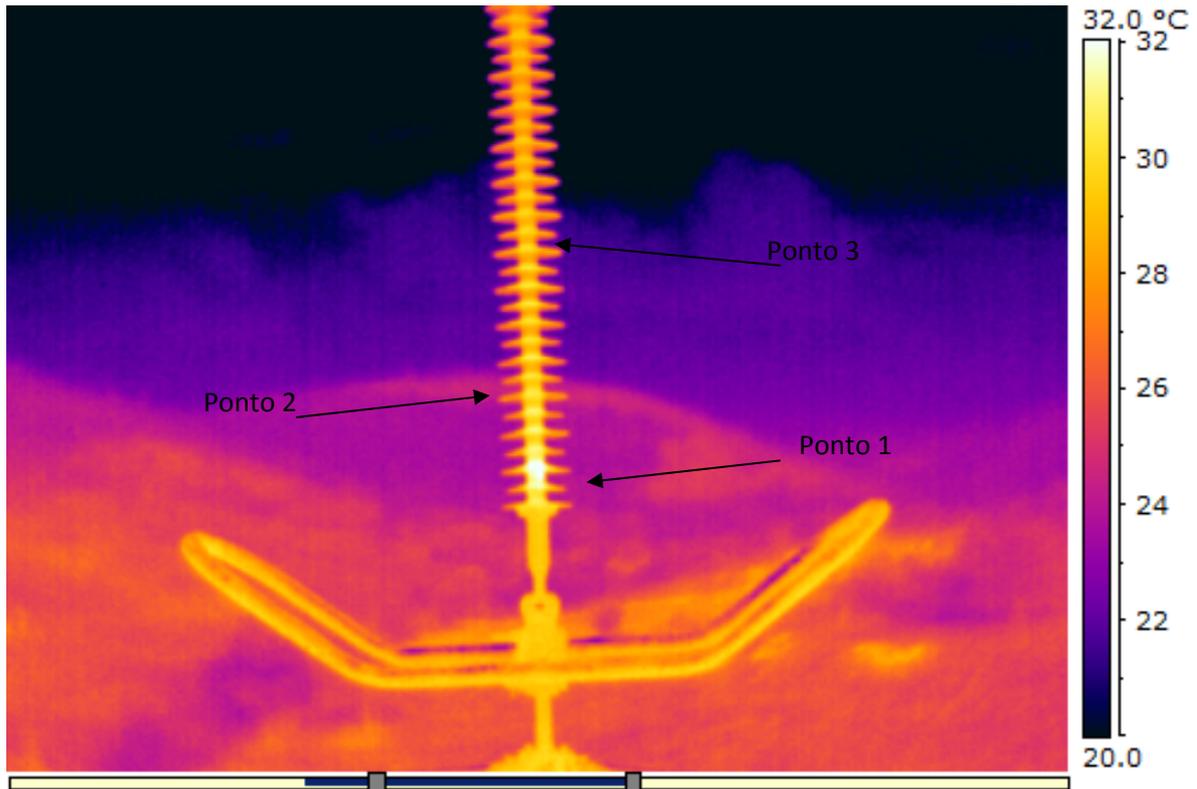


Figura 4.65. Termovisão do isolador, mostrando apenas o ponto quente 01, próximo à fase após a incidência dos raios solares (Pacheco).

Foi constatado que as falhas detectadas através da radiografia, nas amostras do isolador tipo II coincidem com os pontos onde existem os canais de injeção do silicone, para a cobertura do bastão e conformação das aletas. Isto nos mostra que, neste caso, estes defeitos são provenientes do processo de fabricação.

Outras radiografias, em pontos de injeção mais distantes do lado cabo, foram realizadas, sendo confirmada a existência de defeitos de mesma natureza. Estes pontos, por estarem localizados mais afastados do cabo, não se apresentaram suficientemente quentes para que o termovisor, na ocasião da inspeção em campo, conseguisse detectá-los.

