Campus de São Carlos

**ESTUDO SOBRE ISOLADORES POLIMÉRICOS À BASE DE
RESINAS POLIURETANAS PARA AMBIENTE EXTERNO**

Autora: Angela Bonomo

Orientador: Prof. Tit. Ruy Alberto Corrêa Altafim

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**ESCOLA DE ENGENHARIA
DE SÃO CARLOS**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO SOBRE ISOLADORES POLIMÉRICOS À
BASE DE RESINAS POLIURETANAS PARA
AMBIENTE EXTERNO.**

Angela Bonomo

Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Tit. Ruy Alberto Corrêa Altafim

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 26.10.2003

Ass:.....

Angela Bonomo

DEDALUS - Acervo - EESC

31100044191

São Carlos,
2003

Class. TESE
Cutt. 08/16
Tombo T297/03
Sysno 1338041

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

B719e Bonomo, Angela
Estudo sobre isoladores poliméricos à base de
resinas poliuretanas para ambiente externo / Angela
Bonomo. -- São Carlos, 2003.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de
São Carlos-Universidade de São Paulo, 2003.
Área: Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Tit. Ruy Alberto Corrêa Altafin.

1. Isoladores poliméricos do tipo pino. 2. Resinas
poliuretanas a base de óleo de mamona. 3. Granitos
sintéticos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheiro **ANGELA BONOMO**

Dissertação defendida e julgada em 27-06-2003 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Tit. **RUY ALBERTO CORRÊA ALTAFIM (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **DIÓGENES PEREIRA GONZAGA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

Prof. Dr. **NERI ALVES**
(UNESP/Campus de Presidente Prudente)

Aprovado

Prof. Assoc. **MURILO ARAUJO ROMERO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Elétrica

Prof. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

*A minha família, pelo estímulo e compreensão por todos
recebidos, ao longo do tempo, entre sábados, domingos, feriados e
madrugadas afora, envolvidos na execução deste trabalho.*

Agradecimentos

Ao Professor Titular **Ruy Alberto Corrêa Altafim**, pela excelente orientação fornecida durante a elaboração deste trabalho.

Ao Laboratório de Tribologia e Compósitos da EESC- USP e ao Laboratório de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros do Instituto de Química de São Carlos – USP, pela colaboração durante todo o período de pesquisa. Em especial, aos professores Gilberto Orivaldo Chierice e Benedito de Moraes Purquério, responsáveis por esses laboratórios, pela atenção dedicada.

À Embrapa Instrumentação Agropecuária de São Carlos, ao Instituto de Física da Unicamp e ao Departamento de Engenharia de Materiais da Universidade Federal de São Carlos, pela participação em artigos científicos.

À Empresa ELETROMECC, pelo apoio e pela licença de afastamento do trabalho durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao Grupo de Alta Tensão e Medidas (*GATM*), aos professores e aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP, e em particular à Dra. Cacilda Ribeiro Murakami e à Sra. Rosane Aranda pela colaboração neste trabalho.

E, finalmente, a todos os amigos que direta ou indiretamente tenham contribuído para o desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
CAPÍTULO 1: Introdução.....	1
CAPÍTULO 2: Pesquisa Bibliográfica.....	4
2.1 Introdução.....	4
2.2 Classificação dos isoladores.....	4
2.3 Desempenho dos isoladores no sistema de energia brasileiro.....	12
2.3.1 Geral.....	12
2.3.2 Isoladores elétricos instalados.....	12
2.3.3 Desligamentos em linhas de transmissão provocados por isoladores elétricos.....	13
2.3.4 Falhas em isoladores elétricos do tipo Pino, de porcelana e de vidro.....	14
2.4 Isoladores poliméricos.....	17
2.4.1 Introdução.....	17
2.4.2 Uma breve história sobre os isoladores poliméricos.....	18
2.4.3 Tendência de instalação.....	19
CAPÍTULO 3: Processo de Fabricação de fabricação dos isoladores poliméricos do tipo Pino.....	21
3.1 Introdução.....	21
3.2 Matriz de náilon para moldagem do isolador do tipo Pino.....	21
3.3 Matriz de elastômero de silicone para moldagem dos isoladores Pino.....	23
3.4 Seqüência do processo de fabricação da matriz do isolador do tipo Pino.....	24
3.5 Seqüência do processo de fabricação dos isoladores do tipo Pino.....	29
3.6 Estimativa de preços dos isoladores poliméricos em estudo.....	37

CAPÍTULO 4: Procedimentos dos ensaios realizados nos isoladores elétricos do tipo Pino.38

4.1 Introdução.....	38
4.2 Ensaio Elétrico.....	38
4.3 Ensaio de envelhecimento acelerado..	39
4.4 Ensaio térmico..	40
4.4.1 Ensaio de suportabilidade térmica, com variação de carga mecânica.....	40
4.4.2 Ensaio de envelhecimento térmico.....	41
4.5 Ensaos mecânicos.....	42
4.6 Tomografia Computadorizada.....	43
4.6.1 Geral.....	43
4.6.2 Condições de ensaios..	43
4.6.3 Procedimentos dos ensaios realizados no granito sintético..	44
4.6.4 Densidade média (ou global) dos materiais poliméricos dos isoladores..	45
4.6.5 Determinar os dados estatísticos das imagens tomográficas..	46
4.6.6 Análise tomográfica realizada no isolador de granito sintético com ruptura dielétrica.....	47

CAPÍTULO 5: Resultados dos ensaios: de envelhecimento acelerado, elétricos e térmicos realizados nos isoladores do tipo Pino..... 48

5.1 Introdução.....	48
5.2 Ensaio de envelhecimento acelerado..	48
5.3 Ensaio elétrico nos isoladores elétricos.....	51
5.4 Ensaio térmico..	54
5.4.1 Ensaio de suportabilidade térmica, com variação de carga mecânica.....	54
5.4.2 Ensaio de envelhecimento térmico.....	57
5.4.3 Conclusão do ensaio térmico.....	57

CAPÍTULO 6: Resultados dos ensaios de flexão mecânica e das tomografias computadorizadas realizadas nos isoladores do tipo Pino..... 59

6.1 Introdução.....	59
6.2 Ensaos de flexão mecânica nos isoladores do tipo Pino..	59
6.2.1 Comportamentos dos isoladores do tipo Pino sob carga de flexão..	59
6.2.2 Repetição do ensaio mecânico de carga à flexão nos isoladores que não se romperam: RI 1-a e RI 1-b..	65
6.2.3 Propriedades mecânicas dos isoladores do tipo Pino..	66
6.2.4 Conclusão dos ensaios de flexão mecânica..	72
6.3 Tomografias Computadorizada realizadas nos isoladores do tipo Pino.....	72

6.3.1 Imagens tomográficas e histogramas..	72
6.3.2 Resultados estatísticos das imagens tomográficas..	75
6.3.2.1 Seção 1 dos isoladores poliméricos do tipo Pino..	75
6.3.2.2 Seção 2 dos isoladores poliméricos do tipo Pino..	76
6.3.2.3 Média dos resultados dos coeficientes de atenuação linear e de massa do Isolador Pino, referentes aos dados das seções 1 e 2.....	78
6.3.3 Resultados das análises de homogeneidade nas misturas dos granitos sintéticos.....	79
 CAPÍTULO 7: Conclusões.....	 82
7.1 Conclusões.	82
7.2 Sugestões de trabalhos futuros.....	85
 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 86
 ANEXO A.....	 91
ANEXO B.....	94
ANEXO C.....	96
 APÊNDICE A.....	 107

Lista de figuras.

FIGURA 2.1: Isoladores elétricos: (a) de porcelana, (b) de vidro e (c) de material polimérico.	5
FIGURA 2.2: Isoladores elétricos: (a) Monocorpos e (b) Multicorpo com três partes.....	5
FIGURA 2.3: Isoladores de vidro temperado para cadeias de suspensão e ancoragem..	6
FIGURA 2.4: Isoladores de porcelana para cadeias de suspensão e ancoragem.....	7
FIGURA 2.5: Isolador de Disco de vidro temperado... ..	7
FIGURA 2.6: Isolador de Bastão de porcelana.....	8
FIGURA 2.7: Isolador de Suspensão de porcelana.	8
FIGURA 2.8: Isolador do tipo Pino de porcelana.....	9
FIGURA 2.9: Isolador do tipo Pilar de porcelana.....	9
FIGURA 2.10: Isolador Castanha.	9
FIGURA 2.11: Isolador Roldana.....	10
FIGURA 2.12: Isolador Suporte.....	10
FIGURA 2.13: Isolador Pedestal.....	11
FIGURA 2.14: Buchas para transformadores..	11
FIGURA 2.15: Buchas de passagem..	11
FIGURA 2.16: Causa de isolador solto do pino.....	15
FIGURA 2.17: Causa de aquecimento no topo do pino.....	15
FIGURA 2.18: Causa de radiointerferência.....	16
FIGURA 2.19: Ruptura da cabeça do isolador: (a) ruptura do isolador e (b) causa da ruptura devido ao encostamento do pino no fundo da cavidade.....	16
FIGURA 2.20: Sugestão de substituição do isolador de Pino pelo isolador Pilar.....	17
FIGURA 2.21: Exemplos de isoladores: (a) polimérico; e (b) composto polimérico; e (c) compostos poliméricos em condições de serviço.....	18
FIGURA 3.1: Fotografias da matriz do isolador polimérico em estudo: (a) matriz pré-montada e (b) matriz pronta para o enchimento.....	22
FIGURA 3.2: Isoladores poliméricos fabricados com as resinas RI 1 (o isolador de cor clara) e RI 2 (o isolador de cor mais escura), sem bolhas de ar: (a) vista lateral e (b) vista inferior.....	23

FIGURA 3.3: Caixa para fabricação e para suporte da molde de elastômero de silicone do isolador do tipo Pino: (a) vista frontal; (b) vista lateral e (c) vista superior...	24
FIGURA 3.4: Primeira fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.....	25
FIGURA 3.5: Segunda fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.....	25
FIGURA 3.6: Terceira fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.....	26
FIGURA 3.7: Quarta fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.....	26
FIGURA 3.8: Quinta fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.....	27
FIGURA 3.9: Sexta fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.....	27
FIGURA 3.10: Sétima fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.....	28
FIGURA 3.11: Oitava fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino... ..	28
FIGURA 3.12: Matriz final dos isoladores do tipo Pino: (a) partes individuais; e (b) montagem final.....	29
FIGURA 3.13: Isolador final do tipo Pino: (a) vista superior; e (b) vista lateral... ..	30
FIGURA 3.14: Primeira fase para a confecção do isolador do tipo Pino.	31
FIGURA 3.15: Segunda fase para a confecção do isolador do tipo Pino.	31
FIGURA 3.16: Terceira fase para a confecção do isolador do tipo Pino.....	32
FIGURA 3.17: Quarta fase para a confecção do isolador do tipo Pino.	32
FIGURA 3.18: Quinta fase para a confecção do isolador do tipo Pino.	32
FIGURA 3.19: Sétima fase para a confecção do isolador do tipo Pino.....	33
FIGURA 3.20: Oitava fase para a confecção do isolador do tipo Pino.	33
FIGURA 3.21: Nona fase para a confecção do isolador do tipo Pino.	34
FIGURA 3.22: Décima fase para a confecção do isolador do tipo Pino: (a) desmontagem da caixa de náilon; (b) retirada do isolador de dentro do molde; e (c) isolador com rebarba... ..	34
FIGURA 3.23: Décima fase para a confecção do isolador do tipo Pino: (a) isolador com rebarba; e (b) isolador com o acabamento final após a retirada das rebarbas.	35
FIGURA 3.24: Décima primeira fase para a confecção do isolador do tipo Pino.....	35
FIGURA 4.1: Ensaio elétrico no isolador do tipo Pino: (a) dispositivos utilizados; e (b) montagem do ensaio... ..	39
FIGURA 4.2: Esquema de montagem do ensaio: (a) na estufa, com a temperatura controlada; (b) na prensa hidráulica; e (c) com medição de temperatura e umidade do ar	41
FIGURA 4.3: Ensaio mecânico de flexão nos isoladores do tipo Pino: (a) esquema; e (b) dispositivo construído com material resistente.....	42
FIGURA 4.4: Isoladores poliméricos do tipo Pino.....	43

FIGURA 4.5: Seções analisadas na tomografia computadorizada: (a) seção 1 do isolador Pino e (b) seção 2 do isolador Pino.....	43
FIGURA 4.6: Granito natural não compactado: (a) medição da massa; e (b) medição do volume de material empregado.....	44
FIGURA 4.7: Determinação do coeficiente de atenuação do granito natural utilizado no compósito: (a) aparelho Analisador Granulométrico e (b) aquisição dos dados.....	45
FIGURA 4.8: Fotografias do método utilizado para determinação das densidades do materiais: (a) medição do volume; e (b) detalhe do isolador pendurado por um fio de náilon na medição de seu volume... ..	46
FIGURA 4.9: Área escolhida no isolador RI 1 do tipo Pino, na seção 1.....	46
FIGURA 4.10: Isolador de granito sintético GSRI 1 com defeito de fabricação... ..	47
FIGURA 5.1: Isolador Pino RI 2 usinado: (a) lado submetido à maior radiação ultravioleta; (b) lado oposto, submetido à menor radiação ultravioleta; e (c) parte interna do isolador... ..	49
FIGURA 5.2: Isolador Pino RI 2 usinado: (a) lado submetido à maior radiação ultravioleta; (b) lado oposto, submetido à menor radiação ultravioleta; e (c) parte interna do isolador... ..	49
FIGURA 5.3: Isolador Pino RI 2: (a) lado submetido à maior radiação ultravioleta; (b) lado oposto, submetido à menor radiação ultravioleta; e (c) parte interna do isolador... ..	49
FIGURA 5.4: Isolador Pino RI 1: (a) lado submetido à maior radiação ultravioleta; (b) lado oposto, submetido à menor radiação ultravioleta; e (c) parte interna do isolador... ..	50
FIGURA 5.5: Isolador Pino GSRI 2: (a) lado submetido à maior radiação ultravioleta; (b) lado oposto, submetido à menor radiação ultravioleta; e (c) parte interna do isolador... ..	50
FIGURA 5.6: Isolador Pino GSRI 1: (a) lado submetido à maior radiação ultravioleta; (b) lado oposto, submetido à menor radiação ultravioleta; e (c) parte interna do isolador... ..	50
FIGURA 5.7: Isolador Pino de Porcelana: (a) lado submetido à maior radiação ultravioleta; (b) lado oposto, submetido à menor radiação ultravioleta; e (c) parte interna do isolador.....	51
FIGURA 5.8: Parte inferior do isolador polimérico RI 1 após o ensaio de tensão aplicada...52	

FIGURA 5.9: Ocorrência do <i>flashover</i> externo nos ensaios elétricos do isoladores:(a) ruptura externa e (b) arco elétrico durante o ensaio com a iluminação do laboratório desligada.....	52
FIGURA 5.10: Resultados dos ensaios elétricos nos isoladores do tipo Pino, antes e depois do ensaio de envelhecimento acelerado (AEA e DEA, respectivamente)....	54
FIGURA 5.11: Resultado do ensaio b no isolador GSRI 1: (a) 500 kg aplicados durante 30 minutos, com o isolador aquecido; e (b) isolador sem deformação visível...	55
FIGURA 5.12: Resultado do ensaio c: (a) 2 toneladas aplicadas durante 30 minutos, com o isolador aquecido; (b) deformação de 4,0 cm; (c) isolador voltou a altura inicial após ficar um tempo na estufa; e (d) parte inferior deformada na prensa.....	56
FIGURA 5.13: Isolador de porcelana destruído após a carga de compressão de 6 toneladas...	56
FIGURA 5.14: Comparação do isolador que sofreu envelhecimento térmico. Da esquerda para a direita: isolador submetido ao ensaio (mais escuro), e isolador não submetido ao ensaio.....	57
FIGURA 6.1: Isolador Pino GSRI 2-a:(a) sob carga de flexão na Máquina Universal de Ensaio; e (b) ruptura mecânica.....	60
FIGURA 6.2: Isolador Pino RI 2 -a:(a) sob carga de flexão; (b) ruptura mecânica.....	61
FIGURA 6.3: Isolador Pino RI 2-b:(a) sob carga de flexão; (b) ruptura mecânica.....	61
FIGURA 6.4: Ruptura mecânica do Isolador Pino GSRI 2-b.....	61
FIGURA 6.5: A alça de cabo de aço se despreendeu.....	62
FIGURA 6.6: Isolador Pino GSRI 1-a:(a) sob carga de flexão; (b) ruptura mecânica.....	62
FIGURA 6.7: Repetição do ensaio no Isolador Pino RI 1- a, com a alça de ferro.....	63
FIGURA 6.8: Repetição do ensaio no Isolador Pino GSRI 1- a, com a alça de ferro.....	63
FIGURA 6.9: Ruptura mecânica do Isolador Pino GSRI 1-b sob carga de flexão.....	64
FIGURA 6.10: Isolador Pino RI 1- b, sob carga de flexão.....	64
FIGURA 6.11: Isolador Pino RI 1-c sob carga de flexão.....	65
FIGURA 6.12: Observação durante o ensaio de flexão mecânica no isolador RI 1-b: (a) 1ª aplicação, observou-se que o isolador não se deformou, (b) 5ª aplicação, o isolador apresentou uma pequena deformação; (c) após o término do ensaio, o isolador retornou à sua posição inicial; (d) isolador 5 minutos depois do término do ensaio; (e) isolador depois de 24 horas do término do ensaio....	66
FIGURA 6.13: Curvas características do ensaio de flexão nos isoladores à base da resina RI 1: (a) RI 1-a, RI 1-b, GSRI 1-a e GSRI 1-b em função da D.e.; e (b) RI 1-a, RI 1-b, GSRI 1-a e GSRI 1-b em função do tempo de ensaio.....	68

FIGURA 6.14: Curvas características do ensaio de flexão nos isoladores à base da resina RI 1: (a) repetição do ensaio nos isoladores RI 1-a e RI 1-b em função de D.e.; e (b) repetição do ensaio nos isoladores RI 1-a e RI 1-b em função do tempo de ensaio.....	69
FIGURA 6.15: Curvas características do ensaio de flexão nos isoladores à base da resina RI 2: (a) carga em função da D.e.; e (b) carga em função do tempo de ensaio...	71
FIGURA 6.16: Ruptura mecânica dos isoladores do tipo Pino produzidos com granito sintético.....	71
FIGURA 6.17: Seção 1 do isolador do tipo Pino fabricado com a resina RI 1: (a) imagem tomográfica; (b) escala da imagem em cm^{-1} e (c) histograma da tomografia...	73
FIGURA 6.18: Seção 2 do isolador GSRI 2: (a) imagem tomográfica; (b) escala da imagem em cm^{-1} e (c) histograma da tomografia.....	74
FIGURA 6.19: Características dos isoladores do tipo Pino...	77
FIGURA 6.20: Densidade dos materiais dos isoladores do tipo Pino...	77
FIGURA 6.21: Valores médios dos coeficientes de atenuação μ e μ_M , referente às análises nas seções 1 e 2 dos isoladores do tipo Pino...	78
FIGURA 6.22: Desvios padrão dos coeficientes de atenuação μ e μ_M , referentes às análises nas seções 1 e 2 dos isoladores do tipo Pino...	79
FIGURA 6.23: Identificação dos valores de baixa densidade (valor baixo de μ) nos isoladores do tipo Pino: (a) de Porcelana - seção 1 e (b) GSRI 1 – seção 1, com defeito...	80

Lista de tabelas.

TABELA 2.1: Quantidade aproximada de isoladores instalados em linhas de transmissão [5].....	13
TABELA 3.1: Custo da principal matéria prima utilizada nos isoladores em estudo.....	37
TABELA 5.1: Tensão de ocorrência de <i>flahover</i> externo nos isoladores do tipo Pino antes do ensaio de envelhecimento acelerado (AEA).....	53
TABELA 5.2: Tensão de ocorrência de <i>flahover</i> externo nos isoladores do tipo Pino depois do ensaio de envelhecimento acelerado (DEA).....	53
TABELA 5.3: Ensaio de suportabilidade térmica no isolador RI 1 do tipo Pino.....	54
TABELA 5.4: Ensaio de suportabilidade térmica no isolador GSRI 1 do tipo Pino.....	55
TABELA 5.5: Ensaio de suportabilidade térmica no isolador RI 1 do tipo Pino.....	55
TABELA 5.6: Resumo dos resultados dos ensaios de envelhecimento acelerado, elétricos e termo-mecânicos.....	58
TABELA 6.1: Resultado do ensaio de flexão mecânica nos isoladores à base da resina RI 1.	66
TABELA 6.2: Carga de flexão mecânica dos isoladores de porcelana e à base da resina RI 1.	67
TABELA 6.3: Resultado do ensaio de flexão mecânica nos isoladores à base da resina RI 2.	69
TABELA 6.4: Carga de flexão mecânica dos isoladores à base da resina RI 2.....	70
TABELA 6.5: Resultados das tomografias realizadas na seção 1 dos isoladores Pino.....	75
TABELA 6.6: Coeficientes linear da seção 1, dos materiais dos isoladores do tipo Pino... ..	75
TABELA 6.7: Resultados das tomografias realizadas na seção 2 dos isoladores Pino.....	76
TABELA 6.8: Coeficiente de atenuação linear da seção 2, dos materiais dos isoladores Pino.	76
TABELA 6.9: Valores médios das análises nas seções 1 e 2 dos isoladores do tipo Pino....	78
TABELA 6.10: Propriedades do granito natural com carga.....	81
TABELA 6.11: Resumo dos resultados dos ensaios de flexão mecânica e da tomografia computadorizada.....	81

Lista de símbolos.

ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i> ;
D.e.	- Deformação específica do isolador no dispositivo desenvolvido para o ensaio de flexão mecânica, mm;
EPDM	- <i>Ethylene Propylene Diene Monomer</i> ;
GSRI 1	- código do granito sintético produzido com a resina RI 1;
GSRI 2	- código do granito sintético produzido com a resina RI 2;
IQSC	- Instituto de Química de São Carlos;
μ	- coeficiente de atenuação linear, cm^{-1} ;
μ_m	- coeficiente de atenuação de massa, cm^2/g ;
NBR	- Norma Brasileira;
RI 1	- resina RI 1 pura (sem carga);
RI 2	- resina RI 2 pura (sem carga);
Isolador c/ defeito	- isolador fabricado com o granito sintético RI 1 e com ruptura dielétrica;
Isolador de porcelana	- isolador fabricado com porcelana;
Isolador RI 1	- isolador fabricado com a resina RI 1 pura;
Isolador RI 2	- isolador fabricado com a resina RI 2 pura;
Isolador GSRI 1	- Isolador fabricado com granito sintético RI 1;
Isolador GSRI 2	- isolador fabricado com o granito sintético RI 2;
t	- tempo, s
TC	- tomografia computadorizada.

Resumo

Diferente de outros países, os isoladores de porcelana do tipo Pino são considerados tradicionais no Brasil e são aplicados em grande escala nas linhas de distribuição de energia elétrica, onde predomina a instalação do tipo aérea. Embora eles possuam um preço baixo em relação aos outros componentes da rede elétrica, esses isoladores vêm apresentando sérios desligamentos não programados devido a problemas, como por exemplo: defeitos no material dielétrico; ruptura mecânica na parte superior dos isoladores em função dos esforços por dilatação do conjunto (rosca e pino); e destruição por causa de atos de vandalismo. Deste modo, julga-se oportuno proceder estudos visando apresentar isoladores alternativos, e esta dissertação de mestrado tem como objetivo realizar um estudo sobre os isoladores poliméricos do tipo Pino fabricados com as resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona, comparando-os com os isoladores de porcelana.

Neste trabalho de pesquisa são apresentados: o processo de fabricação dos isoladores poliméricos do tipo Pino; as análises realizadas nesses isoladores com o auxílio da tomografia computadorizada para a verificação da homogeneidade da mistura do material dielétrico; os resultados do ensaio de tensão elétrica alternada e do ensaio mecânico de flexão antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado realizado durante 5.000 horas num aparelho Weather Ometer.

Diante dos resultados obtidos, pôde-se observar que os isoladores elétricos envelhecidos e os isoladores não envelhecidos apresentaram o mesmo comportamento elétrico sob tensão elétrica alternada, enquanto que nos ensaios de flexão, os isoladores envelhecidos apresentaram uma maior rigidez mecânica.

Abstract

Unlike other countries, pin-type porcelain insulators are considered traditional in Brazil and are applied on a large scale in electric power distribution lines in a predominantly aerial type configuration. Despite their low cost compared to other components of the electric power distribution network, these insulators have undergone serious unprogrammed shutdowns resulting from problems such as defects in the dielectric material; mechanical breakdown of the upper portion of the insulators caused by dilation strains in the set (thread and pin); and destruction by acts of vandalism. It is therefore considered opportune to engage in studies focusing on alternative insulators. This master's dissertation reports on a study of pin-type polymeric insulators manufactured with castor oil-based polyurethane resins, comparing them with porcelain insulators.

This research work discusses the manufacturing process of pin-type polymeric insulators; computerized tomography-based analyses of these insulators carried out to verify the homogeneity of the dielectric material's composition; the results of alternating electric current tests and mechanical flexure tests before and after accelerated aging conducted for 5,000 hours in a Weather Ometer device.

The results of the ac current tests demonstrated that aged and unaged electric insulators display the same electrical behavior under alternating electric current, while the mechanical flexure tests revealed that aged insulators possess greater mechanical rigidity.

CAPÍTULO 1:

Introdução

Este trabalho baseia-se no estudo sobre isoladores elétricos para aplicação em ambiente externo, e tem como objetivo desenvolver protótipos de isoladores poliméricos do tipo Pino, fabricados com as resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona e com os seus compósitos, em função de sua importância para o sistema elétrico de energia brasileiro.

A linha de pesquisa sobre isoladores para ambiente externo é muito extensa, iniciando-se pelos diferentes tipos de isoladores existentes até as suas principais características, como por exemplo a hidrofobicidade, que atualmente possui um vasto campo de pesquisa [1 e 2].

Para a fabricação do isolador polimérico do tipo Pino foram escolhidas as resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona, desenvolvidas pelo Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros do Instituto de Química de São Carlos da USP, e que apresentaram excelentes resultados na aplicação em isoladores do tipo **Suporte** para a instalação em ambiente **interno** [3 e 4]. Contudo, as principais **contribuições** desse presente trabalho são: de realizar um estudo sobre isoladores para ambiente **externo**, através do desenvolvimento de isoladores alternativos do tipo **Pino**; e dar continuidade a essa importante linha de pesquisa sobre o desenvolvimento de isoladores poliméricos produzidos com matéria prima e tecnologia totalmente nacionais.

Os principais motivos que justificam a escolha dos isoladores do tipo Pino neste estudo, inclusive com a mesma geometria do isolador comercial de porcelana, são três, a saber:

- Os isoladores internos do tipo Suporte, desenvolvidos em [4], não podem ser utilizados em ambiente externo devido às suas características de projeto serem diferentes dos isoladores aplicados em ambiente externo, por exemplo, a geometria;

- Diferentemente de outros países, os isoladores de porcelana do tipo Pino são considerados tradicionais no Brasil e são aplicados em grande escala nas linhas de **distribuição** de energia elétrica, onde predomina a instalação do tipo aérea; e
- Os isoladores de cerâmica do tipo Pino vêm apresentando alguns problemas no sistema de energia elétrico conforme serão abordados posteriormente.

Embora os isoladores do tipo Pino possuam preços muito baixos em relação aos outros componentes instalados na rede elétrica, esses isoladores vêm provocando desligamentos não programados com sérias consequências para o sistema devido a problemas, como: defeitos no material dielétrico; ruptura mecânica na parte superior dos isoladores em função dos esforços por dilatação do conjunto (rosca e pino); e destruição por causa de atos de vandalismo. Deste modo, julga-se oportuno proceder estudos visando apresentar isoladores alternativos, apresentando isoladores poliméricos do tipo Pino e comparando-os com os isoladores de porcelana.

As informações básicas sobre as resinas e os granitos sintéticos utilizados, encontram-se descritas detalhadamente em [3], e não serão abordadas neste trabalho porque o enfoque desta pesquisa encontra-se no estudo do isolador elétrico para ambiente externo, dentro do panorama brasileiro.

Neste trabalho houve uma maior concentração no desenvolvimento do protótipo do isolador polimérico, e os ensaios básicos, realizados nas etapas seguintes, foram importantes para analisar a sua viabilidade técnica e econômica; ressaltando que outros ensaios serão efetuados em trabalhos futuros, em continuidade a estes.

É importante observar também, que a utilização dessas resinas é considerada inédita na aplicação de isoladores elétricos para uso em ambiente **externo**, e que dentre os diferentes compósitos desenvolvidos em [3], optou-se em utilizar somente os denominados de granitos sintéticos (GSRI 1 e GSRI 2) pelo fato deles apresentarem preços competitivos e boas características mecânicas, conforme serão apresentados nos próximos capítulos.

No capítulo 2, descrevem-se as informações gerais sobre os diferentes tipos de isoladores e seus problemas que ocasionam interrupções não programadas no sistema elétrico de energia brasileiro, com o objetivo de apresentar uma visão nacional sobre as condições de serviço desses componentes.

No capítulo 3 é descrito o processo de fabricação dos isoladores poliméricos de resina e de granito sintético à base das resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona, e do tipo **Pino**, utilizando-se uma matriz de moldagem confeccionada com o elastômero de silicone.

Os procedimentos dos ensaios de envelhecimento acelerado, elétricos, térmicos, mecânicos e de tomografia computadorizada realizados nos isoladores poliméricos do tipo Pino são apresentados no capítulo 4.

Os resultados do ensaio de envelhecimento acelerado realizado durante 5.000 horas num aparelho *Weather Ometer*, dos ensaios elétricos e dos ensaios térmicos, encontram-se no capítulo 5. Enquanto, que os resultados dos ensaios de flexão mecânica e da tomografia computadorizada realizados nos isoladores do tipo Pino, encontram-se apresentados no capítulo 6.

No capítulo 7 são apresentadas as conclusões finais e os trabalhos futuros referentes a pesquisa.

Anexo a este trabalho, encontram-se: o esquema de confecção da matriz de moldagem dos isoladores do tipo Pino; a relação de equipamentos utilizados nos ensaios elétricos, térmicos e mecânicos; e as imagens tomográficas dos isoladores analisados.

E, finalmente, no apêndice A encontra-se um resumo das normas técnicas brasileiras referentes aos ensaios realizados nos isoladores cerâmicos do tipo Pino, uma vez que na literatura atual não se encontra uma norma específica para esse tipo de isolador produzido com material polimérico.

CAPÍTULO 2:

Pesquisa bibliográfica.

2.1 Introdução.

As empresas concessionárias de energia elétrica convivem com altos custos de manutenção de linhas de transmissão e de distribuição devido a problemas de falhas com isoladores elétricos [5 e 6]. Sendo assim, os problemas de desempenho dos isoladores tem sido tema de diversos informes técnicos, e sua importância motivou o desenvolvimento desta pesquisa.

Portanto, na pesquisa bibliográfica deste trabalho teve-se a preocupação em apresentar os diferentes tipos de isoladores elétricos utilizados no sistema elétrico brasileiro e em abordar resumidamente os problemas existentes devido às suas falhas que provocam interrupções não programadas nas linhas de transmissão e de distribuição de energia elétrica, conforme será descrito nos itens subsequentes.

2.2 Classificação dos isoladores.

Os isoladores utilizados em sistemas elétricos têm como objetivo promover o isolamento elétrico e dar suporte mecânico, rígido ou flexível para os condutores elétricos, seja de linha de transmissão e distribuição, seja de subestações, etc [7].

No projeto de fabricação, as formas dos isoladores são tais que as linhas de força do campo elétrico dentro e na superfície do isolador se distribuem com maior homogeneidade, o que garante ao isolador uma máxima rigidez dielétrica. E, ainda, seus formatos com saias ou saliências garantem o aumento do caminho percorrido pela corrente de fuga sobre a superfície, dificultando a ocorrência dos curtos-circuitos ocasionados por arcos elétricos.

Diante disso, os isoladores podem ser classificados em relação aos seguintes itens:

a) Níveis de tensão:

- isolador para extra alta tensão;
- isolador para alta tensão;
- isolador para média tensão; e
- isolador para baixa tensão (incluindo os isoladores para telecomunicação).

b) Tipo de material de fabricação:

- porcelana,
- vidro; e
- material não cerâmico ou material polimérico.

Exemplos desses isoladores são demonstrados na figura 2.1.

Figura 2.1: Isoladores elétricos: (a) de porcelana, (b) de vidro e (c) de material polimérico.

Os isoladores de materiais não cerâmicos são também conhecidos como isoladores poliméricos e geralmente são fabricados com borracha de silicone, EPDM (*Ethylene propylene diene monomer*), ou resina epóxi.

Nestes tipos de isoladores existe uma outra subdivisão que é referente ao ambiente de serviço do isolador. Sendo assim, os isoladores podem ser para uso em:

- ambiente interno; ou
- ambiente externo.

Normalmente, no ambiente externo, os isoladores ficam submetidos a raios ultravioleta e intempéries. Esses dois agentes são prejudiciais aos polímeros, por degradarem o material e reduzirem significativamente sua vida útil.

c) Número de Partes:

- Monocorpo (isolador formado pôr uma única peça); ou
- Multicorpo (isolador formado com duas ou mais partes). Demonstrados na figura 2.2.

Figura 2.2: Isoladores elétricos: (a) Monocorpos e (b) Multicorpo com três partes.

d) Modelos de construção.

Para a apresentação dos modelos de construção dos isoladores elétricos, optou-se por dividir os diferentes tipos de isoladores em relação à sua instalação nas linhas de transmissão e de distribuição, e nas instalações industriais e de subestações [3]. Neste item, optou-se também pela apresentação dos isoladores do tipo cerâmico, uma vez que, os isoladores poliméricos serão descritos posteriormente. Os isoladores cerâmicos (de vidro e de porcelana) são conhecidos no Brasil como isoladores tradicionais, e serão demonstrados nos itens subseqüentes.

i- Linhas de Transmissão (LT's).

Nas linhas de transmissão são utilizados os isoladores de suspensão e de ancoragem fabricados com vidro temperado e com porcelana, descritos a seguir.

❖ Isoladores de suspensão e de ancoragem de vidro.

Os isoladores de vidro temperado para cadeias de suspensão e ancoragem isolam eletricamente as linhas da terra e sustentam mecanicamente os cabos aéreos de transporte de energia fixados nas estruturas metálicas, de concreto ou de madeira, nas tensões de 69 kV até 500 kV. Vide exemplo na figura 2.3.

- Classificação conforme norma IEC 60305: U120BS
- Classificação conforme norma NBR 7109: D120-16
- Carga eletromecânica de ruptura: 12.000 daN
- Peso líquido por peça: 3,8kg

Figura 2.3: Isoladores de vidro temperado para cadeias de suspensão e ancoragem.

❖ Isoladores de suspensão de porcelana.

Os isoladores de suspensão de porcelana são produzidos por processo úmido, a partir de matérias primas selecionadas, com queima das peças cerâmicas em fornos elétricos e a gás. Vide exemplo na figura 2.4.

- Classificação conforme norma ANSI C29.2: 52-3
- Classificação conforme norma IEC 60305: U70BL
- Carga eletromecânica de ruptura: 7.000 daN
- Peso líquido por peça: 4,50 kg

Figura 2.4: Isoladores de porcelana para cadeias de suspensão e ancoragem.

ii- Linhas de Distribuição (LD's).

Nas linhas de distribuição são utilizados os isoladores: de Disco, de Bastão; de Suspensão; do tipo Pino, do tipo Pilar, do tipo Castanha e do tipo Roldana, descritos a seguir.

❖ Isoladores de Disco de vidro.

Os isoladores tipo disco de vidro, são articulados em cadeias de suspensão e ancoragem, para LD's, com diâmetro desde 102 mm (4") até 320 mm (13 ½"), passo desde 140 mm (5 ½") até 170 mm (6 ¾") e REM (Resistência Eletro-Mecânica) de 45 kN até 240 kN, nos engates concha-bola (CB), garfo-olhal-redondo (GR) e garfo-olhal-quadrado (GQ). Vide exemplo na figura 2.5.

- Classificação conforme norma ANSI C29.2: 52-1
- Classificação conforme norma NBR 7109: D45-1
- Carga eletromecânica de ruptura: 4.500 daN
- Peso líquido por peça: 1,95kg

Figura 2.5: Isolador de Disco de vidro temperado.

❖ Isoladores de Bastão de porcelana.

Os isoladores bastão ("long-rod") são alternativas válidas, em montagem rígida, com engates garfo (campânula) e olhal redondo (pino), para cadeias de isoladores de ancoragem de vidro ou porcelana, com a vantagem de sua imperfurabilidade, do RIV (Tensão de Radio-Interferência) reduzido e do melhor desempenho sob poluição, nas tensões de 15 kV, 25 kV e 35 kV. Vide exemplo na figura 2.6.

- Classificação conforme norma NBR 7108: GR
- Tensão nominal: 15 kV
- Carga eletromecânica de ruptura: 4.500 daN
- Peso líquido por peça: 3,6 kg

Figura 2.6: Isolador de Bastão de porcelana.

❖ Isoladores de Suspensão de porcelana.

Os isoladores suspensão para cadeias de ancoragem ou fim-de-linha ("dead-end insulators") formam conjuntos flexíveis de 2 unidades (15 kV), 3 unidades (25 kV) e 4 unidades (35 kV), articuladas nos engates tipo garfo-olhal-redondo (GR) e garfo-olhal-quadrado (GQ), com REM (Resistência Eletro-Mecânica) de 45 kN.

Vide exemplo na figura 2.7.

- Classificação conforme norma ANSI C29.2: 52-1
- Classificação conforme norma NBR 7109: D45-1
- Carga eletromecânica de ruptura: 4.500 daN
- Peso líquido por peça: 2,40 kg

Figura 2.7: Isolador de Suspensão de porcelana.

❖ Isoladores do tipo Pino.

Os isoladores do tipo pino, para montagem rígida vertical (ou horizontal) em cruzeta ou diretamente no poste, apresentam entalhe superior e gola lateral para fixação dos cabos aéreos, sendo normalmente amarrados a estes com laços preformados. São fabricados conforme as normas técnicas NBR, ANSI e BS, para tensões nominais desde 7,2 kV até 72,5 kV, podendo ser de cor marron ou cinza, com vidrado normal ou semi-condutor (RIV reduzido), em rosca ISO de 25 mm e de 35mm, para pinos metálicos padronizados.

Vide exemplo na figura 2.8.

- Classificação conforme norma 55-3
ANSI C29.5/C29.6:
- Tensão nominal: 15 kV
- Carga eletromecânica de ruptura: 1.100 daN
- Peso líquido por peça: 0,90 kg

Figura 2.8: Isolador do tipo Pino de porcelana.

❖ Isoladores tipo Pilar.

Os isoladores do tipo pilar ("line-post") constituem alternativa para os isoladores de pino, com a vantagem adicional de sua imperfurabilidade (corpo maciço), RIV (Tensão de Radio-Interferência) reduzido, melhor desempenho à poluição, maior resistência mecânica à flexão para pinos curtos, tipo parafuso prisioneiro, de rosca $\frac{3}{4}$ "UNC, M20 e outras a especificar. Vide exemplo na figura 2.9.

- Classificação conforme norma 57-1
ANSI C29.7:
- Tensão nominal: 15/25 kV
- Carga de ruptura à flexão: 1250 daN
- Peso líquido por peça: 5,70 kg

Figura 2.9: Isolador do tipo Pilar de porcelana.

❖ Isoladores Castanha.

Os isoladores castanha ("strain type") de porcelana são utilizados em estais (tirantes) de postes de distribuição ou em ancoragem (fim-de-linha) de linhas de distribuição. São fabricados conforme as normas NBR, ANSI ou BS, desde 1.800 daN até 9.000 daN de resistência mecânica à tração, nas tensões de 7 kV até 16 kV de tensão suportável sob chuva em frequência industrial, nas cores marrom e cinza. Vide exemplo na figura 2.10.

- Classificação conforme norma ANSI C29.4: 54-1
- Classificação conforme norma NBR 6248: C4500-1
- Carga de ruptura à tração: 4500 daN
- Peso líquido por peça: 0,40 kg

Figura 2.10: Isolador Castanha.

❖ Isoladores Roldana.

Os isoladores roldana ("spool type") de porcelana são utilizados em montagem horizontal, fixados por parafuso nos postes, para entrada em residências e indústrias. São fabricados conforme as normas técnicas NBR, ANSI, BS ou especiais, desde 1250 daN até 2670 daN de resistência mecânica à flexão, na tensão nominal de 1,2 kV. Vide exemplo na figura 2.11.

- Classificação conforme norma NBR 6249: R900-1
- Classificação conforme norma ANSI C29.3: 53-1
- Nominal: 1,2 kV
- Carga mínima de ruptura à flexão: 900 daN
- Peso líquido por peça: 0,20 kg

Figura 2.11: Isolador Roldana.

iii- Subestações e instalações industriais.

Nas subestações e nas instalações industriais são utilizados os isoladores rígidos de porcelana tipo pedestal ("cap-and-pin") para isolação de barramento em subestações de 15 kV até 500 kV, tipo suporte ("post-type") para cubículos e subestações de 1,2 kV até 36,2 kV, tipo bucha ("bushing") para transformadores de distribuição, tipo bucha de passagem ("entrance-bushing") para cubículos e diversos isoladores para instalações industriais, incluindo chaves seccionadoras e fusíveis de distribuição, conforme apresentados a seguir.

❖ Isoladores Suporte.

Os isoladores suporte ("post-type") de porcelana apresentam núcleo maciço, estando disponíveis nas tensões de 1,2 kV a 36,2 kV, desde 375 daN até 910 daN de resistência à flexão. Vide exemplo na figura 2.12.

