Campus de São Carlos

**APLICAÇÕES DAS RESINAS POLIURETANAS
DERIVADAS DO ÓLEO DE MAMONA, COMO
MATERIAIS ISOLANTES ELÉTRICOS**

Autora: Cacilda Ribeiro Murakami

Orientador: Prof. Dr. 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

**APLICAÇÕES DAS RESINAS POLIURETANAS
DERIVADAS DO ÓLEO DE MAMONA, COMO
MATERIAIS ISOLANTES ELÉTRICOS.**

Cacilda Ribeiro Murakami

Tese apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Doutora em Engenharia Elétrica

ORIENTADOR: Prof. Tit. Ruy Alberto Corrêa Altafim

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLAR REVISADO
Data de entrada no Serviço: 20.10.91.02
Ass.:

São Carlos,
2002

DEDALUS - Acervo - EESC

31100037070

Class. TEA-EESC ✓
Cott. 3778
Tombo T0218/02
Sysno 1262051

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

M972a Murakami, Cacilda Ribeiro
Aplicações das resinas poliuretanas derivadas do
óleo de mamona, como materiais isolantes elétricos /
Cacilda Ribeiro Murakami. -- São Carlos, 2002.

Tese (Doutorado) -- Escola de Engenharia de São
Carlos-Universidade de São Paulo, 2002.
Área: Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Ruy Alberto Corrêa Altafim.

1. Isoladores poliméricos. 2. Resinas poliuretanas.
3. Óleo de mamona. 4. Materiais isolantes.
5. Isoladores elétricos. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Engenheira **CACILDA RIBEIRO MURAKAMI**

Tese defendida e julgada em 14-08-2002 perante a Comissão Julgadora:

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

Aprovada

Prof. Dr. **HEITOR CURY BASSO**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovada

Prof. Assoc. **GILBERTO ORIVALDO CHIERICE**
(Instituto de Química de São Carlos/USP)

Aprovada

Prof. Assoc. **JORGE MIECZYSŁAW JANISZEWSKI**
(Escola Politécnica/USP)

Aprovada

Prof. Dr. **JOSE AUGUSTO MARCONDES AGNELLI**
(Universidade Federal de São Carlos/UFSCar)

Aprovada

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

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

*Ao Jorge, ao Ricardo e aos meus pais, Elza e Laerte,
pela compreensão, carinho e
estímulo na convivência diária.*

Agradecimentos

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

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.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (*IPT*), ao Instituto de Eletrotécnica de Energia (*IEE*) – USP e ao Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (*CEPEL*), pela colaboração nesta pesquisa.

Às empresas Mineração Jundu Ltda., Brasil Minas Indústria & Comércio Ltda. e Columbian Chemical Co., nos fornecimentos de produtos.

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.

Ao Professor Doutor Custódio João Pais Dias da Faculdade de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores da Universidade do Porto, de Portugal, pela ótima orientação durante o estágio no exterior.

Ao Professor Deusdedit Ferreira de Menezes pela revisão de português deste texto.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (*FAPESP*), pelo apoio financeiro.

Ao Grupo de Alta Tensão e Medidas (*GATM*), aos professores e aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da EESC/USP, em particular ao técnico Rui Bertho pelos auxílios prestados.

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

*"A marcha da ciência é como a nossa planície do deserto:
o horizonte foge sempre."*

Graça Aranha.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	x
RESUMO.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
CAPÍTULO 1: Introdução	01
CAPÍTULO 2: Análise Bibliográfica.....	04
2.1 Introdução.	04
2.2 Isoladores elétricos e seus principais problemas em distribuição de energia.....	04
2.2.1 Geral.....	04
2.2.2 Interrupções não programadas no sistema elétrica de energia.....	05
2.3 Isoladores poliméricos.	07
2.3.1 Uma breve história dos isoladores poliméricos e suas vantagens em relação aos tradicionais.	07
2.3.2 Mercado dos isoladores poliméricos e sua matéria prima.	08
2.4 Óleo de mamona e as resinas poliuretanas.....	10
2.4.1 Histórico sobre mamona.....	10
2.4.2 Óleo de Mamona.....	10
2.4.3 Aspecto agrícola e o mercado nacional.....	12
2.4.4 Mercado mundial.....	12
2.4.5 Resina poliuretana derivada do óleo de mamona.....	15
2.4.5.1 Introdução.....	15
2.4.5.2 Classificação das resinas em estudo.....	16
2.5 Cargas adicionadas nas resinas e granito sintético..	18
2.5.1 Incorporação de cargas.....	18
2.5.2 Granito sintético.....	19
2.5.2.1 Britagem e classificação do granito sintético.....	19
2.5.2.2 Otimização do empacotamento das britas..	21

2.5.2.3 Cálculo da quantidade de brita e resina.....	21
2.5.2.4 Adequação do processo de moldagem.....	22
CAPÍTULO 3: Caracterização das resinas poliuretanas e seus compósitos derivadas do óleo de mamona.	23
3.1 Introdução..	23
3.2 Ensaio elétrico nas resinas..	23
3.2.1 Procedimentos dos ensaios elétricos nas resinas e nos seus compósitos...	23
3.2.2 Resultados dos ensaios elétricos nas resinas e compósitos.....	26
3.3 Ensaio mecânico.....	30
3.3.1 Procedimentos dos ensaios mecânicos realizados nas resinas e nos compósitos.....	30
3.3.2 Resultados dos ensaios mecânicos realizados nas resinas e nos compósitos.....	31
3.3.2.1 Resultados dos ensaios mecânicos das resinas com cargas C1 e C2 nas proporções de 10:2:0,2 e 10:2, respectivamente..	32
3.3.2.2 Resultado do ensaio mecânico de dureza da resina RI 1 com mica nas proporções de 10:1, 10:2, 10:3 e 10:4..	37
3.3.2.3 Resultado da carga de compressão nos granitos sintéticos.....	37
3.4 Ensaio térmico nas resinas e nos compostos..	39
3.4.1 Procedimentos dos ensaios térmicos nas resinas e compostos.	39
3.4.2 Resultados dos ensaios térmicos nas resinas e nos seus compósitos..	40
3.4.2.1 Resultados dos ensaios térmicos das resinas com negro de fumo e sílica.....	41
3.4.2.2 Resultados dos ensaios térmicos das resinas com mica.....	42
3.5 Conclusões..	46
CAPÍTULO 4: Fabricação dos isoladores de resina e de granito sintético.	49
4.1 Introdução.	49
4.2 Processo de confecção da matriz do isolador polimérico.....	49
4.3 Processo de fabricação dos isoladores de resina e de compósito.....	53
4.4 Processo de fabricação do isolador de granito sintético.....	59
4.5 Materiais utilizados na fabricação dos isoladores.....	65
4.5.1 Quantidades dos componentes utilizados na fabricação dos isoladores....	65
4.5.2 Preços estimados das resinas utilizadas na fabricação dos isoladores..	66