Discussões

O trabalho de Oliveira e Lopes [2007], observa que equipamentos diferentes possuem resoluções diferentes. Isso realmente ficou mostrado pela diferença de pares resolvidos nas radiografias feitas pelos sistemas utilizados.

Abaixo, com o Isse-demo.exe, pode-se conferir a intensidade do sinal gerado por uma mesma trinca, registrada pelo image plate e pelo filme convencional, D4 digitalizado com 8btis. Figura 4.66-BAM e figura 4.67, respectivamente.

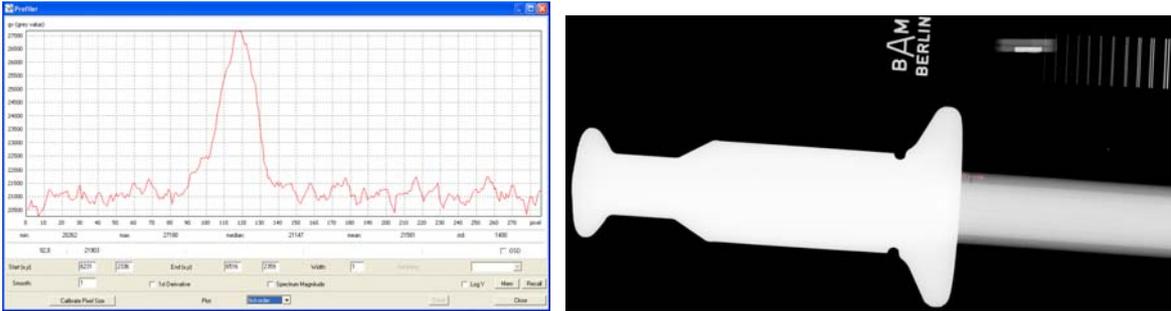


Figura 4.66 – Intensidade do sinal trinca RC FUJI –BAM

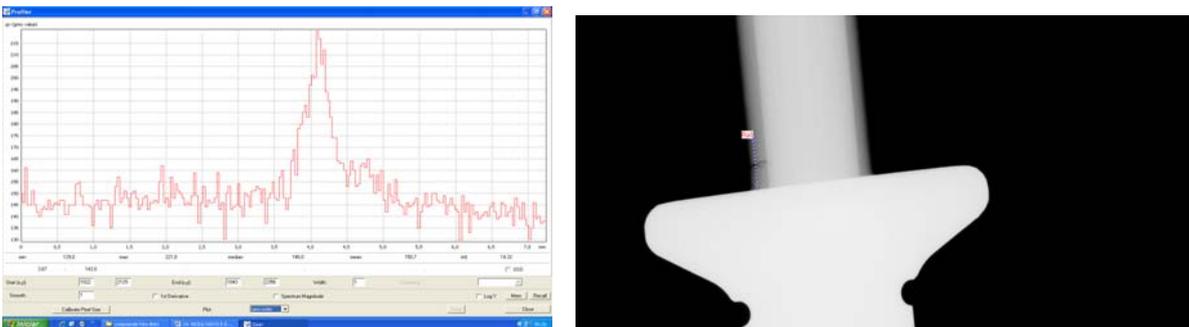


Figura 4.67 – Intensidade do sinal trinca - filme Classe 1 – D4 – 8 bits

A tabela 4.6, abaixo, mostra os resultados das medições realizadas sobre as imagens radiográficas

Tabela 4.6 – Medições realizadas

Comparação das medições através do ISEE nas imagens utilizadas – 8 bits				
Verificações	Medição com Paquímetro	RC Fuji	RC DURR	RX convencional Digitalizada
Ultimo Par de fios resolvido	*	7	11	13
Diâmetro do revestimento	21,3mm	21,9mm	21,6mm	21,3mm
Diâmetro do bastão	16mm	15,9mm	15,8mm	16,2mm
Excentricidade do revestimento	0,45mm **	0,39mm	0,26mm	1,97mm
Penumbra	*	0,59mm	0,63mm	0,4mm

* Não aplicada

** Esta verificação apenas informativa, visto que a medição com o paquímetro pode não ter sido perpendicular à direção do feixe radiográfico.