- Tensão Nominal: 15 kV
- Peso líquido por peça: 3,12 kg

Figura 2.12: Isolador Suporte.

❖ Isoladores Pedestal.

Os isoladores tipo pedestal ("cap-and-pin") são fabricados conforme as normas NBR e ANSI, sendo normalmente utilizados até 500 kV, em unidades empilhadas. Sua resistência mecânica à flexão individual vai de 900 daN até 1500 daN. Vide exemplo na figura 2.13.

- Classificação conforme norma ANSI C29.8: TR-53
- Classificação conforme norma NBR 6882: PD1800-250-B
- Classificação conforme norma IEC 60273: E55
- Peso líquido por peça: 51,00 kg

Figura 2.13: Isolador Pedestal.

❖ Buchas para transformadores.

As buchas ("bushings") de porcelana para transformadores de distribuição são fabricados conforme as normas técnicas NBR ou DIN, para instalações com tensões de 1,3 kV a 36,2 kV e para correntes elétricas de 160 A até 3150 A. Vide exemplo na figura 2.14.

- Corrente Nominal: 160A
- Tensão Nominal: 15kV
- Distância de Escoamento: 280mm
- Altura Total: 278mm
- Diâmetro Máximo: 99mm
- Peso líquido por peça: 2,3kg

Figura 2.14: Buchas para transformadores.

❖ Buchas de Passagem.

As buchas de passagem ("entrance-bushings") de porcelana, são utilizadas em instalações com tensões nominais de 7,2 kV a 36,2 kV, para correntes de 50 A até 3150 A, para uso externo/interno. Vide exemplo na figura 2.15.

- Corrente Nominal: 50/400A
- Tensão Nominal: 15 kV
- Peso líquido por peça: 6 kg

Figura 2.15: Buchas de passagem.

Dentre os diferentes tipos de isoladores descritos acima, pode-se encontrar uma variedade de formas entre eles, fabricadas sob condições especiais, como:

- Isolador tipo Pino rádio tratado (para rádio interferência);
- Isolador tipo Pino de transposição;
- Isolador tipo Pino para telecomunicação;
- Isolador Roldana com cabeça lisa;
- Isolador Roldana com cabeça escareada;
- Isolador Castanha ondulada;
- Isolador Castanha oval; etc.

No entanto, os isoladores mais usados nas linhas de distribuição nacionais são do tipo Pino (na linha primária), Suspensão (na linha primária) e Roldana (na linha secundária); enquanto que nas linhas de transmissão, os mais encontrados são do tipo Suspensão e do tipo Bastão.

As cores mais utilizadas nos isoladores de porcelana são marrom e branca; nos isoladores de vidro, a cor verde; enquanto que nos isoladores não cerâmicos, elas não são definidas.

Os isoladores fabricados com porcelana são mais utilizados atualmente no Brasil devido ao menor custo de fabricação, ao seu bom desempenho em relação à intempérie, e ao fato de apresentarem características elétricas e mecânicas compatíveis com os demais.

2.3 Desempenho dos isoladores no sistema de energia brasileiro.

2.3.1 Geral.

Com o objetivo de identificar a situação de desempenho dos isoladores no sistema de energia elétrico brasileiro, serão apresentados nos itens subseqüentes os dados publicados em [5] e [6], referentes à problemas com os isoladores elétricos.

2.3.2 Isoladores elétricos instalados.

De acordo com os dados de algumas concessionárias brasileiras, encontram-se instalados em suas linhas de transmissão, aproximadamente 13 milhões de isoladores elétricos, sendo 71,3% deles instalados sob tensão igual ou superior a 230 kV, conforme demonstra a tabela 2.1 [5].

Tabela 2.1: Quantidade aproximada de isoladores instalados em linhas de transmissão [5].

Empresas	Unidades de isoladores sob	Unidades de isoladores sob
	tensões < 230 kV	tensões ≥ 230 kV
CEMIG	1.132.600	772.600
CESP	1.490.000	1.551.000
CHESF	102.000	2.200.000
COPEL	450.000	85.000
ELETROSUL	180.200	1.426.700
FURNAS	243.000	3.157.000
LIGHT	113.035	15.876
Totais	3.710.035	9.208.176

Na tabela 2.1, observa-se também que somente as empresas COPEL, LIGHT e CEMIG possuem maior número de isoladores em tensões inferiores a 230 kV, com percentuais de 84,1%, 87,7% e 59,4%, respectivamente.

Dentre esses isoladores, predomina a utilização dos isoladores de vidro, enquanto que a empresa COPEL se destaca com a instalação de isoladores poliméricos, num total de 3,1% de isoladores poliméricos sob tensões < 230 kV e 3,7% sob tensões superiores a 230 kV.

2.3.3 Desligamentos em linhas de transmissão provocados por isoladores elétricos.

Os desligamentos provocados por componentes em linhas de transmissão nas concessionárias de energia elétrica variam consideravelmente de empresa para empresa, embora fique claro que isoladores, cabos condutores, estruturas e cabo pára-raios, nessa ordem, são os grandes responsáveis por tais desligamentos em linhas de transmissão.

Segundo as informações apresentadas em [5], foi registrado um elevado percentual de desligamentos provocados por isoladores em tensões inferiores a 230 kV na empresa CHESF (90%) e, na ELETROSUL (83%) para tensões maiores ou iguais a 230 kV.

O vandalismo e as descargas atmosféricas aparecem como os maiores causadores de falhas em isoladores de vidro e de porcelana, embora a poluição e a corrosão apresentem relevância como causadores de falhas em determinadas regiões, sendo os principais

poluentes gerado pelas atividades industriais (cimento, química, etc) e pelas condições climáticas litorâneas.

As regiões montanhosas, de nível cerâmico elevado e com alta resistividade do solo, tem o desempenho das LT's prejudicado substancialmente com falhas em isoladores devido a descargas atmosféricas. Enquanto que, em relação ao ato de vandalismo, as empresas, principalmente as do Nordeste brasileiro, passaram a usar cadeias mistas, compostas de três isoladores de porcelana e dois de vidro ou vice-versa [6].

A cadeia de isoladores mista atingida por terceiros tem os isoladores de vidro totalmente quebrados e os de porcelana em condições de manter a linha de transmissão em operação, até a sua manutenção. Por isso, a prática de usar cadeias mistas não elimina os custos com a substituição das peças atingidas, porque além dos isoladores de vidro, também são substituídos os de porcelana que se encontram quebrados. Portanto, adotou-se como sistemática de combate ao vandalismo, o uso de isoladores poliméricos nas áreas críticas onde ocorre maior número de quebra de isoladores, e essa medida além de estar se mostrando economicamente viável, ela está se refletindo na obtenção da qualidade nos serviços prestados pelas companhias.

2.3.4 Falhas em isoladores elétricos do tipo Pino, de porcelana e de vidro.

A partir de outros levantamentos das principais causas de interrupções não programadas, foi registrada uma grande incidência de falhas em isoladores do tipo Pino de porcelana e de vidro [8]. Verifica-se que parte dessas ocorrências deve-se a falha do material e a falhas não determinadas, as quais podem ser relacionadas à fuga de corrente e a perfurações normalmente não visíveis.

Os registros nas inspeções indicam defeitos do tipo de trincas, danos nas camadas vitrificadas, etc. E esses defeitos normalmente provocam fuga de corrente, interrupções transitórias e posteriormente interrupções permanentes, muitas vezes acarretando rompimento de condutores.

Além dos problemas citados, esses defeitos em isoladores contribuem para o estabelecimento de focos de radio interferências[26], através da geração de correntes de altas frequências, que podem se propagar para a terra, e/ou gerar radiação eletromagnética(efeito corona), provocando os seguintes eventos :

- Perturbações radioelétricas que afetam os sistemas de comunicação, locais das subestações e outras tais como rádio,TV e etc.
- Criação de ozônio (agente oxidante)
- Ruídos audíveis que podem atingir até 65dB (medidos à 30 metros da fonte)

- Perdas por efeito corona , que podem atingir até centenas de kW / km (trifásico), sendo esta uma das preocupações das concessionárias de energia elétrica do país.

Nas concessionárias do Japão, América do Norte e Índia, há uma tendência generalizada por abandonar o uso de isoladores tipo pino. Atualmente, vêm sendo empregados isoladores de corpo sólido com característica disruptiva superior à do isolador tradicional e mundialmente, trabalhos de pesquisas vêm sendo realizados com o objetivo de encontrar uma alternativa para diminuir ou eliminar tais problemas citados, utilizando os isoladores poliméricos.

Para efeito demonstrativo, algumas causas encontradas nos problemas decorrentes do uso de isoladores de Pino de porcelana são apresentados a seguir:

i) Folga entre a rosca de chumbo e o pino de aço.

Materiais diferentes no sistema de fixação do pino (chumbo e aço), com coeficientes de dilatação diferentes, provocam diferentes dilatações com o aquecimento. Ao resfriar, apenas o aço retorna ao seu tamanho original, provocando a folga entre a rosca de chumbo e o pino de aço. Vide fotografia da figura 2.16.

Figura 2.16: Causa de isolador solto do pino.

ii) Aquecimento no pino.

Visualmente se percebe uma mudança na coloração do pino conforme mostra a figura 2.17, devido a centelhamento na base do isolador por corrente de fuga.

Figura 2.17: Causa de aquecimento no topo do pino.

iii) Pino do isolador de vidro

Neste caso a rosca do isolador é provida de material plástico, o que o torna mais vulnerável aos aquecimentos provocados. Este pino, conforme mostra a figura 2.18, foi retirado de um isolador de vidro, aparentemente perfeito, mas que apresentou forte radiointerferência e o plástico totalmente fundido.

Figura 2.18: Causa de radiointerferência.

iv) Ruptura da cabeça do isolador.

Quando o pino é encostado no fundo da cavidade com rosca do isolador de porcelana ou de vidro, os esforços por dilatação do conjunto provocam a ruptura mecânica da cabeça. Vide a fotografia da figura 2.19.

Figura 2.19: Ruptura da cabeça do isolador: (a) ruptura do isolador e (b) causa da ruptura devido ao encostamento do pino no fundo da cavidade.

Como foi demonstrado, os isoladores constituem sérios problemas para o desempenho do sistema distribuidor e as tentativas de solução não resultaram satisfatoriamente, até o momento.

Para obter um melhor desempenho do atual projeto de isolador tipo Pino, serão necessárias as seguintes alterações:

- mudança da distância do escoamento;
- mudança de espessura do material isolante entre o pino e o condutor, e um pino de aço que não tenha dilatação.

Tais alterações implicam um novo projeto para o isolador de Pino.

Deste modo, julga-se oportuno proceder a estudos visando solucionar definitivamente os problemas apresentados, com base na mudança da geometria do isolador e na concepção de sua fixação à cruzeta. Esta alternativa sugerida da substituição pelo isolador tipo Pilar para distribuição, conforme a figura 2.20, prevê as seguintes alterações:

- corpo sólido de porcelana;
- maior distância de escoamento;
- base de aço envolvendo a porcelana; e
- pino de aço rosqueado na base de ferro, sem penetrar na porcelana.

Figura 2.20: Sugestão de substituição do isolador de Pino pelo isolador Pilar.

Como o custo do isolador Pilar proposto é significativamente superior ao atualmente empregado, sugere-se que ele seja adotado inicialmente como padrão específico para regiões críticas com maior agressividade por poluição ambiental, como, por exemplo, as orlas marítimas, regiões industriais e regiões com índice cerâmico elevado.

Outro inconveniente do isolador Pilar é o peso superior ao do Pino, o que sobrecarrega as cruzetas, alterando o projeto mecânico destas estruturas. Portanto, é de grande importância o estudo de isoladores alternativos com aplicações de novos materiais dielétricos, conforme será apresentado a seguir.

2.4 Isoladores poliméricos.

2.4.1 Introdução.

Os isoladores poliméricos se diferem dos isoladores compostos, por sua composição e por sua área de aplicação. Os isoladores compostos são mais comuns e possuem no seu interior um núcleo de fibra de vidro que lhes assegura uma boa resistência mecânica, e por isso são utilizados nas linhas de transmissão da rede elétrica de alta e extra alta tensão, no lugar das cadeias de isoladores de disco cerâmicos. Enquanto que, os isoladores poliméricos são formados totalmente por resinas e são utilizados nas linhas de alta tensão (até

aproximadamente 60 kV), nas linhas de distribuição de energia elétrica e também em instalações em ambiente interno.

Na figura 2.21, são apresentados alguns modelos de isoladores poliméricos e de isoladores compostos poliméricos.

Figura 2.21: Exemplos de isoladores: (a) polimérico; e (b) composto polimérico; e (c) compostos poliméricos em condições de serviço.

Cabe ressaltar que, a figura 2.21-(c) foi apresentada com a finalidade de demonstrar que alguns modelos de isoladores compostos poliméricos possuem a vantagem de dispensarem a utilização de cruzetas em estruturas de linhas de transmissão de energia elétrica.

2.4.2 Uma breve história sobre os isoladores poliméricos.

Segundo [3], desde o início do século 20, isoladores orgânicos têm sido utilizados em aplicações de alta tensão. Iluminação nas minas e nas linhas de bondes constituíram-se nas duas primeiras aplicações de isolações orgânicas. Estes isoladores eram baseados em compostos de *shellac* com enchimento de amianto. À medida que a tecnologia avançou, o poliestireno, um polímero artificial, foi utilizado no lugar do *shellac*.

Posteriormente, compostos isolantes em epóxi Bisphenol A foram introduzidos em buchas tipo Panqueca para capacitores. Esses novos materiais ofereciam uma resistência ao “trilhamento” maior que a dos materiais anteriores.

Na segunda metade do século 20, a introdução de compostos de epóxi cicloalifático utilizados para isoladores de distribuição proporcionou vários avanços na resistência ao envelhecimento. Em particular, na década de 1960, novas classes de polímeros foram introduzidas comercialmente. Um novo polímero, conhecido como borracha de etileno-propileno (EPR), pôde ser formulado em compostos isolantes com os quais foram realizados isoladores para extra alta tensão. Isoladores em dimetil silicone também foram desenvolvidos para a mesma finalidade. Estes novos isoladores ofereciam características de envelhecimento e elétricas avançadas, além de serem muito mais leves do que qualquer outro isolador disponível anteriormente.

No entanto, neste início do século 21, muitos avanços tecnológicos estão sendo realizados em matéria de isolamento elétrico, e os isoladores poliméricos mais comuns são fabricados com a resina de epóxi, com a borracha de silicone ou com o EPDM [9].

2.4.3 Tendência de instalação.

Os isoladores poliméricos estão sendo largamente utilizados em linhas de distribuição e de transmissão de energia elétrica, e vêm abrangendo uma grande parte do mercado [10]. No ano de 1999, eles já representavam de 60 a 70% de todos os novos isoladores de alta tensão instalados na América do Norte [11] e, na Irlanda, 75% de suas principais linhas também empregaram isoladores compostos poliméricos no lugar dos isoladores de vidro, no ano de 1997 [12]. Esse crescimento significativo dos isoladores compósitos não cerâmicos deve-se principalmente às suas vantagens sobre os isoladores tradicionais de porcelana e de vidro. Entre elas estão incluídos peso menor, alta resistência mecânica por razão de peso, resistência a atos de vandalismo, melhor desempenho na presença de forte poluição em condições úmidas (porque possui a característica de hidrofobicidade superior), e tensão de suportabilidade comparável ou maior do que os isoladores de porcelana e de vidro. No entanto, os isoladores poliméricos também apresentam algumas desvantagens tais como: mudanças químicas em sua superfície, provocadas por intempérie e arcos de banda seca [13], erosão e trilhamento que podem conduzir a falhas [14], expectativas de vida indefinida, confiabilidade desconhecida e difícil detecção de isoladores defeituosos [15]. Para minimizar algumas dessas desvantagens, uma larga escala de materiais e de formulações tem sido utilizada na fabricação dos isoladores poliméricos, como o epóxi bisfenol, resinas de epóxi cicloalifática, borracha de propileno etileno (EPR) e borracha de silicone (SIR).

Neste contexto, também não se pode deixar de observar que a porcelana e o vidro não virão a ser substituídos de pronto, mesmo sabendo que, quando expostos às condições úmidas como névoa, orvalho e chuva, por causa das suas altas energias superficiais, podem vir a ser altamente contaminados e umidecidos. O que facilita o surgimento de uma corrente elétrica de fuga, que pode provocar a ocorrência do *flashover* com subsequente desligamento do sistema. Atualmente, como metodologias de prevenção são empregadas técnicas de lavagem dos isoladores de alto custo [16] ou a aplicação de um revestimento dos isoladores com uma fina camada de material polimérico, como a borracha de silicone vulcanizada à temperatura ambiente e o EPDM [17]. Os revestimentos com esses materiais têm apresentados bons resultados, uma vez que promovem a retenção de água na superfície dos isoladores [18], proporcionando um aumento da hidrofobicidade e prevenindo os isoladores contra a corrente elétrica de fuga elevada. Estudos efetuados com esses isoladores revestidos têm mostrado que, em locais com fortes índices de contaminação, proporcionam um desempenho similar ao dos isoladores de borracha de silicone [19].

Portanto, este trabalho apresentará o desenvolvimento de um isolador alternativo do tipo Pino polimérico para o sistema elétrico de potência brasileiro, conforme será descrito nos capítulos posteriores.

CAPÍTULO 3:

Processo de fabricação dos isoladores poliméricos do tipo Pino.

3.1 Introdução.

A tecnologia de fabricação de isoladores poliméricos adquirida pelas empresas, geralmente é desenvolvida ao longo do tempo pelos seus centros de pesquisa e envolve três fatores importantes para a confiabilidade de seus produtos, que são [20]:

- seleção rigorosa das matérias primas;
- projeto otimizado do isolador; e
- processo otimizado de fabricação do isolador.

Diante disso, nesse trabalho procurou-se atender esses fatores e neste capítulo será apresentado detalhadamente o processo de fabricação dos isoladores poliméricos do tipo Pino, iniciando primeiramente com o processo de fabricação da sua matriz de moldagem. Ambos referem-se à produção **laboratorial** e são considerados processos otimizados em função de seu baixo custo e de sua praticidade de execução.

No entanto, para se obter o isolador com resultados satisfatórios houve a necessidade de se desenvolver dois tipos diferentes de matriz de moldagem, a matriz usinada de náilon e posteriormente, a matriz confeccionada com elastômero de silicone, conforme será descrito e justificado nos itens subseqüentes.

3.2 Matriz de náilon para moldagem do isolador do tipo Pino.

Objetivando-se obter a qualidade e durabilidade da matriz do isolador de Pino em estudo, desenvolveu-se primeiramente uma matriz com material de náilon e epóxi (na parte de enchimento), apresentada na figura 3.1.

Figura 3.1: Fotografias da matriz do isolador polimérico em estudo: (a) matriz pré-montada e (b) matriz pronta para o enchimento.

Para desmoldar o isolador, bastava retirar os parafusos que unia as duas partes laterais da matriz. Canais para saída de ar foram distribuídos nos pontos críticos da matriz onde apareciam bolhas de ar frequentes, porém os resultados finais não estavam satisfatório porque os isoladores continham muitas bolhas de ar.

O tempo de trabalho destas resinas é curto (aproximadamente 6 minutos), o que dificulta a aplicação de tempo maior no vácuo, e o uso de um componente retardador do tempo de gel destas resinas não é viável, porque altera as características físico-químicas, tornando-as quebradiças e também comprometendo a agilidade de produção dos isoladores em escala industrial.

Tentou-se aumentar mais uma etapa com vácuo, aplicando-o na matriz com a resina já vertida em seu interior, na fase final. O resultado também não foi satisfatório porque os isoladores continuaram com bolhas de ar e houve dificuldade de suas desmoldagens, danificando parte da matriz.

Para comprovar a possibilidade de obtenção de isoladores fabricados com as resinas em estudo, sem nenhuma bolhas de ar, foram produzidos com elas tarugos para usiná-los no formato de isoladores do tipo Pino.

Os tarugos, devido às suas formas geométricas simples, sem saias como os isoladores, não apresentaram bolhas de ar. Eles foram usinados em um torno mecânico CNC (*Computadorizado com Controle Numérico*). O desenho completo deste tipo de isolador, com a rosca interna, foi feito no *software* Auto Cad e depois foi incluído no programa computacional do torno.

O resultado foi satisfatório e os isoladores sem bolhas de ar, fabricados com as duas resinas RI 1 e RI 2 podem ser vistos na figura abaixo.

Figura 3.2: Isoladores poliméricos fabricados com as resinas RI 1 (o isolador de cor clara) e RI 2 (o isolador de cor mais escura), sem bolhas de ar: (a) vista lateral e (b) vista inferior.

Embora haja a possibilidade de obtenção dos isoladores sem bolhas, esse método não foi adotado por causa da dificuldade de usinar os isoladores com cargas abrasivas do tipo granito sintético; e também pelo custo do processo de usinagem desses materiais abrasivo. A alternativa correta é descrita no item subsequente.