CAPÍTULO 5: Caracterização dos isoladores poliméricos face às condições de serviço.....	68
5.1 Introdução.	68
5.2 Ensaio de envelhecimento acelerado nos isoladores poliméricos.....	68
5.2.1 Procedimentos do ensaio de envelhecimento acelerado.....	68
5.2.2 Resultados do ensaio de envelhecimentos acelerado..	69
5.3 Ensaio Elétrico nos isoladores poliméricos.	72
5.3.1 Simulação computacional dos isoladores..	72
5.3.2 Procedimentos do ensaio elétrico.....	73
5.3.3 Resultados dos ensaios elétricos nos isoladores antes e depois do envelhecimentos acelerado.....	75
5.4 Ensaos mecânicos nos isoladores poliméricos.	78
5.4.1 Procedimentos do ensaios mecânicos..	78
5.4.2 Resultados dos ensaios mecânicos.	80
5.4.2.1 Comportamento dos isoladores sob carga de flexão.	80
5.4.2.2 Comportamento dos isoladores sob carga de compressão.....	86
5.5 Conclusão.....	93
CAPÍTULO 6: Uma nova metodologia para a análise do desempenho e da qualidade dos isoladores poliméricos.....	94
6.1 Introdução..	94
6.2 Técnica de Microscopia de Força Atômica (MFA)..	95
6.3 Técnica de difração de raios-X.....	97
6.4 Técnica de tomografia computadorizada de raios- γ	99
6.4.1 Geral.....	99
6.4.2 Atenuação de raios gama.....	99
6.4.3. Condições de ensaios..	101
6.4.4 Métodos utilizados..	102
6.4.4.1 Determinar a densidade média (ou global) das resinas e dos compostos dos isoladores.....	102
6.4.4.2 Determinar os dados estatísticos das imagens tomográficas.	103
6.4.5 Resultados.	103
6.5 Conclusões e discussões.....	112
CAPÍTULO 7: Conclusões.....	114
7.1 Conclusões e discussões.....	114
7.2 Sugestões de trabalhos futuros..	117

ANEXO A.	118
ANEXO B.....	119
ANEXO C.....	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..	127
OBRAS CONSULTADAS.....	132
APÊNDICE A.....	137

Lista de figuras.

FIGURA 2.1: Isoladores elétricos: (a) de Pino, (b) de Suspensão, (c) Pedestal e (d) Roldana e Castanha.	05
FIGURA 2.2: Causa de desligamento sem causa aparente.	06
FIGURA 2.3: Causa de ruptura de isolador.	06
FIGURA 2.4: Exemplos de isoladores: (a) poliméricos, de epóxi; (b) compostos, demonstração do núcleo com material resistente; e (c) compostos, em condições de serviço.	09
FIGURA 2.5: Exemplos de preenchimento de um molde [16].	22
FIGURA 3.1: Esquema da montagem para a medição da rigidez dielétrica. Sendo: 1 - medidor de rigidez dielétrica (transformador regulável com indicador de corrente de fuga); 2 - eletrodo superior; 3 - eletrodo inferior; 4 - corpo de prova; 5 - cuba de vidro com óleo isolante de transformador.	24
FIGURA 3.2: Esquema da montagem para a medição de resistividade volumétrica e superficial. Onde: 1 - medidor de resistividade volumétrica e superficial (ponte de resistência alta); 2- eletrodo superior; 3 - eletrodo central; 4 - eletrodo de guarda; 5 - corpo de prova.	24
FIGURA 3.3: Fotografia do aparelho de medir resistividade volumétrica e superficial da marca HP, e os corpos de prova utilizados.	25
FIGURA 3.4: Esquema da montagem para a medição de tensão de impulso. Sendo: G.I - gerador de impulso; C1 e C2 - capacitores do divisor capacitivo; Osc. - osciloscópio; 1 - eletrodo superior; 2 - eletrodo inferior; 3 - corpo de prova e 4 - cuba de vidro com óleo.	26
FIGURA 3.5: Fotografia da evolução dos corpos de prova utilizados nos ensaios elétricos. Superfície ampliada.	26
FIGURA 3.6: Fotografia dos corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos das resinas. Da direita para a esquerda, respectivamente os de: tração, compressão, dureza e flexão. O de flexão é só ilustrativo, na verdade ele possui um comprimento maior do que o apresentado.	31

FIGURA 3.7: Fotografias dos corpos de prova, durante os ensaios mecânicos: (a) de tração antes da aplicação da tensão, (b) de tração após a ruptura e (c) de compressão após a ruptura.	31
FIGURA 3.8: Variação da deformação nos corpos de prova das resinas com a tensão de compressão aplicada das resinas: (a) RI 1; (b) RI 1C1; (c) RI 2 e (d) RI2C1.	33
FIGURA 3.9: Variação da deformação nos corpos de prova das resinas com a tensão de compressão aplicada nas resinas: (a) RI 1, (b) RI 1C2 e (c) nas cinco amostras com mica.	33
FIGURA 3.10: Variação da deformação nos corpos de prova das resinas com a tensão de tração aplicada das resinas: (a) RI 1; (b) RI 1C1; (c) RI 2 e (d) RI2C1.....	34
FIGURA 3.11: Variação da deformação nos corpos de prova das resinas com a tensão de tração aplicada nas resinas: (a) RI 1, (b) RI 1C2 e (c) nas cinco amostras com mica.....	35
FIGURA 3.12: Variação da deformação nos corpos de prova das resinas com a tensão de flexão aplicada nas resinas: (a) RI 1C2 e (b) RI 1C2 das 5 amostras.....	36
FIGURA 3.13: Variação da dureza das resinas RI 1 e RI 1C2, com diferentes porcentagens de carga, em função dos 5 pontos diferentes das amostras.	37
FIGURA 3.14: Corpos de prova após o ensaio de compressão. Da esquerda para a direita, tem-se: granito sintético RI 1 e granito sintético RI2.	38
FIGURA 3.15: Ensaios de compressão do granito sintético GSRI 1 e GSRI 2.	39
FIGURA 3.16: Equipamentos utilizados nos ensaios térmicos. Da direita para esquerda: DMA (Análise Dinâmico Mecânica), TG (Análise Termogravimétrica), processador termoanalisador 2000 (microcomputador) e DSC (Calorimetria Diferencial de Varredura).	40
FIGURA 3.17: Variação da temperatura com os valores de tangente delta para determinação da temperatura de transição vítrea: (a) resina RI 1 e (b) resina RI 1C1. Instrumento DMA 983 da Du Pont Instruments, Modelo 98300.	41
FIGURA 3.18: Variação da temperatura com as porcentagens de massa para a determinação da temperatura de decomposição das resinas: (a) RI 1; (b) RI 1C1; (c) RI 2 e (d) RI2C1. Instrumento TA da <i>Du Pont Instruments</i>	42
FIGURA 3.19: Resultados da temperatura de transição vítrea da resina RI 1 nas seguintes proporções de mica: (a) 10:0; (b) 10:1; (c) 10:2; (d) 10:3; e (e) 10:4.....	43
FIGURA 3.20: Resultados da temperatura de decomposição da resina RI 1 com as diferentes proporções de mica: (a) 10:1; (b) 10:2; (c) 10:3; e (d) 10:4.....	44