A questão da aderência do revestimento ao bastão é de fundamental importância, pois a aderência inadequada, propiciará a ocorrência de stress elétrico naquele ponto, degradando de forma precoce o revestimento e posteriormente fará com que o bastão seja exposto.

Alguns fabricantes realizam ensaio de ultra-som, por imersão, em suas linhas de produção para a verificação da aderência. O ensaio é realizado por amostragem e o percentual de amostras submetidas a este ensaio é função de um estudo estatístico que leva em consideração a confiabilidade que o fabricante tem em seu processo.

Outra questão diz respeito à excentricidade. Conforme dados de fabricantes, resultados práticos mostraram que o silicone puro pode resistir de 2,5kV/mm a 3,5kV/mm e o ideal é que se tenha uma cobertura capaz de suportar no mínimo 12kV.

Para que não seja necessária uma cobertura muito espessa, costuma-se adicionar trihidrato de alumina em percentuais específicos, como carga para melhorar a resistência ao trilhamento e à erosão e, obtém-se valores de 4,5kV/mm a 5,5kV/mm. O que para três milímetros representa 13,5kV a 17,7kV. Para os isoladores já instalados nas linhas, pode-se desenvolver dispositivos que permitam a medição dessa cobertura através de um dos dois métodos radiográficos, o convencional com posterior digitalização ou o computadorizado.

Percentuais de silicone elevado garantem uma boa hidrofobicidade porém, se o revestimento for instalado em uma região onde a atmosfera tenha elevado nível de poluição, fazendo com que ocorra a formação de crosta, o silicone sofrerá uma queda significativa na sua hidrofobicidade e passará a se degradar.

Foi constatado que, com método radiográfico convencional com posterior digitalização das imagens, oferece bom resultado, pois o experimento mostrou que até o par de fios 13 do IQI ficou resolvido.

Tanto a radiografia computadorizada como a radiografia convencional detectaram as trincas existentes nas amostras que continham esses defeitos, porém a tomografia se mostra como o método mais eficiente para a detecção e avaliação de defeitos, porém sua utilização se faz melhor em laboratório, pelo menos por enquanto, devido a sua portabilidade.

O baixo nível de radiação necessária para obtenção das imagens, a não utilização de produtos químicos para revelação, a possibilidade de se processar as imagens e a sua transmissão remota, fazem da radiografia digital uma boa ferramenta para detecção de defeitos de isoladores.

Existe uma ansiedade técnica entre usuários e fabricantes de isoladores, de que se desenvolva uma técnica que venha a agregar mais informações a respeito da integridade dos isoladores em operação, visto que as verificações através da detecção pontos quentes por

infravermelho e do campo magnético, através da câmera de corona, já se mostrou em alguns casos não serem suficientes para evitar algumas ocorrências.

Essas características e particularidades dos isoladores de compósitos mostram que aos métodos atuais de inspeção, em linhas vivas, deve ser agregado o método radiológico, sendo a tomografia a que permite melhor avaliação da integridade desses isoladores.

Observa-se que, pelo aquecimento do mercado, por conta da necessidade de expansão das linhas de transmissão, vem surgindo novos fabricantes. Alguns desses fabricantes não se mostram preocupados com as questões referentes à qualidade, visto seu baixo custo de produção e baixo custo de mão de obra para reposição das peças não conformes. Temos visto também empresas que realmente se preocupam com essas questões, por terem consciência do que pode representar, a falha de um isolador.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Através do presente trabalho pudemos colher subsídios para conhecer e avaliar a eficiência da radiologia na análise de revestimentos de silicone de isoladores de compósitos de 230KV, realizadas através dos seguintes métodos: Radiografia Convencional, associado à digitalização; Radiografia computadorizada, através do sistema CR-FUJI; Radiografia computadorizado, através do sistema CR-DUR e ainda da técnica através da micro tomografia.

A digitalização das imagens obtidas pelo método convencional se mostrou eficiente e adequada para uma investigação segundo os critérios das normas aplicáveis e possibilitou a detecção de trincas existentes.