3.3 Matriz de elastômero de silicone para moldagem dos isoladores Pino.

A solução indicada para a extração das bolhas de ar dos isoladores de Pino em estudo, foi a de projetar um molde, com saídas de ar adequadas, e confeccioná-lo com o elastômero de borracha transparente, utilizado em [3]. Esse elastômero é um produto bicomponente, formado de base e catalisador, de média viscosidade. Ao misturar os componentes na proporção de 10:1 em peso, cura-se à temperatura ambiente e forma-se um elastômero de silicone rígido, resistente ao rasgo. Cabe ressaltar que neste trabalho, optou-se em utilizar o elastômero de silicone transparente em conjunto com outro tipo de elastômero de silicone de cor vermelha. Esse segundo elastômero foi obtido através do mesmo fornecedor e ele servirá de **matriz principal** para o molde do isolador, porque possui resistência maior do que o fabricado com a cor transparente, apresentado anteriormente. O objetivo é guardá-lo após a confecção do primeiro isolador, para servir como modelo para moldes futuros, por causa do engaste em função da vida útil do elastômero transparente. A mistura dos componentes do elastômero vermelho ocorre na proporção de 50:1 (100 partes da base por 2 do catalisador, em peso), a sua cura ocorre em temperatura ambiente e forma-se no final um elastômero de silicone com maior dureza mecânica.

Para a fabricação dessa nova matriz, construiu-se uma caixa de nailón, conforme demonstra a figura 3.3.

Figura 3.3: Caixa para fabricação e para suporte da molde de elastômero de silicone do isolador do tipo Pino: (a) vista frontal; (b) vista lateral e (c) vista superior.

Para desmoldar o isolador, basta retirar os parafusos que unem as duas partes laterais dessa caixa e retirar o isolador de dentro da matriz feita com o elastômero de silicone.

3.4 Seqüência do processo de fabricação da matriz do isolador do tipo Pino.

Como o isolador possui geometria diferente do isolador apresentado em [3], houve uma preocupação em estudar as fases para a construção da nova matriz para o isolador do tipo Pino através da esquematização do processo, apresentada nas figuras que são demonstradas no Anexo A.

Em seguida, a seqüência do processo de fabricação da matriz do isolador do tipo Pino foi dividida em oito fases que são apresentadas nas figuras de números 3.4 à 3.11, observando-se que, em cada fase foi aguardado o tempo de cura dos elastômeros de silicone que é de aproximadamente vinte e quatro horas, antes de desmoldar.

- a) **Fase 1:** preparar 1.850 g de elastômero de silicone vermelho e vertê-lo dentro da caixa de náilon para confeccionar a primeira parte inferior da matriz do isolador.

Figura 3.4: Primeira fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.

- b) **Fase 2:** colocar o suporte para a entrada de material utilizando a massa de moldagem para fixá-lo.

Figura 3.5: Segunda fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.

Observação: antes de se colocar o suporte para a entrada de material, a matriz feita com o silicone vermelho foi lixada com a finalidade de se garantir uma superfície plana.

- c) **Fase 3:** preparar 2.650 g de elastômero de silicone transparente e vertê-lo dentro da caixa de náilon.

Silicone transparente

Figura 3.6: Terceira fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.

- d) **Fase 4:** retirar a parte da matriz feita com o silicone vermelho, posicionar a parte da matriz feita na 3ª fase e com o auxílio de uma furadeira, fazer dois furos de 6,0 mm no elastômero de silicone transparente. Esses furos servem como guia para a montagem da matriz.

Furo (guia
para a
montagem da
matriz)

Figura 3.7: Quarta fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.

- e) **Fase 5:** Preparar 2.650 g de elastômero de silicone transparente e vertê-lo dentro da caixa de náilon para fazer a segunda parte inferior da matriz

Figura 3.8: Quinta fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.

- f) **Fase 6:** Fazer furos com o auxílio de uma furadeira, na parte superior da matriz de silicone transparente, para funcionar como saídas de ar.

Figura 3.9: Sexta fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.

- g) **Fase 7:** guardar a parte do molde feito com o silicone vermelho, como “parte principal da matriz”, para a construção de outros moldes futuros.

Figura 3.10: Sétima fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.

- h) **Fase 8:** posicionar o isolador de porcelana dentro da matriz para confeccionar a rosca de silicone transparente e colar um suporte feito com cano de PVC para servir como apoio na retirada da rosca, depois do isolador moldado. Até o momento, estava utilizando-se o próprio pino de metal que é usado nos isoladores em condições de serviço.

Figura 3.11: Oitava fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.

Finalizando, na figura 3.12 são apresentadas as partes da matriz final dos isoladores do tipo Pino.

(a)

(b)

Figura 3.12: Matriz final dos isoladores do tipo Pino: (a) partes individuais; e (b) montagem final.

Canais para saída de ar foram construídos nos pontos críticos da matriz onde havia bolhas de ar. E comparando-se esta nova matriz com a matriz usinada de náilon, vê-se que ela possui custo menor, maior rapidez na confecção e é mais fácil para desmoldar, sendo optativo o uso de desmoldante, como a vaselina sólida.

O resultado dessa alteração no projeto da nova matriz do isolador do tipo Pino foi aprovado, e será apresentado a seguir no processo de moldagem dos isoladores.

3.5 Seqüência do processo de fabricação dos isoladores do tipo Pino.

Os isoladores do tipo Pino moldados na nova matriz apresentaram bons resultados em sua forma estética porque diminuíram muito a quantidade de bolhas de ar existentes uma vez, que estas bolhas causam uma maior concentração de campo elétrico, podendo provocar a ruptura do dielétrico. Na figura 3.13, encontra-se ilustrado o isolador de granito sintético RI 1, onde pode-se observar esta melhoria no isolador final.

(a)

(b)

Figura 3.13: Isolador final do tipo Pino: (a) vista superior; e (b) vista lateral.

Portanto, a sequência do processo de fabricação dos isoladores do tipo Pino também foi dividida em fases, semelhante ao processo descrito em [3], e que são apresentadas nas figuras de números 3.14 à 3.23. É importante observar que, em cada fase o tempo foi controlado por um cronômetro e que o processo de fabricação dos isoladores de resina é mais simples do que o processo de fabricação dos isoladores de granito sintético, envolvendo somente as seguintes fases:

- Fase 2: que refere-se à preparação do molde, com o auxílio do desmoldante (vaselina) e da fita adesiva;
- Fase 3: que se refere a pesagem do poliol na balança semi-analítica;
- Fase 6: que se refere ao acréscimo do pré-polímero no recipiente com o poliol; à mistura manual dos componentes durante 2 minutos; e à aplicação de vácuo durante 3 minutos;
- Fase 7: que se refere à colocação da resina dentro da matriz;
- Fase 10: que se refere à desmoldagem do isolador de resina após o seu tempo de cura de 6 horas; e

- Fase 11: que se refere à limpeza dos utensílios utilizados na confecção dos isoladores de resina.

Logo, as fases do processo de fabricação dos isoladores do tipo Pino são apresentadas a seguir:

Fase 1: pesar o granito natural a ser utilizado, e colocar para secar numa estufa à 150°C durante 20 minutos. Após essa secagem, deixar o granito natural esfriar durante duas horas, dentro da estufa.

Figura 3.14: Primeira fase para a confecção do isolador do tipo Pino.

Observação: esta primeira fase refere-se somente à fabricação dos isoladores com granito sintético.

- a) **Fase 2:** passar o desmoldante vaselina na matriz de silicone para protegê-la, colocar fita adesiva em sua volta para auxiliar em sua vedação e depois colocá-la dentro da caixa de náilon, utilizada como suporte.

(a)

(b)

Figura 3.15: Segunda fase para a confecção do isolador do tipo Pino: (a) fita adesiva enrolada na matriz; e (b) matriz dentro da caixa de náilon.

- b) **Fase 3:** pesar o polioliol numa balança semi-analítica.

Figura 3.16: Terceira fase para a confecção do isolador do tipo Pino.

- c) **Fase 4:** acrescentar o granito natural ao polioliol e misturar durante dois minutos.

Figura 3.17: Quarta fase para a confecção do isolador do tipo Pino.

Observação: esta quarta fase refere-se somente à fabricação dos isoladores com granito sintético.

- d) **Fase 5:** efetuar vácuo na mistura (polioliol com o granito natural) durante 5 minutos.

Figura 3.18: Quinta fase para a confecção do isolador do tipo Pino.

Observação: esta primeira fase refere-se somente à fabricação dos isoladores com granito sintético.

- e) **Fase 6:** retirar a mistura (poliol com o granito natural) do vácuo, acrescentar o pré-polímero, misturar durante 2 minutos e realizar vácuo novamente durante 3 minutos.
- f) **Fase 7:** verter o granito sintético dentro da matriz, com o auxílio de uma colher pequena.

Figura 3.19: Sétima fase para a confecção do isolador do tipo Pino.

- g) **Fase 8:** colocar a matriz com o granito sintético numa mesa vibratória, durante 5 minutos para a acomodação dos grãos, e continuar injetando material até preencher totalmente o furo de entrada.

Figura 3.20: Oitava fase para a confecção do isolador do tipo Pino.

Observação: esta oitava fase refere-se somente à fabricação dos isoladores com granito sintético.

- h) **Fase 9:** Virar a 180° a caixa com a matriz para proporcionar uma melhor distribuição do material e também para evitar a expansão do ar existente no molde.

Figura 3.21: Nona fase para a confecção do isolador do tipo Pino.

Observação: esta nona fase refere-se somente à fabricação dos isoladores com granito sintético.

- i) **Fase 10:** Após 6 horas, o isolador está pronto para ser desmoldado, conforme ilustram as figuras 3.22 e 3.23.

(a)

(b)

Figura 3.22: Décima fase para a confecção do isolador do tipo Pino: (a) desmontagem da caixa de náilon; (b) e retirada do isolador de dentro do molde.

Figura 3.23: Décima fase para a confecção do isolador do tipo Pino: (a) isolador com rebarba; e (b) isolador com o acabamento final após a retirada das rebarbas.

- j) **Fase 11:** Efetuar a limpeza dos utensílios utilizados na confecção dos isoladores poliméricos, com o auxílio de espátula, estopa e solvente (acetona).

Figura 3.24: Décima primeira fase para a confecção do isolador do tipo Pino.

As quantidades de materiais utilizados na produção dos isoladores do tipo Pino dependem do tipo de resina empregada, conforme apresentado a seguir:

1. Isolador do tipo Pino fabricado com a resina **RI 1** pura, na proporção 1:1:
 - Poliol (código A249): 352 g;
 - Pré-polímero (código B25015): 352 g;
 - Total: 704 g.
2. Isolador do tipo Pino fabricado com a resina **RI 2** pura, na proporção 1:1,75:
 - Poliol (código A253): 256 g;
 - Pré-polímero (código B351): 448 g;
 - Total: 704 g.

3. Isolador do tipo Pino fabricado com o **granito sintético RI 1** (com 77% de granito natural e 23% de resina RI 1):

- Polioli (código A249): 149,5 g;
- Pré-polímero (código B25015): 149,5 g;
- Brita de 4,76 mm de granito natural: 500 g;
- Brita de 2,00 mm de granito natural: 300 g;
- Pó de granito natural: 200 g;
- Total: 1.299 g.

4. Isolador do tipo Pino fabricado com o **granito sintético RI 2** (com 77% de granito natural e 23% de resina RI 2):

- Polioli (código A253): 108,7 g;
- Pré-polímero (código B351): 190,3 g;
- Brita de 4,76 mm de granito natural: 500 g;
- Brita de 2,00 mm de granito natural: 300 g;
- Pó de granito natural: 200 g;
- Total: 1.299 g.

O tempo total para a confecção dos isoladores do tipo Pino é em torno de nove horas, sendo ele dividido em:

- 20 minutos para a secagem do granito natural na estufa à 150 °C;
- 2 horas para o granito natural (em britas) se esfriar;
- aproximadamente meia hora para a confecção dos isoladores e para a limpeza dos utensílios usados; e
- 6 horas para aguardar o tempo de desmoldagem do isolador polimérico.

Comparando com o isolador tradicional de porcelana que tem um tempo de fabricação em torno de sete a nove dias, dependendo do fabricante, o isolador polimérico possui uma maior facilidade de manuseio no processo de fabricação, além de precisar de um local com uma área física menor e de menos mão-de-obra para a sua produção.

3.6 Estimativa de preço dos isoladores poliméricos em estudo.

Neste trabalho não será apresentada a comparação de preço entre os isoladores desenvolvidos e os comerciais de porcelana, pela complexidade existente no cálculo de custo de um novo produto que não tem a sua linha de produção industrial definida [3].

Sabendo-se que o preço final do isolador de porcelana utilizado como referência é em torno de R\$6,00 (US\$2,00¹) e que, os preços **estimados** de um quilo das resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona, RI 1 e RI 2 são respectivamente, R\$ 50,00 (US\$16,72¹) e R\$25,00 (US\$12,56¹); na tabela 3.1 é apresentado um custo, também **estimado**, da principal matéria prima empregada nos isoladores poliméricos em estudo.

Tabela 3.1: Custo da principal matéria prima utilizada nos isoladores em estudo.

Isolador PINO	Quantidade de resina utilizada no isolador (g)	Custo da resina utilizada no isolador	
		(R\$)	(US\$) ¹
RI 1	704 g	35,20	11,77
RI 2	704 g	17,60	5,88
GSRI 1	299 g	14,95	5,00
GSRI 2	299 g	7,48	2,50

Portanto, como já era esperado o preço dos isoladores poliméricos em estudo são superiores aos dos isoladores de porcelana. Porém, acredita-se que, em um processo de fabricação industrial, os isoladores de granito sintético (que possuem somente 23% da resina em sua composição), apresentem preços competitivos com os isoladores comerciais de porcelana.

¹ Cotação do dólar comercial efetuada no dia 24 de abril de 2003 (US\$1,00 a R\$2,99). E cabe ressaltar que estes preços não variam diretamente com o valor do dólar, e que essa conversão foi realizada somente para efeito de estimativa de custos.

CAPÍTULO 4

Procedimentos dos ensaios realizados nos isoladores elétricos do tipo Pino.

4.1 Introdução.

Visando uma análise completa sobre esses isoladores poliméricos em estudo foi necessária a realização dos seguintes ensaios:

- Ensaio elétrico com tensão alternada e frequência industrial;
- Ensaio de envelhecimento acelerado;
- Ensaio térmico;
- Ensaio de flexão mecânica; e
- Tomografia computadorizada.

Esses ensaios realizados nos isoladores do tipo Pino são considerados muito importantes para uma análise do desempenho dos isoladores aplicados em ambiente externo e eles foram realizados com a finalidade de reproduzirem, da melhor maneira possível, as condições de serviço dos isoladores do tipo Pino no sistema de energia elétrica nacional.

Os procedimentos desses ensaios e seus objetivos são apresentados nos itens subsequentes.

4.2 Ensaio Elétrico.

No ensaio elétrico foi aplicada uma tensão de frequência industrial para verificar a isolação elétrica dos isoladores poliméricos, comparando com os isoladores de porcelana.

Os procedimentos do ensaio elétrico foram segundo a norma técnica [21]. São eles:

- aplicar tensão elétrica de frequência industrial com tal valor que se produzam descargas externas intermitentes a cada pouco segundos;
- elevar o nível de tensão de modo uniforme (500 V/s); e
- não utilizar nenhum dispositivo ou disposição que reduza a tensão de descarga externa.

Por ocasião dos ensaios, a temperatura manteve-se no valor de $23,0 \pm 5$ °C e umidade relativa, no valor de $49,0 \pm 5\%$.

Para o ensaio elétrico nos isoladores do tipo Pino foi utilizado o próprio pino do isolador, fio condutor nú e esferas equalizadoras de campo elétrico, conforme é apresentado na figura 4.1.

Figura 4.1: Ensaio elétrico no isolador do tipo Pino: (a) dispositivos utilizados; e (b) montagem do ensaio.

Como equipamento de ensaio, tanto de medição quanto de geração de tensões alternadas, foi utilizado o *KIT High Voltage da Haefely* classe 200 kV, considerado padrão internacional nessa classe de tensão, e identificado no Anexo B.

No caso da determinação das características elétricas dos isoladores, foram utilizadas as normas técnicas brasileiras para isoladores de porcelana como referência, porque na literatura atual não há normas específicas para isoladores poliméricos do tipo Pino.

4.3 Ensaio de envelhecimento acelerado.

O objetivo deste ensaio foi o de analisar o comportamento elétrico dos isoladores poliméricos fabricados com as resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona diante de sua suportabilidade à intempérie. Neste trabalho, foi utilizado o intemperismo artificial gerado em uma câmara de *Weather – Ometer* [27], que é um procedimento normalizado, de envelhecimento de materiais, que tem por objetivo determinar de forma comparativa, o desempenho dos mesmos perante solicitação imposta pelo ambiente externo. Os resultados obtidos ao final não são uma representação fiel às alterações que possam ocorrer com os materiais ensaiados, quando expostos ao ambiente natural, porém são fontes excelentes de referência e compreensão dos processos degradativos, provocados por radiação ultravioleta e umidade do material polimérico [27].

Como uma das principais preocupações com os isoladores poliméricos, no momento, é em relação às suas características elétricas, foram realizados ensaios elétricos antes e depois desses isoladores serem submetidos ao ensaio de envelhecimento acelerado.

Neste trabalho, analisou-se o desempenho desses isoladores com a intenção de se conseguir dados de laboratório, que poderiam ser estendidos para o comportamento no intemperismo natural.

As condições e os procedimentos do ensaio de envelhecimento acelerado foram:

- No ensaio foi realizado no aparelho Atlas *Weather-Ometer*, utilizou-se um fator de aceleração considerado crítico [3] e igual a seis, aproximadamente;
- o tempo de ensaio de envelhecimento foi de 5.000 horas como estabelece a norma técnica “IEC 1109” [22].

No entanto, como esses materiais em estudo são novos, os ensaios foram elaborados para que esses efeitos sobre os isoladores fossem mais bem analisados.

4.4 Ensaio térmico.

4.4.1 Ensaio de suportabilidade térmica, com variação de carga mecânica.

Os ensaios de suportabilidade térmica possuem caráter qualitativo e tiveram como objetivo principal verificar a suportabilidade **térmica** do isolador em relação à sua deformação através de uma força aplicada na vertical.

Esses ensaios foram realizados no isolador de porcelana (utilizado como referência) e nos isoladores fabricados com a resina RI 1 porque essa resina apresenta o dobro da dureza mecânica da resina RI 2 [3], e eles foram divididos em três tipos diferentes, a saber:

- a) **ensaio a**: 40 horas na estufa a 60 °C e depois aplicada 1 tonelada durante 30 minutos;
- b) a seguir, **ensaio b**: 40 horas na estufa a 80 °C e depois aplicada meia tonelada durante 30 minutos;
- c) a seguir, **ensaio c**: na estufa a 80 °C durante 60 horas e depois aplicadas 2 toneladas durante 30 minutos.

Observações importantes:

- Essas temperaturas foram usadas como condições críticas de serviço dos isoladores e o tempo de aplicação do peso de 30 minutos foi escolhido em função do tempo que os isoladores gastavam aproximadamente para se esfriarem, quando expostos em temperatura ambiente.
- Os ensaios **a** e **b** foram realizados com dois isoladores iguais do tipo RI 1. Enquanto que, o isolador de granito sintético RI 1 também foi submetido ao ensaio **b**, pelo fato deste ensaio apresentar uma característica mais próxima das condições de serviço dos isoladores, em relação à carga de 500 kg;
- O peso de 2 toneladas foi mantido através de monitoramento manual, porque a prensa perdia em torno de 200 a 500 kg num período superior a 24 horas;

- As condições ambientais, os horários e a deformação no isolador foram anotados durante todo o período de ensaio;
- A estufa utilizada e a posição da localização do isolador no seu interior foram mantidas as mesmas durante os ensaios, como demonstra a figura 4.2 – (a);

(a)

(b)

(c)

Figura 4.2: Esquema de montagem do ensaio: (a) na estufa, com a temperatura controlada; (b) na prensa hidráulica; e (c) medição de temperatura e de umidade do ar;

- O esquema de montagem da aplicação de uma força vertical sobre os isoladores com o auxílio de uma prensa hidráulica, e um medidor de temperatura e de umidade relativa (identificados no anexo B) são apresentados nas figuras 4.2 – (b) e (c);
- Antes e depois dos ensaios foi usado um medidor de nível de superfície para verificar se havia curvatura nos isoladores.
- Após a aplicação da força no ensaio c, o isolador voltou para a estufa para se verificar o processo de recuperação estrutural do mesmo.

4.4.2 Ensaio de envelhecimento térmico.

O ensaio de envelhecimento térmico também possui caráter qualitativo e teve como objetivo principal verificar o comportamento dos isoladores em função da aplicação de uma alta temperatura num período de tempo prolongado e com uma carga mecânica aplicada.

Os procedimentos dos ensaios foram:

- O isolador foi submetido a 80 °C contínuo na estufa durante um tempo de 30 dias para análise de seu envelhecimento térmico;
- A estufa utilizada e a posição da localização do isolador no seu interior foram mantidas as mesmas durante os ensaios; e
- Após este período, foram aplicados 500 kg sobre o isolador durante 10 horas contínuas.