FIGURA 3.21: Variação da temperatura de transição da resina RI 1 com as diferentes proporções de cargas acrescidas.	45
FIGURA 3.22: Curvas obtidas no ensaio de DMA da resina RI sem carga.	45
FIGURA 4.1: Primeira fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Suporte.	50
FIGURA 4.2: Segunda fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Suporte.	50
FIGURA 4.3: Terceira fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Suporte.	51
FIGURA 4.4: Quarta fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Suporte.	51
FIGURA 4.5: Quinta fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Suporte.	51
FIGURA 4.6: Sexta fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Suporte.	52
FIGURA 4.7: Sétima fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Suporte.	52
FIGURA 4.8: Oitava fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Suporte.	52
FIGURA 4.9: Matriz final dos isoladores do tipo Suporte: (a) partes individuais; e (b) montagem final.	53
FIGURA 4.10: Primeira fase para a confecção do isolador de resina.	54
FIGURA 4.11: Segunda fase para a confecção do isolador de resina: (a) passar a vaselina como desmoldante; e (b) posicionar os insertos de metal na matriz.	54
FIGURA 4.12: Terceira fase para a confecção do isolador de resina: (a) fita adesiva enrolada na matriz; e (b) matriz dentro da caixa de náilon.	54
FIGURA 4.13: Quarta fase para a confecção do isolador de resina.	55
FIGURA 4.14: Quinta fase para a confecção do isolador de resina: (a) acrescentar a carga; e (b) misturar.	55
FIGURA 4.15: Sexta fase para a confecção do isolador de resina.	55
FIGURA 4.16: Oitava fase para a confecção do isolador de resina: (a) composto; e (b) resina pura (sem carga).	56
FIGURA 4.17: Nona fase para a confecção de resina.	56
FIGURA 4.18: Décima fase para a confecção do isolador de resina: (a) desmontagem da caixa de náilon; (b) isolador com o acabamento final após a retirada das rebarbas.	57
FIGURA 4.19: Décima primeira fase para a confecção do isolador de resina.	57
FIGURA 4.21: Esquema resumido do processo de fabricação dos isoladores de resina pura e com carga.	58
FIGURA 4.21: Primeira fase para a confecção do isolador de granito sintético.	59
FIGURA 4.22: Segunda fase para a confecção do isolador de granito sintético: (a) passar a vaselina como desmoldante; e (b) posicionar os insertos de metal na matriz.	59

FIGURA 4.23: Terceira fase para a confecção do isolador de granito sintético: (a) fita adesiva enrolada na matriz; e (b) matriz dentro da caixa de náilon.....	60
FIGURA 4.24: Quarta fase para a confecção do isolador de granito sintético.	60
FIGURA 4.25: Quinta fase para a confecção do isolador de granito sintético: (a) acrescentar o granito natural; e (b) misturar.....	61
FIGURA 4.26: Sexta fase para a confecção do isolador de granito sintético.	61
FIGURA 4.27: Sétima fase para a confecção do isolador de granito sintético.	61
FIGURA 4.28: Nona fase para a confecção do isolador de granito sintético.....	62
FIGURA 4.29: Décima fase para a confecção do isolador de granito sintético.	62
FIGURA 4.30: Décima primeira fase para a confecção do isolador de granito sintético: (a) colocar uma tampa; e (b) inverter a posição da caixa de náilon.....	62
FIGURA 4.31: Décima segunda fase para a confecção do isolador de granito sintético.....	63
FIGURA 4.32: Décima terceira fase para a confecção do isolador de granito sintético: (a) desmontagem da caixa de náilon; (b) isolador com o acabamento final após a retirada das rebarbas.....	63
FIGURA 4.33: Esquema resumido do processo de fabricação dos isoladores de granito sintético.	64
FIGURA 5.1: Isolador Suporte RI 2: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; e (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.	69
FIGURA 5.2: Isolador Suporte RI 1: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.	70
FIGURA 5.3: Isolador Suporte RI 2 C1: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; e (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.	70
FIGURA 5.4: Isolador Suporte RI 1 C1: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; e (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.	70
FIGURA 5.5: Isolador Suporte RI 2C2: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; e (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.	71
FIGURA 5.6: Isolador Suporte RI 1C2: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; e (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.	71
FIGURA 5.7: Isolador Suporte GSRI 1: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; e (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.	71
FIGURA 5.8: Isolador Suporte GSRI 2: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; e (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.	72
FIGURA 5.9: Isolador Suporte Epóxi: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; e (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.	72