A radiografia computadorizada mostrou-se eficiente e apresentou a vantagem por permitir a realização dos ensaios com um nível uma intensidade menor que o método convencional. Isso impacta diretamente na questão de segurança, visto que o raio de exposição passa a ser menor, causando menos transtorno ao andamento dos serviços, quando há necessidade de se realizar no campo e ainda não se faz necessária a utilização e descarte de produtos químicos, como no processo de radiografia convencional.

A micro-tomografia apresentou imagens mais nítidas e precisas.

Em função da resolução superior, em comparação aos sistemas de radiografia convencional e computadorizada, conseguiu-se visualizar outras trincas que, através dos outros métodos não foi possível se identificar, significando que para uma análise mais precisa os outros sistemas apresentam limitações.

Só através da micro-tomografia foi possível identificar com precisão a geometria das trincas originárias na região de aderência entre o bastão e o revestimento.

Concluimos também, que a digitalização de filmes obtidos através do método convencional, se mostra uma boa opção operacional e confiável.

Na prática as imagens podem ser obtidas no campo e enviadas, por um arquivo eletrônico a um especialista em qualquer parte do mundo para a emissão de laudo.

Concluimos também que a radiografia computadorizada é capaz de detectar falhas em revestimento de silicone que, nem sempre são detectadas através das técnicas atualmente em uso. Isso vem mostrar que a mesma deve ser incluída nas inspeções, tanto em fábrica, como instalações já energizadas.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

1- Estudar a utilização da micro-tomografia para avaliar o processo de ocorrência de trincas em revestimentos de Silicone;

2- Desenvolver um método para dimensionamento de defeito em revestimento de isoladores instalados em linhas energizadas;

3- Elaborar estudo para verificar se a ocorrência de trincas está relacionada a algum tipo de esforço mecânico resultante após a montagem dos isoladores nas linhas

4- Desenvolver dispositivo que permita a execução de radiografia computadorizada em isoladores de compósito em linhas energizadas.

REFERÊNCIAS

ADAM J. **Overhead Line Insulators**, Artigo publicado pela Knol. Disponível em: <<http://knol.google.com/k/adam-junid/overhead-line-insulators/22z3waum2dn6b/2#>>. Acesso em: 24 jun. 2009.

ANDREUCCI R. A. **Iniciação à radiografia industrial**. Disponível em: <<http://portal.uninove/dbfiles/CC97BE3D-FC5E-23BD-183F1C0734AD1DB6.Arquivo.pdf>>. Acesso em: 26 abr. 2009.

ARMENTROUT D. L.; KUMOSA M.; McQUARRIE T. S. **Boron-free fibers for prevention of Acid Induced Brittle Fracture of composite insulator GRP Rods** - IEE Transactions on power delivery, vol. 18, NO. 3, July 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5472** - Isoladores e Buchas para eletrotécnica – Terminologia.

_____. **NBR 6023**: informação e documentação: referências – Elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 6027**: informação e documentação – Sumário – Apresentação. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 40520**: Informação e documentação – Citações em documentos – Apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos – Apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

ASTM E 2007-00 – Standart Guide for Computed Radiology, Photostimulable Luminescence (PLS) Method.

BAVENDIEK K.; et al. **New Digital Radiography Procedure Exceeds Films Sensitivity Considerably in Aerospace Applications**. ECNDT-2006-th 3.2.1. Disponível em: <<http://www.ndt.net/search/pdf2html.phd?url=article/ecndt2006/doc/th.3.2.1.pdf>>. Acesso em: 3 maio 2009.

CARDOSO E. M. **Aplicações da Energia Nuclear**. CNEN, Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/ensino/apostila/radio.pdf>> Acesso em: 02 maio 2009

CHESEBROUGH. **Isoladores compostos para subestações**:- Especificação técnica - ET-DSE 160 - Jan. 2006.