4.5 Ensaios mecânicos.

Os ensaios mecânicos realizados nos isoladores poliméricos foram para determinar as suas cargas de flexão. Para isso, foi elaborado um dispositivo para a realização desse ensaio, procurando reproduzir exatamente as suas condições de serviço, cujo esquema preliminar e o dispositivo construído com material resistente são apresentados na figura 4.3.

Figura 4.3: Ensaio mecânico de flexão nos isoladores do tipo Pino: (a) esquema; e (b) dispositivo construído com material resistente.

O dispositivo desenvolvido para o ensaio nos isoladores do tipo Pino apresentou ótimos resultados, e foi acoplado facilmente na Máquina Universal de Ensaios Mecânicos utilizada, da marca INSTRON CORPORATION, com capacidade para 25 toneladas, e com aquisição de dados através do *software* Merlin Versão 4.0, conforme é apresentada no Anexo B.

À princípio, iniciou-se o ensaio de flexão no isolador do tipo Pino (GSRI2-a) com a velocidade padronizada do ensaio em materiais que foi de 1,30 mm/minuto, segundo as normas da ASTM. O tempo deste primeiro ensaio foi muito extenso, e então se optou em

aumentar o valor da velocidade porque algumas normas de isoladores sugerem que os ensaios sejam realizados num tempo entre 90 e 300 segundos. Portanto, foi utilizada uma velocidade de 5,0 mm/min.

4.6 Tomografia Computadorizada.

4.6.1 Geral.

A técnica de tomografia computadorizada de raios- γ é uma técnica completamente não destrutiva, que torna possível a análise de isoladores já moldados, identificando-se a presença de defeitos, de bolhas e de alterações na densidade do material composto. Maiores detalhes sobre o princípio de funcionamento dessa técnica são descritos em [3] e para melhor entendimento dos procedimentos utilizados neste trabalho, eles foram divididos nos itens subsequentes.

4.6.2 Condições de ensaios.

Na técnica de tomografia computadorizada, foram analisados quatro isoladores, que são apresentados na figura 4.4. E para cada isolador foram obtidas duas imagens, focando cada uma delas regiões distintas do isolador, seção 1 e seção 2, conforme figura 4.5.

Figura 4.4: Isoladores poliméricos do tipo Pino.

(a)

(b)

Figura 4.5: Seções analisadas na tomografia computadorizada: (a) seção 1 do isolador Pino e (b) seção 2 do isolador Pino .

O equipamento usado foi um mini-tomógrafo, de sistema de varredura de primeira geração, cuja fonte radioativa é o Amerício – 241 (60 keV) com atividade de 300 mCi. Seu feixe radioativo é colimado em 2 mm de diâmetro e sua atenuação, medida em passos de 1 mm, com tempos de contagem de 25 s, o que assegura uma resolução espacial da imagem de 2 mm. Além da inspeção visual, essa técnica permitiu uma análise quantitativa, medindo-se a densidade em cada ponto do plano tomográfico, como também os coeficientes de atenuação linear e de massa desses novos materiais [23].

4.6.3 Procedimentos dos ensaios realizados no granito sintético.

Para a determinação dos coeficientes de atenuação linear e de massa do granito natural utilizado na produção dos granitos sintético, necessários para a análises de tomografia computadorizada nos isoladores, determinou-se primeiramente os valores de densidade do granito natural e o valor do coeficiente de atenuação de massa.

Conforme já mencionado, as propriedades de coeficientes de atenuação linear e de massa adquiridas nas análises de tomografia computadorizada são definidas em [3].

O valor de densidade do granito natural com diferentes tamanhos e em conjunto com o ar (porque não houve compactação) foi determinado utilizando-se uma balança e um pote com volume definido, conforme demonstra a figura 4.6.

Figura 4.6: Granito natural não compactado: (a) medição da massa; e (b) medição do volume de material empregado.

A densidade do granito natural não compactado foi calculada através da razão entre o valor de massa e do volume.

A carga (granito natural e ar) foi posicionada no aparelho Analisador Granulométrico da empresa EMBRAPA, e com o dado da densidade da carga foi possível determinar o valor do seu coeficiente de atenuação de massa. Na figura 4.7, encontram-se fotografias desse aparelho conectado a um microcomputador para aquisição dos dados.

(a)

(b)

Figura 4.7: Determinação do coeficiente de atenuação do granito natural utilizado no compósito: (a) aparelho Analisador Granulométrico e (b) aquisição dos dados.

No aparelho foram realizadas 8 medidas com contagem de tempo de 10 segundos e fornecidos os valores médios dos coeficientes de atenuação de massa, enquanto que o coeficiente de atenuação linear foi calculado. Posteriormente, esse dado será comparado com os valor encontrado no programa de reconstrução de imagem, das tomografias realizadas nos isoladores fabricados com as resinas e com os granitos sintéticos, e serão apresentados no capítulo 6.

4.6.4 Densidade média (ou global) dos materiais poliméricos dos isoladores.

Os isoladores possuem uma pequena diferença em sua geometria devido a deficiências existentes em sua fabricação, como por exemplo, o tempo de trabalho das misturas de aproximadamente seis minutos, o que dificulta a extração de bolhas de ar introduzidas nelas, através da bomba à vácuo, e a expansão do material dentro do molde de borracha de silicone. Por isso, usou-se o seguinte procedimento para determinar a densidade média dos materiais inéditos utilizados:

- pesar o isolador numa balança semi-analítica, para obter a massa de cada isolador, em gramas;
- através do *Princípio de Arquimedes*, determinar o volume, em cm^3 , de cada isolador através do empuxo da água dentro do recipiente, e da balança disponível; e
- calcular a densidade dos materiais dos isoladores, em g/cm^3 , dividindo-se o valor da massa pelo volume medido dos mesmos.

As massas dos isoladores foram obtidas através de uma balança, e na figura 4.8, estão apresentadas fotografias dos isoladores, demonstrando o método prático para determinar o volume e posteriormente, a densidade do material segundo o *Princípio de Arquimedes*.

Figura 4.8: Fotografias do método utilizado para determinação das densidades dos materiais: (a) medição do volume; e (b) detalhe do isolador pendurado por um fio de náilon na medição de seu volume.

4.6.5 Determinar os dados estatísticos das imagens tomográficas.

Para determinar os valores dos coeficientes de atenuação linear, foi utilizado o mesmo programa computacional de reconstrução de imagens tomográficas, apresentado em [3] e [4]. Com auxílio desse programa, selecionou-se a imagem a ser analisada e com o cursor do *mouse*, escolheu-se a área a ser determinado os dados estatísticos dos coeficientes de atenuação linear. Um exemplo, de uma área selecionada, encontra-se na figura 4.9.

Figura 4.9: Área escolhida no isolador RI 1 do tipo Pino, na seção 1.

Portanto, com os valores de densidade média dos materiais e dos valores médios dos coeficientes de atenuação linear, através da equação 4.1 descrita a seguir, calculou-se os valores dos coeficientes de atenuação de massa, característicos de cada material, conforme se desejava.

$$\mu_m = \mu / \rho \quad (4.1)$$

Onde, o coeficiente de atenuação de massa (μ_m) é definido pela relação entre o coeficiente de atenuação linear (μ), em cm^{-1} ; e a densidade (ρ) do meio (da amostra), em g/cm^3 [3].

4.6.6 Análise tomográfica realizada no isolador de granito sintético com ruptura dielétrica.

O isolador confeccionado com o granito sintético e classificado no capítulo 7, como “isolador com defeito”, refere-se ao primeiro isolador fabricado com esse material e que apresentou defeitos em sua fabricação, porque não foi efetuado o processo de vibração adequadamente para a acomodação dos grãos de granito em sua moldagem. Conseqüentemente, esse isolador não passou no ensaio elétrico, porque ocorreu a ruptura dielétrica. Ele foi desprezado no ensaio de envelhecimento e nos ensaios mecânicos, porém teve uma grande contribuição na conclusão das análises tomográficas, conforme será descrito no capítulo 6. A fotografia do “isolador de granito sintético GSRI com defeito” encontra-se na figura 4.10.

Figura 4.10: Isolador de granito sintético GSRI 1 com defeito de fabricação.

Cabe ressaltar que, o ponto de ruptura do dielétrico identifica a região crítica do isolador, que é próxima ao posicionamento dos condutores elétricos, e que medidas de prevenção, como a tomografia computadorizada após o processo de fabricação, tornam-se importante.

CAPÍTULO 5:

Resultados dos ensaios: de envelhecimento acelerado, elétricos e térmicos realizados nos isoladores do tipo Pino.

5.1 Introdução.

Os ensaios realizados atingiram os seus objetivos de reproduzirem as condições de serviços dos isoladores elétricos e de proporcionar uma boa análise para os estudos dos isoladores alternativos para ambiente externo, conforme proposto neste trabalho.

Nos itens subseqüentes são apresentados os resultados do ensaio de envelhecimento acelerado e dos ensaios elétricos com tensão alternada e frequência industrial, antes e após o envelhecimento artificial dos isoladores poliméricos.

5.2 Ensaio de envelhecimento acelerado.

Após o ensaio de envelhecimento acelerado de 5.000 horas, foi realizado uma inspeção visual nos isoladores do tipo Pino para análise do comportamento dos materiais dielétricos submetidos a esse tipo de solicitação.

Os critérios utilizados para a verificação nos isoladores envelhecidos foram:

- alteração na cor ;
- a existência de rachaduras e microtrincas; e
- deformação.

Com os resultados obtidos pôde-se verificar que os isoladores apresentaram uma alteração significativa nas suas cores, para uma tonalidade de amarelo mais escuro, e que também ocorreu uma rachadura no isolador de Pino RI 1 que foi usinado.

Observou-se também que, não houve nenhum tipo de deformação nos isoladores submetidos ao ensaio de envelhecimento acelerado. Contudo, como modo de apresentação desses resultados foram tiradas fotografias dos lados dos isoladores que ficaram submetidos à maior e à menor radiação ultravioleta após as 5.000 horas de ensaios de envelhecimento,

que serão demonstradas a seguir. Cabendo ressaltar que, elas foram colocadas em caráter ilustrativo porque as diferenças são muito sutis em relação à variação do brilho nos isoladores. As figuras de números 5.1 a 5.9 ilustram os isoladores elétricos após os ensaio de envelhecimento acelerado.

Figura 5.1: Isolador Pino RI 2 usinado: (a) lado submetido à maior radiação ultravioleta; (b) lado oposto, submetido à menor radiação ultravioleta; e (c) parte interna do isolador.

Figura 5.2: Isolador Pino RI 1 usinado: (a) lado submetido à maior radiação ultravioleta; (b) lado oposto, submetido à menor radiação ultravioleta; e (c) parte interna do isolador.

Figura 5.3: Isolador Pino RI 2: (a) lado submetido à maior radiação ultravioleta; (b) lado oposto, submetido à menor radiação ultravioleta; e (c) parte interna do isolador.

Figura 5.4: Isolador Pino RI 1: (a) lado submetido à maior radiação ultravioleta; (b) lado oposto, submetido à menor radiação ultravioleta; e (c) parte interna do isolador.

Figura 5.5: Isolador Pino GSRI 2: (a) lado submetido à maior radiação ultravioleta; (b) lado oposto, submetido à menor radiação ultravioleta; e (c) parte interna do isolador.

Figura 5.6: Isolador Pino GSRI 1: (a) lado submetido à maior radiação ultravioleta; (b) lado oposto, submetido à menor radiação ultravioleta; e (c) parte interna do isolador.

Figura 5.7: Isolador Pino de Porcelana: (a) lado submetido à maior radiação ultravioleta; (b) lado oposto, submetido à menor radiação ultravioleta; e (c) parte interna do isolador.

A alteração da cor dos isoladores não é uma característica desejável, porém apresenta uma vantagem que é a de indicar que eles sofreram um processo de degradação com o tempo em suas condições de serviço.

Para o esclarecimento da presença da rachadura no isolador do tipo Pino RI 1 usinado foi realizado um novo ensaio, onde duas novas amostras de isoladores foram usinadas e depois submetidas às mesmas condições de envelhecimento do isolador em questão. Porém, esses novos isoladores obtiveram os mesmos resultados da maioria dos isoladores, não apresentando nenhuma rachadura. Portanto, verificou-se que o processo de usinagem não comprometeu a vida útil do isolador.

5.3 Ensaio elétrico nos isoladores elétricos.

O ensaio elétrico com tensão alternada foi realizado nos isoladores do tipo Pino antes e depois deles serem submetidos ao ensaio de envelhecimento acelerado, e todos tiveram como resultado a ocorrência do *flashover* em sua parte externa, no ar; o que significa que não houve perfuração elétrica no seus materiais dielétricos. Devido à esse fato, e também pelo ensaio ter sido realizado num equipamento padrão (*Haefely Trench*), foram efetuadas somente duas aplicações de tensão elétrica em cada isolador.

Nos isoladores poliméricos fabricados com as resinas, houve uma pequena carbonização nas suas partes inferiores devido à permanência do alto nível do arco elétrico durante alguns segundos, porém não houve propagação do fogo. A figura 5.8 apresenta o isolador RI 1 (não envelhecido) após o ensaio elétrico.

Figura 5.8: Parte inferior do isolador polimérico RI 1 após o ensaio de tensão aplicada.

No momento do *flashover*, conforme ilustra a figura 5.9, foi possível observar a ruptura externa aos isoladores e também visualmente, verificou-se que o dielétrico não rompeu, através da peça.

(a)

(b)

Figura 5.9: Ocorrência do *flashover* externo nos ensaios elétricos do isoladores: (a) ruptura externa e (b) arco elétrico durante o ensaio com a iluminação do laboratório desligada.

Os ensaios elétricos foram realizados no laboratório de alta tensão com condições ambientais monitoradas, a saber: 23,0°C de temperatura e 49,0 % de umidade relativa do ar.

Os resultados obtidos das tensões de *flashover* RMS (V_{RMS}) e de pico instantânea ($V_{pico\ instantânea}$), sob frequência industrial, encontram-se nas tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5.1: Tensão de ocorrência de flahover externo nos isoladores do tipo Pino antes do ensaio de envelhecimento acelerado (AEA).

Tipo de Isolador	V _{RMS} 1ª aplicação (kV)	V _{RMS} 2ª aplicação (kV)	Média V _{RMS} (kV)	Média V _{pico} instantânea (kV)
RI 1	63,66	61,88	62,77	88,77
RI 1 usinado	62,55	60,99	61,77	87,36
GSRI 1	61,74	59,76	60,75	85,91
RI 2	64,13	62,86	63,50	89,80
RI 2 usinado	65,00	61,98	63,49	89,79
GSRI 2	66,18	59,62	62,90	88,96
Porcelana	60,37	65,33	62,85	88,89

Tabela 5.2: Tensão de ocorrência de flahover externo nos isoladores do tipo Pino depois do ensaio de envelhecimento acelerado (DEA).

Tipo de Isolador	V _{RMS} 1ª aplicação (kV)	V _{RMS} 2ª aplicação (kV)	Média V _{RMS} (kV)	Média V _{pico} instantânea (kV)
RI 1	57,32	57,30	57,31	81,04
RI 1 usinado	61,30	61,19	61,00	86,62
GSRI 1	59,52	58,56	59,04	83,49
RI 2	59,08	62,75	60,92	88,61
RI 2 usinado	58,50	59,43	58,97	88,35
GSRI 2	61,77	60,01	60,89	86,11
Porcelana	58,89	59,15	59,02	83,47

Cabe ressaltar também que, os resultados dos ensaios elétricos descritos nas tabelas 5.1 e 5.2 e na figura 5.10 a seguir, são os valores médios do *flashover* ocorrido externamente aos isoladores, por isso os diferentes valores obtidos são em função da variação das condições atmosféricas do ambiente do ensaio, pelo fato de que os ensaios foram realizados em dias distintos (antes e depois do ensaio de envelhecimento).

Figura 5.10: Resultados dos ensaios elétricos nos isoladores do tipo Pino, antes e depois do ensaio de envelhecimento acelerado (AEA e DEA, respectivamente).

Com esses resultados pôde-se verificar que não houve alteração no desempenho elétrico dos isoladores poliméricos submetidos ao envelhecimento acelerado e que os isoladores envelhecidos que apresentaram rachaduras obtiveram resultados semelhantes aos demais, demonstrando que esses defeitos não interferiram no comportamento elétrico dos mesmos. Portanto, conclui-se que os isoladores não envelhecidos e os envelhecidos artificialmente (após 5.000 horas) obtiveram o mesmo comportamento elétrico, indicando uma boa perspectiva de desempenho com o intempérie, e suportando tensões *RMS* em torno de 60 kV e tensões de pico (instantâneas) superiores a 80 kV.

5.4 Ensaio térmico.

5.4.1 Ensaio de suportabilidade térmica, com variação de carga mecânica.

Os resultados dos ensaios de suportabilidade térmica realizados nos isoladores do tipo Pino, RI 1, GSRI 1 e de porcelana, são apresentados nas tabelas 5.3, 5.4 e 5.5, respectivamente.

Tabela 5.3: Ensaio de suportabilidade térmica no isolador RI 1 do tipo Pino.

Informações gerais	Dados equivalentes
Período total dos ensaios	6 dias
Temperatura ambiente	23 ± 3 °C
Umidade relativa do ar	48 ± 2 %
Deformação: Ensaio a	11,0 mm
Ensaio b	8,7 mm
Ensaio c	39,0 mm

Tabela 5.4: Ensaio de suportabilidade térmica no isolador GSRI 1 do tipo Pino.

Informações gerais	Dados equivalentes
Período total do ensaio	40 horas
Temperatura ambiente	$23 \pm 3^{\circ}\text{C}$
Umidade relativa do ar	$51 \pm 2\%$
Deformação: Ensaio b	0,25 mm

Tabela 5.5: Ensaio de suportabilidade térmica no isolador Pino de porcelana.

Informações gerais	Dados equivalentes
Período total dos ensaios	6 dias
Temperatura do ambiente	$24 \pm 2^{\circ}\text{C}$
Umidade relativa do ar	$46 \pm 2\%$
Deformação: Ensaio a	0,23 mm
Ensaio b	0,05 mm
Ensaio c	0,30 mm

Conforme foi citado no capítulo 4, o isolador de granito sintético GSRI 1 foi submetido somente ao ensaio **b**, pelo fato deste ensaio apresentar uma característica mais próxima das condições de serviço dos isoladores, em relação à carga de 500 kg. Diante do resultado obtido, não se observou uma deformação significativa deste isolador em relação aos isoladores RI 1 e de porcelana. A figura 5.11 demonstra o isolador GSRI após o término do ensaio.

(a)

(b)

Figura 5.11: Resultado do ensaio **b** no isolador GSRI 1: (a) 500 kg aplicados durante 30 minutos, com o isolador aquecido; e (b) isolador sem deformação visível.

Enquanto que, o isolador polimérico (RI 1) no final do ensaio c (80 °C aplicados) se deformou conforme pode ser observado na figura 5.12.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 5.12: Resultado do ensaio c: (a) 2 toneladas aplicadas durante 30 minutos, com o isolador aquecido; (b) deformação de 4,0 cm; (c) isolador voltou a altura inicial após ficar um tempo na estufa; e (d) parte inferior deformada na prensa.

Por outro lado, o isolador de porcelana praticamente não se deformou com as cargas de compressão de 1 e 2 toneladas aplicadas em conjunto com a variação de temperatura. E, para verificar sua suportabilidade, foram aplicadas cargas maiores e verificou-se que o isolador de porcelana quebrou com uma carga de compressão em torno de **6 toneladas**, como pode ser visto na figura 5.13.

Figura 5.13: Isolador de porcelana destruído após a carga de compressão de 6 toneladas.

5.4.2 Ensaio de envelhecimento térmico.

O isolador polimérico submetido a 80 °C contínuos na estufa durante um tempo de 30 dias para a análise de seu envelhecimento térmico, apresentou uma alteração significativa em sua cor, de amarelo claro para um amarelo mais escuro, como demonstra a figura 5.14.

Figura 5.14: Comparação do isolador que sofreu envelhecimento térmico. Da esquerda para a direita: isolador submetido ao ensaio (mais escuro), e isolador não submetido ao ensaio.

Porém, cabe ressaltar que, o isolador polimérico RI 1 com a carga de compressão de 500 kg durante 10 horas contínuas, praticamente não deformou. No final do ensaio foi registrada uma pequena deformação de 0,5 mm, que inclui os erros de precisão correspondentes à montagem do experimento.

5.4.3 Conclusão do ensaio térmico.

Embora os ensaios térmicos possuam caráter **qualitativo**, com os seus resultados obtidos pôde-se avaliar o desempenho dos isoladores em estudo em relação à variação de temperatura. Portanto, conclui-se que os isoladores poliméricos do tipo Pino, fabricados com as resinas poliuretanas RI 1 derivadas do óleo de mamona, possuem as seguintes limitações em suas condições de serviço:

- quando exposto a 60 °C durante 40 horas, e aplicada uma carga de compressão em torno de 1,0 tonelada, o isolador RI 1 apresenta deformação visível e prejudicial ao seu bom funcionamento;
- a 80 °C contínuos durante períodos de 40 horas, num total de um mês, e aplicada após este período, uma carga de compressão de 500 kg, o isolador RI 1 não apresenta deformação visível a olho nu; somente altera a sua cor para um tom mais escuro;
- a 80 °C contínuos durante 40 horas e aplicada uma carga de compressão de 500 kg, os isoladores RI 1, GSRI 1 e de porcelana não apresentam deformação visível a olho nu; e

- sob carga de compressão em torno de 2,0 toneladas (ou superiores), e à temperatura de 80°C, ocorre destruição total do isolador RI 1.