FIGURA 5.10: Análise de elementos finitos no isolador do tipo Suporte com ângulo de 90°, geometria planissimétrica em relação ao campo elétrico (V/m).	72
FIGURA 5.11: Defeito no dielétrico do isolador.....	73
FIGURA 5.12: Ensaio elétrico nos isoladores poliméricos: (a) dispositivo de cobre; (b) tensão aplicada.....	75
FIGURA 5.13: Resultados dos ensaios elétricos nos isoladores: (a) antes do ensaio de envelhecimento acelerado; e (b) depois do ensaio de envelhecimento acelerado.	77
FIGURA 5.14: Dispositivo utilizado no ensaio mecânico de flexão dos isoladores: (a) esquema inicial do dispositivo; e (b) fotografia do dispositivo utilizado.....	78
FIGURA 5.15: Insertos de metal: (a) do isolador de epóxi; e (b) do isolador em estudo; (c) na parte superior do isolador GSRI 1 e (d) na parte inferior do isolador GSRI1.	79
FIGURA 5.16: Ensaio mecânico de compressão nos isoladores poliméricos: (a) dispositivo utilizado; e (b) sistema de aquisição de dados.....	79
FIGURA 5.17: Ensaio de flexão mecânica nos isoladores produzidos com a resina RI 1: (a) RI 1, (b) RI 1C1; (c) RI 1C2; e (c) GSRI 1.....	81
FIGURA 5.18: Ensaio de flexão mecânica nos isoladores produzidos com a resina RI 2: (a) RI 2, (b) RI 2C1; (c) RI 2C2; e (c) GSRI 2.....	81
FIGURA 5.19: Ensaio de flexão mecânica no isolador comercial produzido com a resina epóxi.	82
FIGURA 5.20: Flexão mecânica nos isoladores poliméricos com insertos de metal produzidos com epóxi e com a resina RI 1, em relação à deformação específica do isolador no dispositivo montado para esse ensaio.	83
FIGURA 5.21: Flexão mecânica nos isoladores poliméricos com insertos de metal produzidos com epóxi e com a resina RI 1, em relação ao tempo.....	84
FIGURA 5.22: Flexão mecânica nos isoladores poliméricos com insertos de metal produzidos com epóxi e com a resina RI 2, em relação à deformação específica do isolador no dispositivo montado para o ensaio.....	84
FIGURA 5.23: Flexão mecânica nos isoladores poliméricos com insertos de metal produzidos com epóxi e com a resina RI 2, em relação ao tempo.....	85
FIGURA 5.24: Flexão mecânica nos isoladores poliméricos sem insertos de metal produzidos com a resina RI 2, em relação à deformação específica do isolador no dispositivo montado para o ensaio.....	85

FIGURA 5.25: Ensaio de compressão mecânica nos isoladores com insertos de metal: (a) RI 1; (b) RI 2; (c) GSRI 1; e (d) GSRI 2.	86
FIGURA 5.26: Ensaio de compressão no isoladores RI 1C2 sem insertos de metal: (a) isolador não envelhecido; (b) vista superior do isolador não envelhecido; (c) isolador envelhecido; e (d) vista lateral do isolador envelhecido.....	87
FIGURA 5.27: Compressão mecânica nos isoladores poliméricos: (a) RI 1 sem os insertos de metal em relação ao tempo; e (b) RI sem insertos e epóxi com insertos em relação à deformação específica do isolador.	88
FIGURA 5.28: Ensaio de compressão mecânica nos isoladores de resina RI 1 com inserto, em relação: (a) à deformação específica do ensaio; e (b) ao tempo.	89
FIGURA 5.29: Ensaio de compressão mecânica nos isoladores de resina RI 2, com insertos de metal, em relação: (a) à D.e. do ensaio; e (b) ao tempo.	90
FIGURA 5.30: Ensaio de compressão mecânica nos isoladores de granito sintético, com insertos de metal, em relação: (a) à D.e. do ensaio; e (b) ao tempo.	91
FIGURA 6.1: Análises das topografias através das imagens e rugosidades obtidas com MFA nos materiais: (a) RI 1, (b) RI 2, (c) RI 1C1 e (d) RI 2C1.	96
FIGURA 6.2: Grau de rugosidade das amostras: (a) RI 1C1; (b) RI 2C1; (c) RI 1C2, com diferentes proporções de mica e (d) RI 1, RI 1C1, RI 2 e RI 2C1.....	96
FIGURA 6.3: Difratogramas das resinas em estudo: (a) RI 1 e RI 1C1; (b) RI 1 (areia) e RI 2(areia) e (c) RI 1NF e RI 2NF; e (d) RI 1C2, com diferentes proporções de mica.	98
FIGURA 6.4: Transmissão por raios λ : (a) representação da aplicação e (b) curva exponencial, medida sob ótimas condições geométricas.	100
FIGURA 6.5: Atenuação de um feixe de fótons por uma amostra homogênea.	100
FIGURA 6.6: Tomografia computadorizada e seções analisadas: (a) minitomógrafo utilizado; e (b) seção 1 do isolador Suporte.	102
FIGURA 6.7: Isoladores RI 1 com bolhas de ar visíveis.....	102
FIGURA 6.8: Área escolhida no isolador RI 1: (a) seção 1 e (b) seção 2.	103
FIGURA 6.9: Seção 1 do isolador RI 1: (a) imagem tomográfica com escala em cm^{-1} ; e (c) histograma da tomografia.	104
FIGURA 6.10: Seção 1 do isolador GSRI 1: (a) imagem tomográfica com escala em cm^{-1} ; e (c) histograma da tomografia.....	105
FIGURA 6.11: Cargas utilizadas: (a) quantidades; (b) densidade; (b) coeficiente de atenuação de massa e coeficiente de atenuação linear calculado.	106

FIGURA 6.12: Características dos isoladores do tipo Suporte, seção 1: (a) massa e volume; (b) densidade; e (c) coeficientes μ e μ_M	108
FIGURA 6.13: Valores médios das análises entre as seções 1 e 2 dos isoladores: (a) dos coeficientes de atenuação; e (b) dos desvios padrão das medidas de coeficientes de atenuação.	109
FIGURA 6.14: Identificação dos valores de baixa densidade (valor baixo de μ) dos materiais e das bolhas de ar existentes: (a) Isolador RI 1- seção 1 e (b) Isolador RI 1 com defeito - seção 1.	110
FIGURA 6.15: Identificação dos valores de baixa densidade (valor baixo de μ) nos isoladores do tipo Suporte: (a) GSRI 1- seção 1; (b) de Epóxi – seção 1; (c) RI 1C1- seção 1; (d) RI 2C1 – seção 2; (e) RI 2 C2 – seção 2.	112

Lista de tabelas.