COPEL - **Especificação para Isoladores de Silicone**. Tipo Suspensão

COSER E.; et al. Estudo da Degradação Térmica de Materiais Poliméricos Utilizados na construção de Para-ráios. Disponível em:

<<http://buscatextual.cnpq.br/buscatextual/visualizavc.jsp?id=k4781418h0>>. Acesso em: 27 jun. 2009.

DARCY R. M.; et al. **Avaliação do Grau de Poluição em Instalações de Transmissão, Subestações**. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/Citenel2001/trabalhos%5C33.pdf>>. Acesso em: 24 jun. 2009.

OLIVEIRA, Davi F; LOPES, Ricardo T. **Avaliação da qualidade de imagem em sistemas de radiografia computadorizada e image plates**. IV Conferência Panamericana de END – Buenos Aires, out. 2007.

ERIC D. **Digital Radiography in Applications**. Agfa Gevaert N.V. 2nd MENDT

Proceedings, Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/mendt03/agfa/agfa.html>>. Acesso em: 06 jun. 2009.

EWERT U.; ZSCHERPEL U.; Bavendiek K. **Film replacement by Digital X-Ray Detectors and Equipment**. Disponível em:

<http://www.ndt.net/article/wcndt2004.pdf/radiography/666_ewert.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2009.

FONTONELA C. A.; OLIVEIRA, A. P. **Recobrimentos poliméricos hidrofóbicos sobre isoladores elétricos de porcelana**. Disponível em:

<<http://www.scielo.br/pdf/rmat/v13n4.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2009

GÓIS, N. C.; et al. **Aplicação de Sensor para Monitoramento da Degradação de Isoladores Poliméricos de EPDM na COELBA**. SNPTEE, Out. 2007. Disponível em:

<http://www.zonaeletrica.com.br/downloads/transmissão/SNPTEE_GLT-30.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2009.

GOMES M. M. Cargas Brancas. **Rubberpedia**. Disponível em:

<<http://www.rubberpedia.com/cargas-brancas.php>>. Acesso em: 22 jun. 2009.

GOMES M. M. Borrachs de Silicone. **Rubberpedia**, Disponível em:

<<http://www.rubberpedia.com/borrachas/borrachas-silicone.php>>. Acesso em: 22 jun. 2009.

GUBANSKI, S. M.; et al. **Diagnostic Methods for Outdoor Polymeric Insulators**.

Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4339466>. Acesso em: 17 abr. 2009.

GUTMAN Igor, STRI. **Guidelines for Diagnostico of composite insulators : for Visual Inspections; for hidrofphobicity; for in helicopter inspection.** International Conference, St. Petersburg 4-9, Oct. 2004, pp 88-99. Disponível em:
<http://www.stri.se/public/2004_lipken_guide_ig.pdf>. Acesso em 24 jun. 2009.

IEC 1109 – **Composite insulators for a.c. overhaead lines with a nominal voltage greater than 1000V.** Definitions, test methods and acceptance criteria.

INONE P., PIAZZA F. e TOMIOKA J. **Caracterização de Isoladores Poliméricos Envelhecidos Artificialmente.** Disponível em:
<<http://citenel.aneel.gov.br/historico/IIcitenel/Anais%20do%20II%20Citenel%20-%20VOLUME%20I/Materiais.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2009.

INSTALAÇÕES RADIATIVAS-CNEN-NN-6.04. Resolução CENEN-31/88. Publicada em 26 jan. 1989. **Funcionamento de Serviço de Radiografia Industrial.** Disponível em:
<<http://www.cenen.gov.br/segurtanca/normas/pdf/Nrm604.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2009.

HARARA Walfik. **Digital Radiography in Industry.** 17th World Conference on Nondestructive Testing, 25-28, oct. 2008, Shangai, China. Disponível em:
<<http://www.ndt.net/article/wcndt.2008/papers/12.pdf>> Acesso em: 06 jan.2009.

KOBAYASHI S. et al, **Development of Composite Insulators for Overhead Lines.** Disponível em: <http://www.furukawa.co.jp/review/fr019/fr19_23.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2009.