Finalizando, na tabela 5.6 é apresentado um resumo dos resultados descritos neste capítulo, de modo a facilitar a análise do comportamento dos isoladores em estudo.

Tabela 5.6: Resumo dos resultados dos ensaios: envelhecimento acelerado, elétrico e termo-mecânico.

Isolador Pino	Ensaio de Envelhecimento Acelerado		Ensaio Elétrico				Ensaio Termo-mecânico	
	Tempo de ensaio: 5000 horas		Tensão aplicada na frequência industrial (valores médios)				Carga de compressão mecânica (kg)	
	Alteração na cor	Rachadura e micro trinca	AEA (kV)		DEA (kV)		Deformação	
			V _{RMS}	V _{pico}	V _{RMS}	V _{pico}	Não visível	Visível
Porcelana	----	----	62,85	88,89	59,02	83,47	----	6000 kg (60°C)
RI 1	+ escura	----	62,77	88,77	57,31	81,04	Até 500 kg (80°C)	1000 kg (60°C)
GSRI 1	+ escura	----	60,75	85,91	59,04	83,49	Até 500 kg (80°C)	*
RI 2	+ escura	----	63,50	89,80	60,92	88,61	*	*
GSRI 2	+ escura	----	62,90	88,96	60,89	86,11	*	*

* **Nota:** Os ensaios termo-mecânicos (com cargas de compressão) não foram realizados nesses isoladores, porque optou-se em avaliar os seus comportamentos sob a carga de flexão, em função das suas aplicações sob condições de serviço, e cujos resultados encontram-se descritos no capítulo posterior. Porém, as propriedades térmicas desses isoladores serão analisadas em trabalhos futuros.

CAPÍTULO 6:

Resultados dos ensaios de flexão mecânica e das tomografias computadorizadas realizados nos isoladores do tipo Pino.

6.1 Introdução.

Conforme será demonstrado neste capítulo, os ensaios de flexão mecânica foram decisivos na conclusão final de desempenho dos isoladores poliméricos em estudo, porque proporcionaram limitações em suas condições de serviço. Em relação aos resultados da tomografia computadorizada, é importante observar que essa técnica **não-destrutiva** proporciona uma análise importante sobre a qualidade de fabricação dos isoladores poliméricos, segundo os resultados apresentados nos itens subseqüentes.

6.2 Ensaios de flexão mecânica nos isoladores do tipo Pino.

6.2.1 Comportamentos dos isoladores do tipo Pino sob carga de flexão.

Nos isoladores do tipo Pino foi realizado o ensaio mecânico de flexão e os seus comportamentos são apresentados nos itens subseqüentes, após as seguintes observações:

- os itens (a) e (c) acrescentados nos códigos dos isoladores indicam que os isoladores não foram submetidos ao ensaio de envelhecimento acelerado;
- o item (b) acrescentado nos códigos dos isoladores indica que os isoladores foram submetidos ao ensaio de envelhecimento artificial, durante 5.000 horas.
- A velocidade do ensaio mecânico foi mantida constante: 5mm/min;
- A alça feita com o cabo de aço foi trocada durante os ensaios por uma alça rígida de ferro soldada, porque a conexão feita com o cabo de aço se desprende.

I. Isolador do tipo Pino: GSRI 2-a.

(a)

a) Máquina Universal de ensaios

- Marca: Instron Corporation
- Modelo 5500 R
- N° de série: 7010
- Temperatura: 24 °C
- Umidade do ar: 64 %

(b)

b- Isolador GSRI 2-a:

- Carga de acomodação do cabo: 25 kgf
- Carga de ruptura: 3.030 N
- Após a ruptura, com a carga aplicada, ele continuou a se romper.
- Velocidade: 1,3 mm/min (teste inicial).

Figura 6.1: Isolador Pino GSRI 2-a: (a) sob carga de flexão na Máquina Universal de Ensaio; e (b) ruptura mecânica.

II. Isolador do tipo Pino: RI 2 -a.

(a)

a- Isolador RI 2 -a:

- $v = 5,0 \text{ mm/min}$
- Carga de acomodação: 40 kgf

(b)

Figura 6.2: Isolador Pino RI 2 -a:(a) sob carga de flexão; (b) ruptura mecânica.

b- Isolador RI 2 -a:

- Carga de ruptura: 4.461 N;
- Após o término do ensaio, o isolador continuou a se romper, com a carga aplicada.

III. Isolador do tipo Pino: RI 2-b, envelhecido.

Figura 6.3: Isolador Pino RI 2-b:(a) sob carga de flexão; (b) ruptura mecânica.

a – Isolador RI 2-b, envelhecido:

- $v = 5 \text{ mm/min}$
- A curvatura tornou-se visível a partir de 500 N.
- O isolador se rompeu.
- Carga de ruptura = 7.076 N

IV. Isolador do tipo Pino: GSRI 2-b, Envelhecido

Figura 6.4: Ruptura mecânica do Isolador Pino GSRI 2-b.

a – Isolador GSRI 2-b, envelhecido:

- $v = 5 \text{ mm/min}$
- Carga de ruptura = 5.498 N
- Ruptura catastrófica (completa).

V. Isolador do tipo Pino: RI 1 – a.

Figura 6.5: A alça de cabo de aço se desprendeu.

a- Isolador RI 1-a:

- $v = 5,0 \text{ mm/min}$
- Carga de acomodação: 40 kgf
- Carga máxima aplicada: 13.416 N
- a conexão da alça de cabo de aço se desprendeu e o isolador não se danificou .

VI. Isolador do tipo Pino: GSRI 1 (a) –

(a)

a- Isolador GSRI 1-a:

- $v = 5,0 \text{ mm/min}$
- Carga de acomodação: 40 kgf
- Carga máxima aplicada: 10.127 N
- a conexão da alça de cabo de aço começou a se desprender novamente.

(b)

Trinca

b- Isolador GSRI 1-a:

- Após a parada do ensaio por causa da abertura da alça, o isolador apresentou uma trinca.

Figura 6.6: Isolador Pino GSRI 1-a: (a) sob carga de flexão; (b) ruptura mecânica.

VII. Repetição do Isolador do tipo Pino: RI 1-a.

Figura 6.7: Repetição do ensaio no Isolador Pino RI 1- a, com a alça de ferro.

a – Repetição do ensaio no isolador RI1 (a):

- a alça de cabo de aço flexível foi trocada por uma alça de ferro soldada.
- Carga aplicada $\cong 20.000$ N
- o isolador não se rompeu e nem apresentou trincas.

VIII. Repetição do Isolador do tipo Pino: GSRI 1 (a).

Figura 6.8: Repetição do ensaio no Isolador Pino GSRI 1- a, com a alça de ferro.

a–Repetição do ensaio no isolador GSRI1-a:

- a alça de cabo de aço flexível foi trocada por uma alça de ferro soldada.
- Carga de ruptura = 9.319 N
- o isolador se rompeu, uma vez em que ele já apresentava uma trinca do ensaio anterior.

IX. Isolador do tipo Pino: GSRI 1 (b) envelhecido.

Figura 6.9: Ruptura mecânica do Isolador Pino GSRI 1-b sob carga de flexão.

a-Ensaio no isolador GSRI1-b, envelhecido:

- Carga de ruptura = 11.047 N
- O isolador envelhecido apresentou característica de ser mais rígido que o isolador não envelhecido.
- Ruptura catastrófica (completa).

X. Isolador do tipo Pino: RI 1 (b) envelhecido.

Figura 6.10: Isolador Pino RI 1- b, sob carga de flexão.

a – Ensaio no isolador RI1-b, envelhecido:

- Carga aplicada $\cong 20.000$ N
- O isolador envelhecido apresentou característica de ser mais rígido que o isolador não envelhecido.
- O isolador não se rompeu.

XI. Isolador do tipo Pino: RI 1 (c).

a – Isolador RI1-c:

- Carga aplicada $\cong 20.000$ N
- Observou-se que o isolador se deformou com a carga aplicada.

Figura 6.11: Isolador Pino RI 1-c sob carga de flexão.

6.2.2 Repetição do ensaio mecânico de carga à flexão nos isoladores que não se romperam: RI 1-a e RI 1-b.

Foram aplicadas cinco vezes a carga de flexão de 15.000 N nos isoladores RI 1-a e RI 1-b, individualmente, e aguardando um intervalo de 10 minutos entre as aplicações.

Os comportamentos dos isoladores foram semelhantes aos ensaios anteriores, onde ambos não se romperam e o isolador envelhecido(b) atingiu a carga máxima mais rápido.

Na figura 6.12 é apresentada a sequência de observação durante o ensaio, onde se pode observar uma pequena deformação ocorrida no isolador RI 1-b .

(a)

(b)

(c)

Figura 6.12: Observação durante o ensaio de flexão mecânica no isolador RI 1-b: (a) 1ª aplicação, observou-se que o isolador não se deformou, (b) 5ª aplicação, o isolador apresentou uma pequena deformação; (c) após o término do ensaio, o isolador retornou à sua posição inicial; (d) isolador 5 minutos depois do término do ensaio; (e) isolador depois de 24 horas do término do ensaio.

6.2.3 Propriedades mecânicas dos isoladores do tipo Pino.

As propriedades mecânicas determinadas nos isoladores do tipo Pino são:

- a carga de flexão nominal, em N; e
- a carga de ruptura à flexão, em N.

Os resultados dos ensaios realizados nos isoladores de porcelana e nos isoladores fabricados com a resina **RI 1** e seu composto **GSRI 1** encontram-se na tabela 7.1 e nas figuras 6.13 e 6.13, a seguir.

Tabela 6.1: Resultado do ensaio de flexão mecânica nos isoladores à base da resina RI 1.

Tipo de Isolador	Carga máxima (kN)	Carga máxima (daN)	Tempo de ensaio (s)	D.e. (mm)	Velocidade (mm/min)
RI 1- a	19,63	1962,54	316,14	26,34	5,00
RI 1-b	19,61	1961,33	164,07	13,67	5,00
GSRI 1-a	9,32	931,91	70,87	5,91	5,00
GSRI 1-b	11,05	1104,71	78,21	6,52	5,00
Média	14,90	1490,12	157,32	13,11	5,00
Desvio padrão	5,49	549,35	114,02	0,50	0

Nos isoladores fabricados com a resina RI 1 pura, não foi possível determinar as suas cargas de ruptura, porque o material é muito rígido, por isso definiu-se a carga nominal igual a 75 % da carga máxima aplicada sem danos para o isolador. Enquanto que, os isoladores de granito sintético se romperam com valores próximos do valor estipulado pela norma de isoladores do tipo Pino que é de 10 kN [24], e sua carga nominal foi considerada 75 % da carga de ruptura, garantindo um boa margem de segurança, conforme se descreve na tabela 7.2.

Tabela 6.2: Carga de flexão mecânica dos isoladores de porcelana e à base da resina RI 1.

Tipo de Isolador	Carga de flexão Nominal (kN)	Carga de ruptura à flexão (kN)
RI 1- a	19,63	> 19,63
RI 1-b	19,61	> 19,61
GSRI 1-a	7,00	9,32
GSRI 1-b	8,30	11,05
Porcelana		10,00 ¹

As curvas características dos ensaios de flexão nos isoladores do tipo Pino à base da resina RI 1, encontram-se nas figuras 6.13 e 6.14.

(a)

¹ Segundo norma técnica NBR 7110 da ABNT(1998) com o título: Isoladores de pino de porcelana ou vidro – Padronização de dimensões e características [24].

Figura 6.13: Curvas características do ensaio de flexão nos isoladores à base da resina RI 1: (a) RI 1-a, RI 1-b, GSRI 1-a e GSRI 1-b em função da D.e.; e (b) RI 1-a, RI 1-b, GSRI 1-a e GSRI 1-b em função do tempo de ensaio.

Figura 6.14: Curvas características dos ensaios de flexão nos isoladores à base da resina RI 1: (a) repetição do ensaio nos isoladores RI 1-a e RI 1-b em função de D.e.; e (b) repetição do ensaio nos isoladores RI 1-a e RI 1-b em função do tempo de ensaio.

Nas figuras 6.13 e 6.14, pode-se observar que os isoladores produzidos com as resinas RI 1 e envelhecidos são **mais rígidos** do que os isoladores não envelhecidos e não se romperam; enquanto que caso dos isoladores produzidos com o granito sintético, ocorreram rupturas mecânicas à flexão num tempo curto.

Os resultados dos ensaios realizados nos isoladores fabricados com a resina **RI 2** e seu compósito **GSRI 2** encontram-se na tabela 6.3.

Tabela 6.3: Resultado do ensaio de flexão mecânica nos isoladores à base da resina RI 2.

Tipo de Isolador	Carga de ruptura (kN)	Carga de ruptura (daN)	Tempo de ensaio (s)	* D.e. (mm)	Velocidade (mm/min)
RI 2- a	4,46	446,12	448,00	37,33	5,00
RI 2-b	7,08	707,64	504,00	42,00	5,00
GSRI 2-a	3,03	302,95	180,00	14,00	5,00
GSRI 2-b	5,50	549,80	190,13	15,84	5,00
Média	5,02	501,63	330,53	27,29	5,00
Desvio padrão	1,71	170,60	169,57	14,43	0

Os isoladores fabricados com a resina RI 2 pura suportaram cargas de flexão inferiores aos isoladores fabricados com a resina RI 1 e ao isolador de porcelana.

A carga nominal considerada foi também 75 % da carga de ruptura, garantindo uma boa margem de segurança, conforme os dados descritos na tabela 6.4.

Tabela 6.4: Carga de flexão mecânica dos isoladores à base da resina RI 2.

Tipo de Isolador	Carga de flexão Nominal (kN)	Carga de ruptura à flexão (kN)
RI 2- a	3,35	4,46
RI 2-b	5,31	7,08
GSRI 2-a	2,27	3,03
GSRI 2-b	4,13	5,50
Porcelana	-----	10,00 ¹

As curvas características do ensaio de flexão nos isoladores do tipo Pino à base da resina RI 2, encontram-se na figura 6.15.

¹ Segundo norma técnica NBR 7110 da ABNT(1998) com o título: Isoladores de pino de porcelana ou vidro – Padronização de dimensões e características [24].

Figura 6.15: Curvas características do ensaio de flexão nos isoladores à base da resina RI 2: (a) carga em função da D.e.; e (b) carga em função do tempo de ensaio.

A figura 6.16 apresenta a ruptura mecânica à flexão dos isoladores produzidos com o granito sintético em estudo. A ruptura é mais brusca que no caso dos isoladores fabricados com a resina RI 2, a qual possui característica elastomérica.

Figura 6.16: Ruptura mecânica dos isoladores do tipo Pino produzidos com granito sintético.

6.2.4 Conclusão dos ensaios de flexão mecânica.

O isolador do tipo Pino de porcelana possui uma carga de flexão de ruptura de 10.000 N, conforme a especificação da norma técnica NBR 7110 [24], usada como referência. Com essa informação, pode-se concluir que:

- Os isoladores fabricados com as resinas RI 2 se romperam durante o ensaio de flexão, com características de suportabilidade de carga inferior ao de porcelana: com valores em torno da metade da carga de ruptura de referência (10.000 N) [24]. Contudo, esses isoladores não podem serem aplicados na mesma condição de serviço dos de porcelana. Eles podem ser utilizados em condições de serviço que exigem uma carga à flexão menor, com valores próximos a 3,00 kN.
- Os isoladores fabricados com a resina RI 1 pura não se romperam durante o ensaio de flexão, apresentando características de suportabilidade de carga de flexão superior ao de porcelana; enquanto que, os isoladores fabricados com granito sintético RI 1 se romperam com valores próximos ao da porcelana. Portanto, diante dos resultados obtidos neste trabalho, os isoladores poliméricos à base da resina RI 1 foram aprovados em termos das características elétrica e mecânica, quando comparados com os isoladores tradicionais de porcelana.

6.3 Tomografias Computadorizada realizadas nos isoladores do tipo Pino.

6.3.1 Imagens tomográficas e histogramas.

Os resultados das tomografias apresentam imagens de uma seção dos isoladores, onde, através da diferenciação das tonalidades de cor, podem-se obter informações quanto à densidade dos materiais ou das bolhas de ar em seu interior [3 e 4].

Como a análise foi realizada em quatro isoladores do tipo Pino fabricados com os quatro dielétricos diferentes, obteve-se um banco de imagens com oito imagens porque foram verificadas duas seções em cada isoladores. Porém, serão apresentadas apenas duas imagens para ilustrar os resultados obtidos, enquanto que as demais encontram-se no Anexo C.

As figuras 6.17 e 6.18 apresentam respectivamente, as imagens tomográficas e os histogramas da seção 1 do isolador fabricado com a resina RI 1 e da seção 2 do isolador fabricado com o granito sintético RI 2.

Figura 6.17: Seção 1 do isolador do tipo Pino fabricado com a resina RI 1: (a) imagem tomográfica; (b) escala da imagem em cm^{-1} e (c) histograma da tomografia.

Figura 6.18: Seção 2 do isolador GSRI 2: (a) imagem tomográfica; (b) escala da imagem em cm^{-1} e (c) histograma da tomografia.

6.3.2 Resultados estatísticos das imagens tomográficas.

6.3.2.1 Seção 1 dos isoladores poliméricos do tipo Pino.

Os resultados da seção 1 dos isoladores poliméricos do tipo Pino encontram-se nas tabelas 6.5 e 6.6.

Tabela 6.5: Resultados das tomografias realizadas na seção 1 dos isoladores Pino.

Tipo de isolador	Massa (g)	Volume (g/cm ³)	Densidade experimental (g/cm ³)	Coefficiente linear médio, μ (cm ⁻¹)	Coefficiente de massa calculado, μ_m (cm ² /g)
RI 1	547,8	496,0	1,104	0,199	0,180
RI 2	537,5	494,0	1,088	0,198	0,182
GSRI 1	1023,5	517,0	1,980	0,472	0,238
GSRI 1 F	999,6	544,0	1,838	0,447	0,243
GSRI 2	995,1	550,0	1,809	0,421	0,233
Porcelana	1257,2	527,0	2,386	0,509	0,213
Média	893,5	521,3	1,701	0,374	0,215
Desvio padrão	288,8	23,6	0,512	0,139	0,028

Tabela 6.6: Coeficientes linear da seção 1, dos materiais dos isoladores do tipo Pino.

Tipo do isolador	Valor mínimo de μ (cm ⁻¹)	Valor máximo de μ (cm ⁻¹)	Valor médio de μ (cm ⁻¹)	Desvio padrão dos valores de μ (cm ⁻¹)	Coefficiente de variância de μ (%)
RI 1	0,141	0,269	0,199	0,016	8,037
RI 2	0,153	0,251	0,198	0,016	8,163
GSRI 1	0,162	0,743	0,472	0,079	16,74
GSRI 1	0,023	1,001	0,447	0,098	21,93
com defeito					
GSRI 2	0,080	0,923	0,421	0,098	23,23
Porcelana	0,353	0,676	0,509	0,051	10,07
Média	0,152	0,644	0,374	0,060	14,71
Desvio padrão	0,112	0,320	0,139	0,038	6,911

Nota: o valor negativo do coeficiente linear não tem sentido físico, porém indica um material sem densidade, que é conseqüentemente a bolha de ar, em grande dimensão.

O valor do coeficiente linear μ descrito nas tabela 7.5 e 7.6, representa o valor médio referente à área escolhida na imagem tomográfica, enquanto que o coeficiente de atenuação de massa μ_M , é o valor calculado entre μ médio e a densidade média dos materiais.

6.3.2.2 Seção 2 dos isoladores poliméricos do tipo Pino.

Os resultados da seção 2 dos isoladores poliméricos do tipo Pino encontram-se nas tabelas 6.7 e 6.8.

Tabela 6.7: Resultados das tomografias realizadas na seção 2 dos isoladores Pino.

Tipo de isolador	Coeficiente linear, μ (cm^{-1})	Coeficiente de massa, μ_M (cm^2/g)
RI 1	0,203	0,184
RI 2	0,200	0,184
GSRI 1	0,500	0,253
GSRI 1 c/ defeito	0,475	0,258
GSRI 2	0,460	0,254
Porcelana	0,512	0,215
Média	0,392	0,225
Desvio	0,148	0,035

Tabela 6.8: Coeficiente de atenuação linear da seção 2, dos materiais dos isoladores Pino.