TABELA 2.1: Caracterização elétrica das resinas RI 1 e RI 2.	17
TABELA 2.2: Composição química média e propriedades do granito cinzento[16].	20
TABELA 3.1: Ensaio de resistividades da resina RI 1C1, comparados com os da RI 1.....	27
TABELA 3.2: Ensaio de resistividades da resina RI 2C1, comparados com os da RI 2.....	27
TABELA 3.3: Ensaio de rigidez dielétrica (R_d) da resina RI 1C1.....	28
TABELA 3.4: Ensaio de rigidez dielétrica (R_d) da resina RI 2C1.....	28
TABELA 3.5: Ensaio de tensão de impulso de descarga de ruptura e de tensão de impulso suportável da resina RI 1 (amostras de 2,0 mm de espessura).	28
TABELA 3.6: Ensaio de tensão de impulso de descarga de ruptura e de tensão de impulso suportável na resina RI 2 (amostras de 2,0 mm de espessura).	29
TABELA 3.7: Valores da tensão de impulso de descarga de ruptura da resina RI 1C1.....	29
TABELA 3.8: Valores da tensão de impulso de descarga de ruptura da resina RI 2C1.....	29
TABELA 3.9: Resultados dos ensaios de tensão de compressão de ruptura.	32
TABELA 3.10: Resultados dos ensaios de tensão de tração de ruptura.	34
TABELA 3.11: Resultados dos ensaios de tensão de flexão de ruptura.	35
TABELA 3.12: Resultados dos ensaios de dureza na escala Shore D.....	36
TABELA 3.13: Dureza mecânica das resinas RI 1e RI 1C2, com variação de proporções...37	
TABELA 3.14: Tensão de compressão no granito sintético GSRI 1.	38
TABELA 3.15: Ensaio de compressão no granito sintético GSRI 2.	39
TABELA 3.16: Ensaio térmico: temperatura de transição vítrea (T_g) e temperatura de decomposição (T_{id}).	41
TABELA 3.17: Temperaturas de transição (T_g) e de decomposição inicial (T_{id}) da resina RI 1 com diferentes proporções de mica.....	44
TABELA 3.18: Variação dos módulos E' e E'' da resina RI 1 com as diferentes proporções de mica.	46
TABELA 4.1: Quantidade dos componentes utilizados nos isoladores à base de resina RI1.	65
TABELA 4.2: Quantidade dos componentes utilizados nos isoladores à base de resina RI2.	65

TABELA 4.3: Quantidades das britas utilizadas nos granitos sintéticos	66
TABELA 4.4: Custo da principal matéria prima dos isoladores poliméricos.	66
TABELA 5.1: Tensão de ocorrência de <i>flashover</i> externo nos isoladores antes do ensaio de envelhecimento acelerado.	76
TABELA 5.2: Tensão de ocorrência de <i>flashover</i> externo nos isoladores depois do ensaio de envelhecimento acelerado.	76
TABELA 5.3: Resultado do ensaio de flexão nos isoladores poliméricos com insertos.	82
TABELA 5.4: Carga de flexão dos isoladores poliméricos com insertos.	83
TABELA 5.5: Ensaio de compressão nos isoladores com insertos de metal.	92
TABELA 5.6: Carga de compressão dos isoladores com insertos de metal.	92
TABELA 5.7: Carga de compressão dos isoladores com insertos de metal.	92
TABELA 6.1: Propriedades das cargas utilizadas.....	105
TABELA 6.2: Resultados dos isoladores, com as tomografias realizadas na seção 1.....	107
TABELA 6.3: Coeficiente linear da seção 1, dos isoladores do tipo Suporte.....	107

Lista de símbolos.

A249	- código do poliol utilizado na resina RI 1;
A253	- código do poliol utilizado na resina RI 2;
ABNT	- Associação Brasileira de Normas Técnicas;
ASTM	- <i>American Society for Testing and Materials</i> ;
B25015	- código do pré-polímero utilizado na resina RI 1;
B351	- código do pré-polímero utilizado na resina RI 2;
BS	- <i>British Standard</i> ;
D.e.	- Deformação específica do isolador no dispositivo de ensaio, mm;
D_{gn}	- densidade do granito natural, g/cm ³ ;
DIN	- <i>Deutsche Normen</i> ;
e	- função exponencial;
E'	- módulo de armazenamento, GPa;
E''	- módulo de perda, MPa;
EPDM	- <i>Ethylene Propylene Diene Monomer</i> ;
ε	- permissividade relativa ou constante dielétrica do meio;
κ	- interação da radiação com a matéria pelo efeito de pares, cm ⁻¹ ;
γ_v	- condutividade volumétrica, (Ω.cm) ⁻¹ ;
γ_s	- condutividade superficial, (Ω) ⁻¹ ;
GSRI 1	- código do granito sintético produzido com a resina RI 1;
GSRI 2	- código do granito sintético produzido com a resina RI 2;
I	- número de fótons transmitidos, sem o absorvedor;
I_o	- número de fótons transmitidos, com o absorvedor;
IQSC	- Instituto de Química de São Carlos;
MFA	- Microscopia de Força Atômica;
m_{gn}	- massa do granito sintético da mistura, g;
m_R	- massa da resina, g;
μ	- coeficiente de atenuação linear, cm ⁻¹ ;
μ_m	- coeficiente de atenuação de massa, cm ⁻² /g;
NBR	- Normas Brasileiras;
N_d	- número de detectores;

N	- número de translações do tomógrafo;
R_d	- rigidez dielétrica, kV/mm;
RI 1	- resina RI 1 pura (sem carga);
RI 2	- resina RI 2 pura (sem carga);
RI 1C1	- resina RI 1 com sílica e negro de fumo na proporção 10:2:0,2 ;
RI 2C1	- resina RI 2 com sílica e negro de fumo na proporção 10:2:0,2 ;
RI 1C2	- resina RI 1 com mica na proporção: 10:1; 10:2; 10:3 ou 10:4;
RI 1 (areia)	- resina RI 1 com sílica na proporção 10:2;
RI 2 (areia)	- resina RI 2 com sílica na proporção 10:2;
RI 1NF	- resina RI 1 com negro de fumo na proporção 10:0,2;
RI 2NF	- resina RI 2 com negro de fumo na proporção 10:0,2;
Isolador RI 1	- fabricado com a resina RI 1 pura;
Isolador RI 2	- fabricado com a resina RI 2 pura;
Isolador RI 1C1	- fabricado com a resina RI 1 e a carga C1 (sílica e negro de fumo);
Isolador RI 2C1	- fabricado com a resina RI 2 e a carga C1 (sílica e negro de fumo);
Isolador RI 1C2	- fabricado com a resina RI 1 e a carga C2 (mica);
Isolador RI 2C2	- fabricado com a resina RI 2 e a carga C2 (mica);
Isolador GSRI 1	- fabricado com o granito sintético RI 1;
Isolador GSRI 2	- fabricado com o granito sintético RI 2;
Isolador Epóxi	- fabricado com resina epóxi;
R_s	- resistência superficial, Ω ;
R_v	- resistência volumétrica, Ω ;
ρ	- densidade do granito, g/cm ³ ;
ρ_v	- resistividade volumétrica, $\Omega \cdot \text{cm}$
ρ_s	- resistividade superficial, Ω
σ	- interação da radiação com a matéria pelo efeito <i>Compton</i> , cm ⁻¹ ;
σ	- tensão mecânica, Pa;
σ_0	- tensão mecânica inicial, Pa;
V	- potencial elétrico, V/m;
v_e	- volume obtido do empacotamento otimizado das britas, cm ³ ;
v_p	- volume da peça a ser moldada, cm ³ ;
v_R	- volume real, cm ³ ;
v_v	- volume de vazios, g/cm ³ ;
t	- tempo, s
τ	- interação da radiação com a matéria pelo efeito fotoelétrico, cm ⁻¹ ;