KODAK. **Radiography in Modern Industry.** Disponível em:
<<http://www.kodak.com/enk/documents/87/0900688a802b3c87/Radiography-in-Modern-Industry.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2009.

_____. **Ensaio não Destrutivos: Ensaio Radiográficos.** Disponível em:
<[hppt://www.qualidadeaeronautica.com.br](http://www.qualidadeaeronautica.com.br)>. Acesso em: 25 de fev.2009.

KUMOSA M. et al. **Flailure Analyses fo Nonceramic Insulators Part 1: Brittle Fracture Characteristics.** Disponível em: <http://www.engr.du.edu/CFAMS/insulation_mag_1.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2009.

LUIZ C. **Benefícios da Tecnologia de Grãos-T nas Películas de Radiografia Industrial.** Disponível em:
<http://www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/películas_radiograficas_com_Gr_os-T.pdf>. Acesso em: 05 maio.200.

MARTIN S.; et al. **Development of multi sensor and multi source computed tomography systems.** Internacional Symposium on Digital Industrial Radiology and computed tomography, jun 2007, Lyon, France. Disponível em:
<<http://www.ndt.net/article/dir2007/papers/25.pdf>> Acesso em 06 jul. 2009.

MAX G. N. et al. **Propagação do Calor em Isoladores Poliméricos**. Disponível em: http://www.labplan.usfc.br/congressos/SBSE/anais/178_sbse2006_final.pdf >. Acesso em 13 mar. 2009.

MELLO D. R. **Cuidados na seleção de isoladores poliméricos**: O problema da aderência. Trabalho apresentado no Congresso Latino Americano de Distribuição Elétrica. Mar Del Plata, Set. 2008

MUHAMMAD A; et al. **Compsite Insulators and their aging**: An overview. Disponível em: <http://www.springerlink.com/content/m657305q445v274m/>>. Acesso em: 25 maio. 2009.

NICHOLAS P. C., Elastomer **Technology Handbook**. Edited by Nicholas P. C. Disponível em: <http://books.google.com>>. Acesso em: 10 mar. 2009.

OLIVEIRA, David F. **Avaliação da qualidade de imagem em sistemas de radiografia computadorizada e image plates**. Disponível em: <http://www.ndt.net/article/panndt.2007/papers/40.pdf>>. Acesso em: abr. 2009.

OLIVEIRA, L. S. R. **Princípios da Proteção Radiológica**. Disponível em: http://www.tecnologiaradiologica.com/materia_princ_prot_radiol.html>. Acesso em: 27 jun. 2009.

PAIVA, Osvaldo; Simões e Miguel. **Reviewing 10 years of operating experience with composite insulators at Chesf**. Disponível em: http://www.inmr.com/2009WorldCongress/Paiva_paper2.pdf>. Acesso em: 05 fev. 2008.

PARANHOS R. **Radiologia Industrial**. Disponível em: <http://ronaldo.paranhos.net/en/END8-Radiologia.pdf>>. Acesso em: 04 jan.. 2009.

PFISTERER, **Silicone protects from the dust and the rain**. Disponível em: <http://pfisterer.co.uk/p-anwendunsbeispiele.php?id=39&land=16&coc=118&nav=overheadlines>>. Acesso em: 31 maio 2009.

PORTELA K. F.; et al. Efeitos da poluição atmosférica (litorânea e industrial) em isoladores da rede elétrica da região de Salvador. **ScieLO Brasil**. Disponível em: <http://quimicanova.s bq.org.br/qn/qnol/2008/vol31n2/28-ar07143.pdf> > Acesso em: 22 jun. 2009.

QUEIROZ I. B., NERI M. G. e COSTA E. G. **Mapeamento do Campo Elétrico em Isoladores Polimérico com Defeitos**. Disponível em: http://www.labplan.susc.br/congressos/SBSE/anais/179_sbse2006_final.pdf>. Acesso em: 14 maio. 2009.

RADIOGRAFIA Industrial. Disponível em:
<<http://www.bibvirt.futurousp.br/download/6111/49143/file>>. Acesso em: 25 jun. 2009.