Tipo de isolador	Valor mínimo de μ (cm^{-1})	Valor máximo de μ (cm^{-1})	Valor médio de μ (cm^{-1})	Desvio padrão dos valores de μ (cm^{-1})	Coeficiente de variância de μ (%)
RI 1	0,157	0,262	0,203	0,015	7,560
RI 2	0,148	0,251	0,200	0,015	7,487
GSRI 1	0,185	0,934	0,500	0,091	18,17
GSRI 1 c/ defeito	- 0,013	0,886	0,475	0,103	21,62
GSRI 2	0,150	0,872	0,460	0,085	18,57
Porcelana	0,362	0,678	0,512	0,054	10,46
Média	0,165	0,647	0,392	0,061	13,98
Desvio	0,120	0,315	0,148	0,039	6,21

Nota: O valor do coeficiente linear μ descrito nas tabelas 6.7. e 6.8, representa o valor médio referente à área escolhida na imagem tomográfica, enquanto que o coeficiente de atenuação de massa μ_M , é o valor calculado entre μ médio e a densidade média dos materiais.

Cabe ressaltar que, os valores de massa, volume e densidade dos materiais dos isoladores são os mesmos apresentados na tabela 6.5, porque só mudou a seção de análise dos mesmos. No entanto, eles são apresentados novamente, em forma gráfica, nas figuras 6.19 e 6.20.

Figura 6.19: Características dos isoladores do tipo Pino.

Figura 6.20: Densidade dos materiais dos isoladores do tipo Pino.

6.3.2.3 Média dos resultados dos coeficientes de atenuação linear e de massa do Isolador Pino, referentes aos dados das seções 1 e 2.

Os resultados da média dos resultados dos coeficientes de atenuação linear e de massa do Isolador Pino, referentes aos dados das seções 1 e 2, são apresentados na tabela 6.9.

Tabela 6.9: Valores médios das análises nas seções 1 e 2 dos isoladores do tipo Pino.

Tipo de isolador	μ da seção 1	μ da seção 2	μ médio das seções	Desvio padrão de μ das seções.	μ_M da seção 1	μ_M da seção 2	μ_M médio das seções	Desvio padrão de μ_M das seções.
RI 1	0,199	0,203	0,201	0,003	0,180	0,184	0,182	0,003
RI 2	0,198	0,200	0,199	0,001	0,182	0,184	0,183	0,001
GSRI 1	0,472	0,500	0,486	0,020	0,238	0,253	0,246	0,011
GSRI 1 c/ defeito	0,447	0,475	0,461	0,020	0,243	0,258	0,251	0,011
GSRI 2	0,421	0,460	0,441	0,028	0,233	0,254	0,244	0,015
Porcelana	0,509	0,512	0,511	0,002	0,213	0,215	0,214	0,001
Média	0,374	0,392	0,383	0,013	0,215	0,225	0,220	0,007
Desvio	0,139	0,148	0,144	0,006	0,028	0,035	0,032	0,005

Nas figuras 6.21 e 6.22, são demonstrados os resultados da média dos resultados dos coeficientes de atenuação linear e de massa do Isolador Pino, referentes aos dados das seções 1 e 2, com a finalidade de enfatizar que não há uma diferença significativa entre as seções analisadas.

Figura 6.21: Valores médios dos coeficientes de atenuação μ e μ_M , referente às análises nas seções 1 e 2 dos isoladores do tipo Pino.

Figura 6.22: Desvios padrão dos coeficientes de atenuação μ e μ_M , referentes às análises nas seções 1 e 2 dos isoladores do tipo Pino.

6.3.3 Resultados das análises de homogeneidade nas misturas dos granitos sintéticos.

Conforme a metodologia empregada nos isoladores para ambiente interno [3], neste trabalho também preocupou-se em verificar a homogeneidade nas misturas das resinas e dos granitos sintéticos e também em diferenciar as possíveis bolhas de ar ou as concentrações de granito natural nas imagens tomográficas dos isoladores do tipo Pino.

A qualidade desses isoladores depende de sua homogeneidade ao longo de geometria para garantir um comportamento elétrico distribuído uniformemente. E essas análises foram realizadas a partir da distribuição dos coeficientes de atenuação lineares destacados nas imagens tomográficas, conforme demonstra a figura 6.23.

Figura 6.23: Identificação dos valores de baixa densidade (valor baixo de μ) nos isoladores do tipo Pino: (a) de Porcelana - seção 1 e (b) GSRI 1 – seção 1, com defeito.

As cores mais escuras (pixel com cor próxima do preto), identificam material com baixa densidade (valor baixo de μ), enquanto que as mais claras, identificam material com alta densidade. E no caso das bolhas de ar, que não têm densidades, classifica-se esses pontos mais escuros e com valores próximos de zero, como a presença marcante do ar.

A menor medida efetuada pelo tomógrafo é definida pelo valor do passo linear especificado antes das realização das tomografias. Para os isoladores do tipo Pino foi utilizado um passo linear de 0,109 mm, o que equívale à largura de um pixel nas imagens.

Na figura 6.23-(a), verifica-se que há uma homogeneidade na porcelana do isolador comercial, porque tem uma distribuição uniforme dos coeficientes de atenuação linear μ , com valores próximos uns dos outros.

Enquanto que na figura 6.23-(b), comprova-se que os pixels mais escuros indicam a presença de ar nas misturas dos materiais, porque as bolhas de ar são bem maiores e visíveis nesse isolador com defeito de fabricação. No centro desse isolador, na seção 1, existe um furo que serve para encaixar o isolador em sua instalação de serviço, e sendo ele composto de ar, os seus coeficientes de atenuação são negativos, comprovando-se também, a classificação de cores bem escuras para bolhas de ar.

Neste trabalho foi observado também que os valores dos coeficientes de atenuação linear e de massa obtidos nos isoladores de granitos sintéticos são diferentes dos valores obtidos na análise do granito natural não compactado (em conjunto com o ar), e que os valores obtidos são próximos dos resultados descritos em [3], conforme apresenta a tabela 6.10.

Tabela 6.10: Propriedades do granito natural com carga.

Tipo de carga	Massa (g)	Volume (cm ³)	Densidade (g/cm ³)	Coefficiente de atenuação de massa, μ_m (cm ² /g)	Coefficiente de atenuação linear, μ (cm ⁻¹)
Granito natural e ar	125,0	78,2	1,6	0,330	0,525

No entanto, conclui-se que a técnica de tomografia computadorizada aplicada na análise da homogeneidade da mistura dos materiais nos isoladores poliméricos constitui em uma importante ferramenta na verificação da qualidade de fabricação desses componentes e na prevenção de possíveis falhas em seus materiais dielétricos.

E finalizando, na tabela 6.11 é apresentado um resumo dos resultados descritos neste capítulo, de modo a facilitar a análise do comportamento dos isoladores em estudo.

Tabela 6.11: Resumo dos resultados do ensaio de flexão mecânica e da tomografia computadorizada.

Isolador Pino	Ensaio de flexão mecânica		Tomografia computadorizada					
	Carga de ruptura à flexão (kN)		Coefficientes de atenuação obtidos nas imagens tomográficas					
	AEA	DEA	μ (cm ⁻¹)			μ_m (cm ² /g)		
			Seção 1	Seção 2	$\mu_{\text{méd.}}$	Seção 1	Seção 2	$\mu_{\text{méd.}}$
Porcelana	* 10,00	---	0,509	0,512	0,511	0,213	0,215	0,214
RI 1	>19,63	>19,61	0,199	0,203	0,201	0,180	0,184	0,182
GSRI 1	9,32	11,05	0,472	0,500	0,486	0,238	0,253	0,246
RI 2	4,46	7,08	0,198	0,200	0,199	0,182	0,184	0,183
GSRI 2	3,03	5,50	0,421	0,460	0,441	0,233	0,254	0,244

* *Nota:* Segundo norma técnica NBR 7110 da ABNT (1998), com o título: Isoladores de pino de porcelana ou vidro – Padronização de dimensões e características [24].

CAPÍTULO 7:

Conclusões.

7.1 Conclusões.

Neste capítulo serão descritas as conclusões finais obtidas no desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, complementando as conclusões parciais apresentadas nos capítulos anteriores e indicadas nas tabelas 5.6 e 6.11, com os resumos dos resultados dos ensaios efetuados.

A análise bibliográfica descrita no capítulo 2, apresentou o panorama brasileiro em relação aos isoladores elétricos e aos problemas existentes devido às suas falhas, que são responsáveis por sérias interrupções não programadas nas linhas de transmissão e de distribuição de energia elétrica. Cabendo ressaltar, que diferente dos outros países, a utilização dos isoladores cerâmicos de Pino é predominante nas linhas de distribuição brasileiras e que pesquisas de desenvolvimento de isoladores alternativos a estes precisam ser intensificadas, sejam em mudanças em suas geometrias ou em seus materiais dielétricos.

No capítulo 3 é apresentada a produção **laboratorial** dos processos de fabricação da matriz e dos isoladores de granito sintético do tipo Pino, que em função de seu baixo custo e de sua praticidade de execução podem ser considerados processos otimizados. A matriz confeccionada com o elastômero de silicone mostrou-se ser eficiente na fabricação dos isoladores poliméricos, e em conjunto com a descrição do seu processo, demonstrou-se ser facilmente reproduzida. Observa-se também que, o processo de fabricação dos isoladores de granitos sintéticos é prático, porém muito cauteloso em relação ao tempo de manuseio dos materiais poliméricos e ao processo de extração das bolhas de ar através do vácuo. A figura 3.13 apresenta ótimos resultados obtidos nos isoladores poliméricos fabricados com granitos sintéticos em relação à diminuição das bolhas de ar, onde o estudo de aperfeiçoamento da matriz de moldagem foi muito importante.

Os ensaios realizados nos isoladores do tipo Pino são considerados muito importantes para uma análise do desempenho dos isoladores aplicados em ambiente externo e eles atingiram os seus objetivos de reproduzirem as condições básicas de serviços dos isoladores elétricos e de proporcionaram uma boa perspectiva de viabilidade técnica e econômica desses isoladores alternativos para ambiente externo, conforme proposto neste trabalho.

O ensaio de envelhecimento acelerado, correspondente a 5.000 horas de ensaio, não alterou o desempenho elétrico dos isoladores, indicando boas características quanto às suas suportabilidades à intempérie. A mudança na cor desses isoladores após o ensaio de envelhecimento acelerado, conforme já era esperado, tem como justificativa a mesma apresentada no estudo das resinas [3], que é devido ao fato das ligações duplas existentes nas composições química desses materiais, sofrerem um processo de oxidação quando submetidas a altas temperaturas.

Conforme apresentado no capítulo 5, com os ensaios elétricos pôde-se concluir que os isoladores poliméricos à base de resina poliuretana do tipo Pino, antes e depois do ensaio de envelhecimento acelerado de 5.000 horas, possuem um comportamento semelhante ao da porcelana, suportando, em média, uma tensão RMS em torno de 60 kV, uma tensão de pico superior a 80 kV, na frequência industrial de 60 Hz, e não propagam fogo quando expostos à arcos elétricos, possibilitando-os a serem instalados em redes elétricas com tensão nominal de 30 kV.

Nos ensaios térmicos, verificaram-se as limitações nas condições de serviço dos isoladores poliméricos fabricados com a resina RI 1, em estudo. Com uma carga de compressão de 500 kg, os isoladores RI 1 e GSRI 1 não tiveram as suas características alteradas, de modo significativo. Aumentando-se a carga para 1 e 2 toneladas, os isoladores começam a se deformar, conforme as condições descritas. O isolador de porcelana suportou uma carga em torno de 6 toneladas, sobressaindo-se em relação ao isolador polimérico RI 1, que suportou 2 toneladas a 80 °C. Sabendo que, um dos cabos mais pesados utilizados em linha de 15 kV na rede rural, onde se usam isoladores do tipo Pino, é o cabo 47 MCH com alma de aço, que pesa em torno de 0,975 kg/m [25], e que embora ele não aplique uma força no sentido vertical como foi realizado o ensaio, pode-se concluir que num vão de 100 metros de distância, ele representará uma carga de somente 100 kg, aproximadamente. Portanto, a condição real em que o isolador estará submetido apresenta uma folga significativa e favorável em relação à condição crítica do ensaio, de 500 kg a 80°C.

Os isoladores poliméricos do tipo Pino fabricados com a resina RI e com o granito sintético RI 1 possuem massas de aproximadamente 550g e 1020 g, respectivamente.

Enquanto que, os isoladores de porcelana analisados, do tipo Pino, possuem uma massa um pouco superior, de 1250 g aproximadamente. Isso caracteriza as vantagens de manutenção na rede e de transportes dos isoladores poliméricos em relação aos tradicionais de cerâmica.

Nas figuras 6.13 e 6.14, pôde-se verificar que os isoladores produzidos com a resina RI 1 e envelhecidos **são mais rígidos** do que os isoladores não envelhecidos e não se romperam; enquanto que caso dos isoladores produzidos com o granito sintético, ocorreram rupturas mecânicas à flexão num tempo curto.

Observa-se também que, os isoladores fabricados com os granitos sintéticos demonstraram boas perspectivas de desempenho elétrico. Porém, os ensaios de flexão mecânica foram decisivos na conclusão final de seu desempenho na rede elétrica, porque proporcionou limitações em suas condições de serviço. Portanto, somente foram aprovados os isoladores do tipo Pino fabricados com o granito sintético RI 1 (GSRI 1) que apresentaram valores de carga de ruptura à flexão próximos ao do isolador de porcelana, de 10 kN.

Em relação aos resultados da tomografia computadorizada, é importante observar que essa técnica **não-destrutiva** proporcionou uma análise importante sobre a qualidade de fabricação dos isoladores poliméricos. Segundo os resultados apresentados nas tomografias computadorizadas, as bolhas de ar que não têm densidades e os coeficientes de atenuação seriam nulos, mas como o sistema de medição possui alguns erros de precisão, os valores encontrados são próximos de zero e servem para identificar as suas presenças, como pode ser observado na figura 6.23.

O isolador confeccionado com o granito sintético e classificado “com defeito”, conforme já mencionado, refere-se ao primeiro isolador fabricado com esse material e que apresentou defeitos em sua fabricação, e consequentemente não passou no ensaio elétrico, porque ocorreu a ruptura dielétrica. Ele foi submetido à análise de tomografia computadorizada e pôde-se verificar deficiências em seu material internamente. Nas imagens tomográficas apresentadas na figura 6.23-(b) ficou evidente as grandes quantidades de bolhas de ar, no seu interior, que comprometeu significativamente a qualidade de seu funcionamento. Comprovando assim, a importância da tomografia computadorizada na análise de qualidade dos isoladores poliméricos, após a sua fabricação, e dispensando os custos com os ensaios posteriores.

Como foi comentado em [3], os valores dos coeficientes de atenuação linear e de massa obtidos nos granitos sintéticos são referentes ao conjunto do granito natural com três tamanhos e quantidades diferentes de britas e com o ar, e não o valor característico do

granito natural puro. Por isso, os valores encontrados nas imagens tomográficas são diferentes dos valores da tabela 6.10, e sobre a sua mistura pode-se considerar praticamente homogênea, porque se observa uma distribuição do granito natural ao longo dos isoladores de granito sintético do tipo Pino.

Logo, os estudos sobre os isoladores elétricos para ambiente externo, além de dar continuidade à linha de pesquisa de desenvolvimento de isoladores poliméricos com tecnologia e matéria-prima nacionais, também proporcionou o desenvolvimento de isoladores poliméricos do tipo Pino como alternativa de aplicação para o sistema elétrico de potência.

Portanto, diante dos resultados obtidos (e resumidos nas tabelas 5.6 e 6.11), verificou-se que os isoladores poliméricos fabricados com resina pura RI 1 e com o granito sintético GSRI 1, apresentam condições técnicas viáveis e que merecem ser melhor explorados em trabalhos futuros. Porém, em relação ao custo estimado dos isoladores acima (e apresentados na tabela 3.1), conclui-se que os isoladores fabricados com o granito sintético GSRI 1 apresentam possibilidades de custos competitivos em relação aos isoladores tradicionais de porcelana.

7.2 Sugestões de trabalhos futuros.

Conforme descrito no capítulo 1, a área de pesquisa sobre isoladores elétricos para ambientes externos é muito extensa, e por isso exige muitos trabalhos posteriores a este. No momento, sugere-se para trabalhos futuros, novos estudos para determinação de outras características físicas e químicas dos isoladores poliméricos de granito sintético do tipo Pino.

Outros ensaios seriam importantes para a análise completa de desempenho dos isoladores, como: ensaio termo-mecânico; ensaio de rádio-interferência; ensaio de tensão suportável nominal em frequência industrial, sob chuva; ensaio de tensão suportável nominal de impulso atmosférico, sob chuva; ensaio de poluição artificial; e ensaio para determinação da propriedade de hidrofobicidade.

E, por último, sugerem-se também novas simulações computacionais para o desenvolvimento de novos modelos de isoladores com diferentes geometrias para a verificação de suas viabilidades técnicas e econômicas, utilizando-se o Método de Elementos Finitos.

Referências bibliográficas.

- 1 **FROST, N. E. AND KRENCESKI, M.**, 2002. *Hydrophobicity Recovery in Silicone Insulators: A Closer Look at Testing*. Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. April 7-10, p. 220-223, Boston, MA, USA.
- 2 **GOUDIE, J.L.**, 2002. *Silicones for Outdoor Insulator Maintenance*. Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. April 7-10, p. 256-259, Boston, MA, USA.
- 3 **MURAKAMI, C. R.**, 2002. *Aplicações das Resinas Poliuretanas derivadas de Óleo de Mamona, como Materiais Isolantes Elétricos*. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia Elétrica de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- 4 **ALTAFIM, R.A.C.; MURAKAMI, C.R.; HERRMANN JR., P.S.P.; NAIME, J.M.; CRUVINEL, P.E. e CARDOSO, L.P.**, 2001. *Uma nova metodologia para análise dos materiais dielétricos usados em isoladores poliméricos*. IX Encontro Regional Latino-Americano da CIGRÉ (ERLAC). Maio, Foz de Iguaçu, Paraná, Comitê de Estudos N° 15.
- 5 **FURTADO, T.A.; FERREIRA, S. E FILHO, N.S.**, 1998. *Desempenho de Isoladores de Linhas de Transmissão – Um Panorama Brasileiro*. “International Workshop on Transmission Lines Insulators”. Rio de Janeiro, 4 de Maio, pág. 34-37, Rio de Janeiro.
- 6 **SANTOS, N.C.G.** (1993). *Isoladores poliméricos em 69 kV: combatendo o vandalismo na COELBA*. XII Seminário Nacional de produção e Transmissão de Energia Elétrica. Grupo III, Linhas de Transmissão. Recife.
- 7 **LOOMS, L.S.T.** (1990). *Insulators for High Voltages*. Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.

- 8 **MURAMOTO, C.M.; MELLO, D.R. E YOKOTA, H. (1997).** *Avaliação do desempenho de isoladores para sistemas de distribuição de energia.* Seminário Nacional de Qualificação de Materiais e Equipamentos Do Setor de Energia Elétrica (SQME), Rio de Janeiro.
- 9 **ZIXIA, C.; XINDONG, L.; YONGYONG, W.; XUN, W.; YUANXIANG, Z. AND ZHI, L. 2002.** *Investigation on Composite Insulators in Contaminated Aereas.* 2002 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.
- 10 **HALL, J.F., 1993.** *History and Bibliography of Polymeric Insulator.* IEEE Transactions PD, Vol. 8, pp. 376-385.
- 11 **ZHAO, T. AND BERNSTORF, 1998.** *Aging Tests of Polymeric Housing Materials for Non-Ceramic Insulators.* IEEE Electrical Insulations Magazine, Vol. 14, Nº 2, pp. 26-33.
- 12 **INSULATORS NEWS AND MARKET REPORT. ESB Moves Towards Greater Use of Composite Insulators on Distribution Networks, 1997.,** Vol. 5, Nº 1, pp. 8-12.
- 13 **KIM, S.H., CHERNEY E.A., HACHAM, R. AND RUTHERFORD, K.G., 1994.** *Chemical Changes at the Surface of RTV Silicone Rubber Coatings on Insulators During Dry Band Arcing.* IEEE Transactions DEI, Vol. 1, pp. 106-123.
- 14 **GORUR, R.S.; CHERNEY, E.A., HACKAM, R. AND ORBECK, T., 1988.** *The Electrical Performance of Polymeric Insulating Materials Under Accelerated Aging in Fog Chamber.* IEEE Transactions PD, Vol. 3, pp. 1157-1164.
- 15 **KINDERSBERG, J.; SCUTZ, A.; KARNER H.C. AND HUIR, R.V.D., 1996.** *Service Performance, Material Design and Applications of Composite Insulators With Silicone Rubber Housings.* CIGRE 33-303, pp.1-5.
- 16 **KIM, S.H., CHERNEY E.A. AND HACHAM, R., 1992.** *Effects of Filler Level in RTV Silicone Rubber Coatings used in HV Insulators.* IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. 27, Nº 6, pp. 1065-1072.