$\tan \delta$	- fator de dissipação ou tangente de perda;
TC	- tomografia computadorizada.
T_g	- temperatura de transição vítrea, °C;
T_{id}	- temperatura de decomposição inicial, °C;
Z	- impedância entre o condutor e a fonte de tensão, ohm;

Resumo

Isoladores poliméricos vêm gradualmente competindo com os isoladores cerâmicos nas aplicações do sistema elétrico de potência. Embora os isoladores poliméricos ainda apresentem alguns inconvenientes, como alto custo e forte degradação no meio ambiente, principalmente diante dos raios ultravioleta, possuem outras características importantes e altamente relevantes, como, por exemplo, forte resistência mecânica à compressão e à flexão, ótima resistência elétrica e facilidade de instalação e de manutenção.

*Por causa disso, o desenvolvimento desses **novos isoladores** está sendo um fator predominante na competitividade do mercado, onde se observam a constante busca de qualidade e baixo custo. No Brasil, um sério obstáculo atrapalha este avanço tecnológico devido à maioria das matérias-primas serem importadas. As resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona, neste contexto, apresentam um papel crucial, uma vez que elas são produzidas com 100% de tecnologia brasileira no Laboratório de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros do Instituto de Química da Universidade de São Paulo.*

Portanto, neste trabalho são apresentados os processos utilizados no desenvolvimento deste novos isoladores poliméricos produzidos com as resinas puras, com os seus compósitos e com os granitos sintéticos. E também são apresentados os diversos ensaios realizados nas resinas e nos isoladores. Destacando-se entre eles, os ensaios de envelhecimento acelerado, os ensaios elétricos e os ensaios mecânicos realizados nos isoladores do tipo Suporte, os quais resultaram em um forte indicativo para uma ótima aplicação deles em ambiente interno e com custo competitivo em relação aos isoladores comerciais.

Abstract

Polymeric isolators have been competing increasingly with ceramic isolators in electric power system applications. Although polymeric isolators still present a few disadvantages, such as high cost and strong degradation in the environment (poor weathering capacity), particularly from ultraviolet rays, they possess other important and highly relevant characteristics, among them high compressive and flexural strength, excellent electric resistance and easy installation and maintenance.

For these reasons, the development of these **new isolators** has become a predominant factor in market competitiveness, where the combination of high quality and low cost is much sought after. A major obstacle to this technological advance in Brazil is the fact that most of the raw materials are imported. Hence, castor oil polyurethane resins play a crucial role, since they are produced with 100 per cent Brazilian technology at the Laboratory of Analytical Chemistry and Polymer Technology of the Institute of Chemistry, University of Sao Paulo.

This thesis, therefore, presents and discusses the processes used in the development of these new polymeric isolators produced with pure resins, with their composites, and with synthetic granites. Also discussed are the various tests carried out on the resins and on isolators, highlighting, among these, the accelerated aging, electrical and mechanical tests performed on Support type isolators, whose results are strongly indicative of their excellent applicability for indoor environments, coupled with their competitive cost in comparison to commercial isolators.

Capítulo 1:

Introdução

Este trabalho baseia-se na análise e estudo da aplicação de dois tipos de resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona na fabricação de isoladores poliméricos, e tem como objetivo também melhorar as características elétricas e térmicas dessas resinas adicionando-se cargas, melhorando-se o desempenho desses isoladores em condições de serviço.

Essas resinas são inéditas e foram desenvolvidas pelo Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros do Instituto de Química de São Carlos da USP [1]. Resinas da mesma origem já estão sendo pesquisadas para aplicação nas áreas médica e odontológica, porém na área de Engenharia Elétrica não há pesquisas concretas de suas aplicações. Este trabalho poderá contribuir para isso, uma vez que elas puras, sem cargas, já foram caracterizadas eletricamente [2] e apresentaram ótimos resultados como dielétricos sólidos.

Antes e durante a realização deste trabalho, avaliaram-se os princípios básicos para a produção de isoladores poliméricos com estas resinas, visando-se o mercado nacional, e considerando-se os seguintes fatores:

- custo: valor consideravelmente baixo, devido ao fato de a planta mamona (*"Ricinus Communis"*) ser de fácil obtenção na agricultura brasileira;
- facilidade de obtenção: proporcionada pelo IQSC;
- avaliação sobre a demanda comercial: boas perspectivas, após pesquisas de aplicações práticas;
- propriedades boas: elétricas, químicas e mecânicas.

A importância desta pesquisa deve-se ao fato de que estes isoladores elétricos, embora representem uma pequena porcentagem do custo de uma linha de distribuição ou de transmissão de energia elétrica, exercem um papel fundamental e crucial na confiabilidade da linha, na qualidade do serviço e na segurança do sistema elétrico, onde uma falha de uma simples unidade de isolador pode trazer sérias consequências técnicas, econômicas e sociais, conforme dados de noticiários e de relatórios de interrupções não programadas.

Neste trabalho, optou-se por desenvolver isoladores poliméricos do tipo Suporte devido à sua importante aplicação e também devido às características obtidas deste novos materiais, que serão descritas nos capítulos posteriores.