RESOLUÇÃO ANEEL Nº 270/07

RIBEIRO F. B. **Procedimentos de ensaio radiográfico**. Departamento de Geofísica - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas – (Universidade de São Paulo – 2007).

SADDOCK A. S.; et al. **Estudo da Otimização da radiografia digital através da razão sinal-ruído diferencial**, IV Conferência Panamericana de END. Buenos Aires, Out. 2007. Disponível em: <<http://www.ndt.net/articles/pannde2007/papers/41.pdf>>. Acesso em: 25 jun. 2009.

SADDOCK A. S. et al. **Estudo da otimização da radiografia digital através da razão sinal-ruído diferencial (SdNR)**. IV Conferência Panamericana de END. Buenos Aires, Oct. 2007. Disponível em: <<http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/41.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2009.

SANTOS L. S. et al. **Estudos do processo de pultrusão de compósitos poliméricos**. Disponível em: <<http://www.ufscar.br/cobeqic07/pdf/oral/c3.pdf>>. Acesso em: 05 abr. 2009.

SCHUMUCK, F.; TOURREIL, C. **Brittle Fractures of Composite Insulators an investigation of their Occurrence and Failure Mechanisms and Risk Assessment**. Disponível em: <http://www.corocam.co.za/papers/paper_6501.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2009.

SHINOHARA A. H.; et al. **Aplicação da Radiografia Digital como Técnica Preditiva para Diagnóstico dos Equipamentos de Linhas de Transmissão e Subestações**. Projeto de P&D.

_____. **Avaliação da Técnica de Radiografia Digital em Gamagrafia** - 6ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos. Ago. 2002.

_____.; et al. **Detection in Electrical Insulators and Breaker for High Voltage by Low Cost Radiography System**. Disponível em:
<<http://www.ndt.net/articles/dir2007/papers/p10.pdf>>. Acesso em: 28 mar. 2009

SILVEIRA A. J. et al. **Isoladores Poliméricos: As experiências da ENENRSUL. Rede Energia e da ESCELSA. Grupo Energia do Brasil no uso destes isoladores em suas linhas de 138kV**. Disponível em: <<http://www.labplan.usfc.br/congrassos/XIIIEric/D1/D1-04.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2009.

SIMÕES, Heleno R.; et al. **Vantagens da Radiografia Computadorizada para peças Fundidas. Metais & Fundição Brasil**, n.29, out. 2008. Disponível em:
<<http://www.guiadasiderurgia.com.br>>. Acesso em: 03 jul. 2009.

THIAGO P. L.; et al. **Avaliação de Sistemas de Digitalização de Filmes Radiográficos de Baixo Custo e Processamento de Imagens Através de Software Dedicado**

TOKORO T., NAGAU, M.; KOSAKI, M. **Image Analysis of Hydrophobicity of Polymer Insulators by Observing at Microscopic Area on line**. Disponível em: <http://www.gifu-nct.ac.jp/elec/tokoro/fft/CEIDP2000-hc.PDF>. Acesso em: 23 maio 2009.

VIDEIRA João Carlos et al. **Vantagens Obtidas em Radioproteção Quando do Uso de Radiografia Computadorizada- RC (Digital) em Plantas de Processo**, 3rd PAN-AMERICAN CONFERENCE FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <http://www.aaende.org.ar/sitio/biblioteca/material/T-100.pdf>. Acesso em: 23 maio 2009.

VILLANCOURT G. H. e BILODEAU P. Diagnostic of Composite Insulators Used on Series Compensation Platforms in Hydro-Québec. **IEEE**. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/login.jsp>. Acesso em: 23 jun. 2009.

WALMOR C. G. **Detecção de defeitos em isoladores poliméricos através de técnicas de processamento de imagens radiográficas**. XXII Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos, jul. 2004.

ZSCHERPELI U. **Film digitalization system for DIR: Standard, Requirements Archiving and printing**. Disponível em: <http://www.BAM>. Acesso em: 07 maio 2009.