- 17 **FUENTES, B. AND ORBECK, T., 1982.** *Evaluation of Silicone Elastomers for Outdoor HV Insulators.* Mexican 82, X Conferencia Internacional sobre Investigación, Desarrollo Y Aplicación en Ingeniería Eléctrica, Electrónica Y Comunicaciones, IEEE Mexico, October.
- 18 **CHERNEY, E.A.; HACKAN, R. AND KIM, S.H., 1991.** *Porcelain Insulator Maintenance with RTV Silicone Rubber Coatings.* IEEE Transactions PD, Vol. 6, pp.1177-1181.
- 19 **KIM, S.H., CHERNEY E.A., AND HACHAM, R., 1991.** *Suppression Mechanism of Leakage Current on RTV Coated Porcelain and Silicone Rubber Insulators.* IEEE Transactions PD, Vol. 6, pp. 1549-1556.
- 20 **EMPRESA ELECTROVIDRO, 2000.** Relatório interno: Tecnologia Sediver na fabricação de isoladores poliméricos. Rio de Janeiro, RJ.
- 21 **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1985).** *NBR 6936 – Técnicas de ensaios elétricos em Alta Tensão.* Rio de Janeiro, ABNT.
- 22 **INTERNATIONAL STANDARD, 1992.** “*IEC 1109 - Composite insulators for a.c. overhead lines with a nominal voltage greater than 1000 V – Definitions, test methods and acceptance criteria*”. Geneva, Switzerland.
- 23 **CRUVINEL, P.E.; CESAREO, R.; CRESTANA, S. e MASCARENHAS, S. (1990).** *X-ray and gama-ray computerized minitomograph scanner for soil science.* IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements, New York, October, v.39, n.5, p. 745-750, USA.
- 24 **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1998).** *NBR 7110 – Isolador de Pino de Porcelana ou Vidro – Padronização de dimensões e características.* Rio de Janeiro, ABNT.
- 25 **PLANILHA PARA ORÇAMENTO, (1999).** *SAP – Contrato 1999.* Companhia Paulista de Força e Luz. São Carlos – SP.

-
- 26 **RELATÓRIO 4, PROJETO GETÚLIO VARGAS** – Ensaios de acompanhamento de desempenho do material polimérico amostrado após envelhecimento acelerado por intemperismo artificial, Curitiba 1998.
- 27 **ALVARENGA, L.M. ;PINTO JUNIOR, A . V. ; SOUZA, F.Z. ; BANDIN,C.J., 2001**
Considerações sobre o uso de redes de distribuição de energia elétrica como meio de propagação de sinais de comunicação. XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas – S.Paulo – Brasil.

ANEXOS

ANEXO A:

Esquema de confecção da matriz do isolador do tipo Pino.

É importante ressaltar que, para a confecção de uma matriz de moldagem de isoladores poliméricos, deve-se analisar o tipo de material (principalmente a sua densidade) e o tipo de processo em que serão submetidos a matriz. Para isso, foi realizado um estudo sobre as etapas de execução, levando em consideração esses fatores e também, tendo como preocupação principal, a construção adequada dos canais para a saída de ar e para a entrada dos materiais. Logo, optou-se pelo sentido horizontal do isolador, onde se encontram localizados os pontos críticos da matriz, que poderiam provocar bolhas de ar nos isoladores moldados.

As etapas para a construção da matriz de moldagem dos isoladores de granito sintético, com o elastômero de silicone são apresentadas através das figuras demonstradas a seguir.

a) **Etapa 1:** preencher a parte inferior com borracha de silicone vermelho.

Figura 1: Primeira etapa para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.

- b) **Etapa 2:** preencher a parte superior com borracha de silicone branco e colocar os suportes de entrada de materiais e saídas de ar.

- Isolador de referência
- Caixa de material de náilon
- Borracha de silicone vermelho (BSV)
- Borracha de silicone branco (BSB)
- Suporte para confecção das entradas de materiais
- Suporte para confecção das saídas de ar

Figura 2: Segunda etapa para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.

- c) **Etapa 3:** fazer uma segunda parte inferior, com borracha de silicone branco, virando o lado com as entradas de materiais para baixo.

- Isolador de referência
- Caixa de material de náilon
- Borracha de silicone branco (BSB)
- Espaço vazio

Figura 3: Terceira etapa para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.

- d) **Etapa 4:** voltar as entradas de ar para a posição correta.

- Caixa de material de náilon
- Borracha de silicone branco (BSB)
- Espaço vazio

Figura 4: Quarta etapa para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.

- e) **Etapa 5:** guardar esta parte inferior do molde feito com a borracha de silicone vermelha, como matriz principal, para construção de outros moldes futuros.

Figura 5: Quinta etapa para a confecção da matriz do isolador do tipo Pino.

Conforme descreve a quinta etapa de confecção da matriz de moldagem dos isoladores de granito sintético, essa matriz principal de elastômero de silicone vermelho, mais resistente que o transparente, será guardada para a fabricação de novas matrizes que se fizerem necessárias, em função da vida útil limitada dos elastômeros de silicones.

Anexo B:

Instrumentos utilizados.

A utilização dos equipamentos nos ensaios realizados exigiu o estudo dos seus manuais de instrução, para o seu manuseio correto.

Os instrumentos utilizados neste trabalho de pesquisa encontram-se listados a seguir.

1) Medidor de tensão de ruptura dos isoladores:

Kit para ensaios de alta tensão da marca *HAEFELY-TRENCH* composto por:

a) Transformador TEO 100/10 :

- Razão: 2x220 V / 100 kV / 220 V
- Razão da corrente contínua: 2 x 17 A / 75 mA / 23 A
- Saída: 7,5 kVA, contínuo.
10 kVA por 1 hora
- Impedância : 5 %
- Frequência : 50 – 60 Hz

b) Mesa de controle, composta por:

- Transformador regulável STL 5: 230 V / 43 A, 5 kVA-cont. e 10 kVA por 2 minutos.
- Unidade de Controle OT 275: inclui as funções de operação do sistema de HV. Possui um plug adicional para controlar o *gap* entre as esferas para a geração do impulso.

c) Instrumento de Medição DMI 551, com:

- 3 canais, processador: 386 SX - 25 MHz;
- tensão de entrada: 115-230 V (automático);
- valor medido (em kV): AC – pico/ $\sqrt{2}$ ou RMS, DC – valor médio/fator *ripple* e Impulso: valor de pico

2) Relógio comparador .

Marca: *Mitutoyo*, nº 2046-08.

Shock proof: 0,01 a 10 mm;

3) Medidor de temperatura e umidade relativa do ar.

Marca: Templec Ltda;

4) Estufa.

Marca: Quimis Aparelhos Científicos Ltda.

Modelo: B242;

Número de série: 902342; e

Temperatura: até 200 °C.

5) Máquina Universal de Ensaios Mecânicos.

Marca: Instron Corporation

Modelo: 5500 R, número de série: 7010.

Software Merlin

6) Prensa hidráulica.

Marca: Schultz

Modelo: PHS 15 t.

7) Máquina de envelhecimento acelerado: Weather Ometer.

Marca: Atlas Electric Devices Company

Modelo: Weather-Ometer

Anexo C:

Imagens tomográficas dos isoladores elétricos do tipo Pino.

As imagens tomográficas e os seus histogramas obtidos nas análises dos isoladores elétricos do tipo Pino são apresentados a seguir.

1- Isolador de Pino de Porcelana.

a) Isolador de Pino de Porcelana: seção 1.

Figura 1: Seção 1 do isolador de Porcelana: (a) imagem tomográfica; (b) escala da imagem em cm^{-1} e (c) histograma da tomografia.

b) Isolador de Pino de Porcelana: seção 2.

Figura 2: Seção 2 do isolador de Porcelana: (a) imagem tomográfica; (b) escala da imagem em cm^{-1} e (c) histograma da tomografia.

2- Isolador de Pino RI 1.**a) Isolador de Pino RI 1: seção 1.**

Figura 3: Seção 1 do isolador RI 1: (a) imagem tomográfica; (b) escala da imagem em cm^{-1} e (c) histograma da tomografia.

b) Isolador de Pino RI 1: seção 2.

Figura 4: Seção 2 do isolador RI 1: (a) imagem tomográfica; (b) escala da imagem em cm^{-1} e (c) histograma da tomografia.

3- Isolador de Pino RI 2.**a) Isolador de Pino RI 2: seção 1.**

Figura 5: Seção 1 do isolador RI 1: (a) imagem tomográfica; (b) escala da imagem em cm^{-1} e (c) histograma da tomografia.

b) Isolador de Pino RI 2: seção 2.

Figura 6: Seção 2 do isolador RI 2: (a) imagem tomográfica; (b) escala da imagem em cm^{-1} e (c) histograma da tomografia.

4- Isolador de Pino de Granito Sintético GSRI 1.

a) Isolador de Pino GSRI 1: seção 1.

Figura 7: Seção 1 do isolador GSRI 1: (a) imagem tomográfica; (b) escala da imagem em cm^{-1} e (c) histograma da tomografia.

b) Isolador de Pino GSRI 1: seção 2.

Figura 8: Seção 2 do isolador GSRI 1: (a) imagem tomográfica; (b) escala da imagem em cm^{-1} e (c) histograma da tomografia.

5- Isolador de Pino de Granito Sintético GSRI 2.**a) Isolador de Pino GSRI 2: seção 1.**

Figura 9: Seção 1 do isolador GSRI 2: (a) imagem tomográfica; (b) escala da imagem em cm^{-1} e (c) histograma da tomografia.

6- Isolador de Pino de Granito Sintético GSRI 1 com ruptura dielétrica.**a) Isolador de Pino GSRI 1 com ruptura dielétrica: seção 1.**

Figura 10: Seção 1 do isolador GSRI 1 com ruptura dielétrica: (a) imagem tomográfica; (b) escala da imagem em cm^{-1} e (c) histograma da tomografia.

b) Isolador de Pino GSRI 1 com ruptura dielétrica: seção 2.

Figura 11: Seção 2 do isolador GSRI 1 com ruptura dielétrica: (a) imagem tomográfica; (b) escala da imagem em cm^{-1} e (c) histograma da tomografia.

Apêndice A:

Resumo das normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 5032 (NOV./1.984), NBR 5049 (JAN./1.985) e NBR 7110 (SET 1998).

1. Introdução .

Para a determinação das características elétricas, mecânicas e térmicas de um isolador do tipo Pino, foram estudadas e analisadas as seguintes normas técnicas da ABNT:

1. NBR 5049 (Jan./1.985): Isoladores de porcelana ou vidro para linhas aéreas e subestações de alta-tensão – Método de ensaio;
2. NBR 5032 (Nov./1.984): Isoladores de porcelana ou vidro, para linhas aéreas e subestações de alta tensão – Especificação; e
3. NBR 7110 (Set./1998): Isolador de pino de porcelana ou vidro – Padronização de dimensões e características.

Neste resumo foram abordados os seguintes tópicos:

- montagem dos isoladores;
- ensaio de rotina;
- ensaios elétricos de tipo;
- ensaio elétrico de recebimento;
- ensaios mecânicos de recebimento;
- ensaios térmicos de recebimento;
- aceitação e rejeição dos isoladores; e
- padronização do isolador do tipo Pino.

Estas normas foram apresentadas resumidamente nas tabelas A1 e A2, de modo à visualizar e comparar os métodos de ensaios, em relação às características a determinar.

Tabela A1: Montagem, ensaios de rotina, ensaios elétricos de tipo e de recebimento, e ensaios mecânicos de recebimento.

Descrição	Procedimentos – NBR 5032/ 84, NBR 5049/ 85 e NBR 7110/ 98
Montagem do isolador	O isolador deve ser montado sobre um pino aterrado, verticalmente, de modo que fique instalado a pelo menos 1 metro do chão. Amarrar ao pescoço do isolador um condutor horizontalmente, com diâmetro mínimo de 5 mm e comprimento 4 vezes a altura do isolador mais um diâmetro da saia superior. A tensão deve ser aplicada entre o condutor e a terra.
Ensaio de rotina	<p>i) Inspeção visual Devem ser eliminados todos os isoladores que apresentam defeitos tais como: trincas, inclusões de materiais estranhos, rebarbas, dobras, lascas, bolhas e outros defeitos inaceitáveis.</p>
Ensaio elétrico (ensaio de tipo)	<p>i) Tensão suportável sob chuva em frequência nominal. - submeter o isolador a uma chuva artificial durante 15 minutos ininterruptos antes da realização do ensaio. A chuva artificial tem que seguir as características definidas que se encontram no Apêndice A; - a máxima tensão inicial aplicada deve ser igual à metade da tensão calculada e, a partir desse valor, a tensão deve ser elevada até atingir o valor determinado em tempo não inferior a 10 segundos. A tensão deve ser mantida durante 10 segundos. Não devem ocorrer descargas durante a realização do ensaio.</p> <p>ii) Tensão suportável nominal de impulso atmosférico Com um gerador de impulso regulado para produzir uma onda positiva ou negativa de $(1,2/50)$ μs, escolher a de polaridade mais baixa e aplicar 15 impulsos como segue: a) a tensão a aplicar é a tensão nominal corrigida para as condições atmosféricas locais, conforme Apêndice A; b) durante a aplicação dos 15 impulsos podem ocorrer até duas descargas. Caso ocorram mais de duas descargas, pode-se, mediante acordo, realizar o ensaio determinando a tensão U_k, próxima do valor suposto de descarga a 50 % (U_{50}) da tensão suportável (U_s), seguindo as recomendações e os cálculos de U_{50} e posteriormente, $U_s = 0,961 \cdot U_{50}$, que se encontram no Apêndice A. c) Os valores de U_{sn} ou de U_s não devem ser inferiores ao valor nominal, corrigido para as condições atmosféricas locais, e o valor médio calculado deve ser igual ou superior a 92 % do valor nominal da tensão suportável.</p>
Ensaio elétrico (ensaio de recebimento)	<p>i) Tensão de perfuração - os isoladores depois de limpos e secos devem ser completamente imersos em um meio isolante adequado que evite descargas superficiais, e com cuidado para não entrar bolhas sob as suas saias. Eles devem estar instalados de preferência com as saias para cima. - o meio isolante deve estar em temperatura próxima daquela da temperatura do laboratório e possuir uma resistividade da ordem de $10^6 \Omega$. - a tensão deve ser aplicada entre as partes que normalmente devem suportar a tensão de operação, e elevada rapidamente. - o ensaio é considerado satisfatório quando se alcança a tensão nominal de perfuração sem que esta ocorra; entretanto, mediante acordo, pode-se elevar a tensão até que ocorra a perfuração, anotando-se este valor.</p>

Tabela A2: Ensaios mecânicos e térmicos de recebimento, aceitação e rejeição dos isoladores.

Descrição	Procedimentos – NBR 5032/ 84, NBR 5049/ 85 e NBR 7110/ 98
Ensaios mecânicos (ensaio de recebimento)	<p>i) Flexão e outros Os isoladores de suporte cilíndricos, pedestal e de pino devem ser submetidos ao ensaio mecânico de flexão. Mediante acordo, podem ser realizados, quando aplicáveis, alternativamente, os ensaios de tração, torção e compressão. Os isoladores devem ser instalados no equipamento de ensaios mecânicos com os dispositivos adequados para o tipo de esforço a ser aplicado. O esforço mecânico deve ser aplicado de forma gradual, sem choques, com um incremento tal que, a partir de 35 % do valor nominal de ruptura, se alcance a carga final em aproximadamente 1 minuto.</p>
Ensaios térmicos (ensaio de recebimento)	<p>i) Aquecimento e resfriamento a) Isoladores das classes M e N com dielétrico de porcelana ou vidro temperado: Os isoladores com suas eventuais ferragens integrantes devem ser rápida e totalmente imersos em um tanque de água quente mantida à temperatura de 70 °C acima daquela do tanque de água fria utilizado no semiciclo seguinte deste ensaio. Os isoladores devem permanecer imersos em cada um desses tanques por um tempo T:- isolador classe N (ver definição no Apêndice), T = 15 minutos. Após completar o tempo de imersão em água quente, os isoladores devem ser passados rapidamente para a água fria, onde devem permanecer pelo mesmo tempo. Esse ciclo de aquecimento e resfriamento deve ser repetido três vezes em sucessão. O tempo de transferência de um tanque para o outro não deve exceder de 30 segundos.” b) Para casos de isoladores de vidro recozido e vidro temperado são apresentados métodos alternativos como: - isoladores de vidro recozido, para cadeia classe M ou N ou rígidos: imergir o isolador em um tanque de água quente, mantida à temperatura t °C, estabelecida entre o fabricante e o comprador, e acima daquela da água fria da chuva artificial a ser utilizada no semiciclo seguinte. Os isoladores devem permanecer no banho quente durante 15 minutos, devendo, após esse período, ser retirados e rapidamente expostos durante 15 minutos a uma chuva artificial com precipitação de 3 mm/min. Este ciclo aquecimento e resfriamento deve ser repetido por três vezes em sucessão, e o tempo de transferência de um semiciclo para o outro não deve exceder de 30 segundos; ou - isoladores de disco, para cadeias ou rígidos de vidro temperado: imergir os isoladores à temperatura inferior a 50 °C, depois de serem aquecidos por meio de ar quente ou de outra maneira adequada, a uma temperatura não inferior a 100 °C acima daquela da água. Os isoladores devem permanecer durante 2 minutos, pelo menos, na água e devem resistir ao choque térmico sem quebrar.</p>
Aceitação e rejeição	<p>i) Ensaio de tipo: Se um único isolador falhar em qualquer dos ensaios, o projeto será considerado em desacordo com esta Norma. ii) Ensaio de recebimento: - Na primeira inspeção, se apenas um isolador falhar em qualquer dos ensaios, o ensaio deve ser repetido em duas amostras. Se houver nova falha, todo o lote será rejeitado; - e se dois ou mais isoladores falharem, o lote será rejeitado.- A segunda inspeção é realizada mediante acordo com o fabricante; - o número de unidades requeridas deve ser o dobro da primeira inspeção; - devem ser executados todos os ensaios de recebimento conforme a norma; - e se um único isolador falhar em qualquer dos ensaios, o lote será rejeitado.</p>
Padronização do isolador Pino	P2-95-1: Refere-se a um isolador do tipo Pino (P), cabeça do tipo 2 (com diâmetro da parte superior igual a 80 mm), tensão suportável nominal de impulso atmosférico a seco igual a 95. Outras características encontram-se no item 2 a seguir

2. Outras características importantes.

2.1 Características específicas da chuva artificial.

A chuva artificial deve ter as seguintes características:

- a) médias de todas as leituras de precipitação,
 - componentes vertical e horizontal: 1,0 mm/min a 1,5 mm/min;
- b) limites para qualquer leitura individual e por cada componente,
 - 0,5 mm/min a 2,0 mm/min;
- c) temperatura da água: temperatura ambiente + 15 °C;
- d) resistividade da água: $(100 \pm 15) \Omega\text{m}$.

2.2 Condições atmosféricas normalizadas.

As condições atmosféricas normalizadas são:

- Temperatura $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Pressão atmosférica $b_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 = 101,3 \text{ kPa}$
- Umidade $h_0 = 11 \text{ g/m}^3 = 63 \% \text{ a } 20 \text{ }^\circ\text{C}$

2.3 Correção das condições atmosféricas.

As correções das condições atmosféricas segue as seguintes equações:

$$d = 0,386 \cdot [H / (273 + t)] \cdot 133,322 \quad (1)$$

Sendo: d = efeito da densidade do ar;

H = pressão atmosférica, em Pa; e

t = temperatura, em °C;

2.4 Aplicação das correções.

O fator de correção do efeito da umidade do ar (K), é determinado através das curvas apresentadas na figura 1 a seguir.

Figura 1: Influência da umidade do ar. (a) relação entre umidade relativa e absoluta do ar; e (b) fator de correção K em função da umidade absoluta.

Essas aplicações são:

- para converter as tensões lidas no equipamento de ensaio às condições normalizadas, deve-se multiplicar por $1/d$ ou K/d sem ou com correção para a umidade, respectivamente;
- para converter as tensões nominais aos valores a serem aplicados nos ensaios de tensão suportável ou de descarga externa, deve-se multiplicar as tensões nominais por d/K ou por d para correções considerando ou não a umidade, respectivamente.

2.5 Definições segundo a Norma Técnica NBR 5042/84.

As definições segundo a Norma Técnica NBR 5042/84 são descritas a seguir:

- *valor Nominal*: valor fixado pelo fabricante para uma determinada característica de um isolador;
- *característica nominal*: conjunto de valores nominais de um isolador e que condicionam o seu campo de aplicação;
- *distância de descarga a seco*: distância em milímetros indicada na letra A da figura 2;
- *distância de descarga sob chuva*: distância em milímetros indicada na letra B da figura 2;
- *distância de escoamento*: distância em milímetros indicada na letra C da figura 2;
- *distância de perfuração*: comprimento do caminho percorrido pela descarga através do dielétrico;
- *isolador classe N (Normal)*: isolador cuja distância de perfuração é inferior ou igual a metade da distância de descarga a seco;
- *isolador classe M (Maciço)*: isolador cuja distância de perfuração é maior do que a metade da distância de descarga a seco; e

- *isolador rígido*: isolador cujos vínculos para montagem não permitem articulação.

A = distância de descarga a seco;

B = distância de descarga sob chuva; e

C = distância de escoamento

Figura 2: Distâncias características do isolador. (a) distância de descarga; e (b) distância de escoamento.