Para tanto, a redação desta tese foi dividida em sete capítulos, expostos a seguir. No capítulo 2, encontra-se uma introdução teórica sobre as informações gerais que envolvem os focos de estudo desta pesquisa, que são:

- **Isoladores elétricos e seus principais problemas em distribuição de energia**, onde se procura identificar os vários tipos e modelos de isoladores e destacar a importância da fabricação de isoladores alternativos para a melhoria do desempenho do sistema elétrico;
- **Isoladores poliméricos**, onde, além de uma breve história sobre a sua aplicação nos sistema elétrico de potência, são referidas e suas vantagens e desvantagens em relação ao isoladores tradicionais de cerâmica;
- **Óleo de mamona e as resinas poliuretanas**, onde são descritas as informações sobre os aspectos agrícolas e dos mercados nacional e internacional da mamona e do seu óleo, e também sobre as resinas derivadas, como importante resultado da aplicação de tecnologia nacional nesse tipo de matéria-prima; e
- **Cargas adicionadas nas resinas e granitos sintéticos**, onde são apresentadas as cargas adicionadas nas resinas em estudo, e suas finalidades de aplicações, procurando-se promover as propriedades dielétricas, térmicas e mecânicas com baixo custo; e onde também são apresentados os **granitos sintéticos**, formados com as resinas em estudo, que revelaram grande otimização de custo para os isoladores poliméricos, com boas características de desempenho.

No capítulo 3, são apresentadas as caracterizações elétrica, mecânica e térmica das resinas e de seus compósitos, para a análise da viabilidade como isoladores elétricos.

O capítulo 4 descreve os processos de fabricação da matriz de moldagem e dos isoladores poliméricos e também, uma estimativa de custo para efeito de comparação com os isoladores comerciais.

Os procedimentos e os resultados dos ensaios de envelhecimento acelerado dos ensaios elétricos e mecânicos realizados nos isoladores poliméricos são expostos no capítulo 5.

Como estudo sobre a qualidade das misturas realizadas nos compósitos e nos granitos sintéticos e como verificação de bolhas de ar existentes nos isoladores, encontra-se no capítulo 6 uma nova metodologia de análise baseada em três técnicas já consagradas como a Microscopia de Força Atômica, Difração de Raios-X e Tomografia Computadorizada.

As conclusões finais são descritas no capítulo 7, juntamente com as descrições de trabalhos futuros para continuação dessa importante pesquisa sobre isoladores poliméricos.

Anexo a este trabalho, encontram-se: a planilha de cálculo das quantidades de materiais utilizados na formação do granito sintético; a relação de equipamentos utilizados nos ensaios elétricos, térmicos e mecânicos; e as etapas de desenvolvimento da matriz de moldagem dos novos isoladores.

E finalmente, no apêndice A, encontra-se um texto sobre Análise Dinâmico-Mecânica (DMA) e Termogravimetria (TG), com o objetivo de descrever teoricamente as técnicas utilizadas na determinação da temperatura de transição vítrea e da temperatura de decomposição das resinas.

Capítulo 2:

Análise Bibliográfica.

2.1 Introdução.

No estudo de isoladores poliméricos à base de óleo de mamona, que possui características multidisciplinares, foram abordadas inúmeras literaturas, informações gerais sobre pesquisas correlatas, divididas, para maior facilidade, nos seguintes tópicos:

- Isoladores elétricos e seus principais problemas em distribuição de energia;
- Isoladores poliméricos;
- Óleo de mamona e as resinas poliuretanas; e
- Cargas adicionadas nas resinas e granito sintético.

2.2 Isoladores elétricos e seus principais problemas em distribuição de energia.

2.2.1 Geral.

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.

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 [3].

Os isoladores elétricos, de um modo geral, podem ser classificados nos seguintes itens:

- Níveis de tensão: *extra, alta, média ou baixa tensão*;
- Tipo de material de fabricação: *porcelana, vidro ou material não cerâmico*;
- Tipo de aplicação em ambiente: *interno ou externo*;
- Modelo de construção: *Pilar, Olhar, de Passagem, Residencial, Predial, Suporte, Pino, Suspensão, Pedestal, Roldana e Castanha*. Alguns deles são demonstrados na figura 2.1.

Figura 2.1: Isoladores elétricos: (a) de Pino, (b) de Suspensão, (c) Pedestal e (d) Roldana e Castanha.

Neste trabalho de pesquisa optou-se por desenvolver o isolador do tipo Suporte com modelo cônico saído usado como suporte de barramentos para construção de chaves de alta tensão, como suporte de disjuntores e em outras aplicações utilizadas em ambiente interno. Esse tipo de isolador foi escolhido em função de sua importante aplicação e das características preliminares das resinas poliuretanas, que serão apresentadas nos capítulos posteriores.

2.2.2 Interrupções não programadas no sistema elétrico de energia

Visando à melhoria constante de atendimento às necessidades e expectativas dos clientes de concessionárias de energia elétrica, um dos aspectos de maior relevância é a redução das interrupções não programadas no fornecimento de energia, ocasionadas pelos isoladores elétricos [4].

A partir de um levantamento das principais causas de interrupções não programadas, é citada a seguir, como exemplo, uma grande incidência de falhas em isoladores do tipo Pino de porcelana e de vidro. Verifica-se que parte das ocorrências deve-se à falha do material e a falhas não determinadas, as quais podem ser relacionadas à fuga de corrente e a perfurações normalmente não visíveis.

a) Perfuração no isolador.

Devido à pequena espessura da porcelana na região do berço do isolador para o pino de aço e como consequência de sobretensões de origem atmosférica, o campo elétrico nessa região é muito intenso, o que leva à perfuração da porcelana. Vide fotografia da figura 2.2.

Figura 2.2: Causa de desligamento sem causa aparente.

b) Trinca no isolador.

Trincas e rupturas da porcelana são notadas como resultado do aquecimento por descargas e centelhamentos dos diferentes materiais empregados, e por diferentes coeficientes de dilatação. Vide fotografia da figura 2.3.

Figura 2.3: Causa de ruptura de isolador.

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 radiointerferências, que perturbam os sinais de comunicações, sendo, atualmente, uma das preocupações das concessionárias de energia elétrica do país. Em face disso, este trabalho de pesquisa objetiva, principalmente, desenvolver um isolador polimérico alternativo para diminuir ou eliminar tais problemas, utilizando-se as resinas poliuretanas inéditas derivadas do óleo de mamona. A seguir, serão apresentadas maiores informações sobre os isoladores poliméricos.

2.3 Isoladores poliméricos.

2.3.1 Uma breve história dos isoladores poliméricos e suas vantagens em relação aos tradicionais.

Desde o início do século 20, isoladores orgânicos têm sido utilizados em aplicações de alta tensão. Iluminação nas minas e nas linhas de bondes constituiu-se nas duas primeiras aplicações de isolações orgânicas. Estes isoladores eram baseados em compostos de *shellac* com enchimento de amianto [5]. À medida que a tecnologia avançou, o poliestireno, um polímero artificial, foi utilizado no lugar do *shellac*.

Posteriormente, compostos isolantes em epóxi Bispenol 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 [5].

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.

Embora a utilização dos isoladores tradicionais de cerâmica seja ainda predominante, os isoladores poliméricos destacam-se com as suas importantes características [6], como:

- desempenho elétrico e mecânico bons, principalmente em relação à resistência a impactos de projétil de arma de fogo, o que representa uma melhor performance diante dos atos de vandalismo, responsáveis muitas vezes por falhas de isolação nos sistemas de distribuição;
- o peso destes isoladores é menor, resultando em redução de custo com manutenção do sistema, instalação, etc;

- tendência futura de custos mais baratos que os tradicionais com o aprimoramento de técnicas e desenvolvimento de pesquisas, devido à facilidade de obtenção e processamento da matéria-prima.

A substituição do isolador cerâmico elimina problemas comuns decorrentes de: defeitos no esmalte; defeitos na cimentação; rachaduras que ocorrem em função da propagação de microtrincas estruturais ou tensões internas; e deficiências na caracterização e na estabilidade de características físico-químicas da matéria-prima.

E as resinas em estudo, usadas na fabricação de isoladores, oferecem vantagens em relação aos outros tipos de materiais utilizados por possuírem características elétricas definidas em [1] e também por serem originadas de matérias-primas (óleo de mamona) de fácil acesso na agricultura brasileira.

2.3.2 Mercado dos isoladores poliméricos e sua matéria prima.

A aplicação na área de alta tensão tem sido vista, cada vez mais, como uma particularidade muito interessante para o mercado final do material polimérico, que se encontra em fase de crescimento. Pelas estimativas totais de venda mundial de isoladores elétricos, eles representam um mercado avaliado entre US\$ 1,5 e US\$1,8 bilhões (um bilhão e meio de dólares) e (um bilhão e 800 milhões de dólares) ao ano [7]. Contudo, os isoladores compostos nos quais se utilizam silicone ou outro material polimérico, no ano de 1999 faziam parte somente de 15 a 20 por cento deste mercado global. Como resultado, as vendas anuais das indústrias de silicões para fabricantes de isoladores compostos e outros produtos, como pára-raios e terminações de cabos, estão somente na ordem de US\$ 50 milhões (cinquenta milhões de dólares).

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 lhe 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, onde se encontra a sua maior aplicação, como isoladores de epóxi do tipo Suporte.

Na figura 2.4, são apresentados alguns modelos de isoladores poliméricos e de isoladores compostos.

Figura 2.4: Exemplos de isoladores: (a) poliméricos, de epóxi; (b) compostos, demonstração do núcleo com material resistente; e (c) compostos, em condições de serviço.

Os isoladores poliméricos e os compostos vêm gradualmente competindo com os isoladores cerâmicos nas aplicações do sistema elétrico de potência, devido às suas características importantes e altamente relevantes, como, por exemplo, menor peso, alta rigidez mecânica, resistência ao vandalismo e melhor desempenho na presença de ambientes poluídos [6]. Diante disso, o desenvolvimento de novos isoladores está sendo um fator predominante na competitividade de mercado, e alguns fabricantes de polímeros, como por exemplo os de silicone, acreditam que os isoladores representam um alto potencial em crescimento dentro de todo o mercado do setor da indústria elétrica [7].

Um inconveniente do uso de silicone é que ele possui um custo por unidade de peso maior que o dos outros materiais, como o EPDM. No entanto, notou-se, ao longo dos últimos 30 anos, um decréscimo do seu preço em função do aumento da procura no mercado e da facilidade

de processamento, o que ocasiona uma tendência de diminuição do custo dos isoladores fabricados com esses materiais.

Com o desenvolvimento de novas tecnologias, procura-se nos materiais poliméricos, além do baixo custo, um produto com menor viscosidade e baixa temperatura de cura, para atender aos fabricantes de isoladores elétricos. O silicone misturado com cargas (como, por exemplo, a sílica) e outros plastificantes, é um exemplo desse desenvolvimento.

Portanto, para fazer um bom isolador elétrico é necessário desenvolver um projeto adequado do produto, definir um processo de produção industrial otimizado e, principalmente, ter uma matéria-prima de qualidade. E, no caso do Brasil, um sério obstáculo atrapalha este avanço tecnológico, porque a maioria das matérias-primas é importada. Em face disso, as resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona, neste contexto, apresentam um papel crucial, uma vez que elas são produzidas com 100% de tecnologia brasileira; logo, maiores detalhes sobre sua matéria prima se tornam importantes e serão apresentados nos itens subsequentes.

2.4 Óleo de mamona e as resinas poliuretanas.

2.4.1 Histórico sobre mamona.

Patton [8] apresenta as primeiras publicações sobre a importância da mamona, onde ressalta algumas citações:

- a) “O governo U.S. adiciona óleo de mamona na sua lista de itens estratégicos necessários para propósitos militares.”;
- b) “O departamento de Agricultura do Quadro de Munições tem autorizado um programa em 1951 para a produção doméstica e obtenção da semente de mamona em 100.000 acres. O preço a ser pago para o fazendeiro (quem entra no contrato) será de 10 centos por peso ou preço lançado no tempo de entrega.”; e
- c) “DCO (óleo de mamona desidratado) pode ser incorporado rapidamente, mas de uma forma controlada; passando pelo processo de secagem pode produzir filmes resistentes com: boa resistência a água; um alto grau de flexibilidade e durabilidade, cor inicial clara e excelente retenção de cor. Nenhum outro óleo natural, avaliado dentro desta quantidade, possui esta combinação única de propriedades.”.

Rapidamente essas declarações fizeram histórias. A primeira delas, categoricamente, afirma a necessidade estratégica militar para o óleo de mamona. A segunda acentua a necessidade do plantio, e a terceira enfatiza a importância do óleo na indústria de revestimento.

2.4.2 Óleo de Mamona.

A semente da mamona contém 50-55 % do óleo conhecido como óleo de mamona ou óleo de rícino [9]. Ele é usado em várias áreas da tecnologia e da medicina, sendo que novas áreas estão constantemente incorporando-o às suas necessidades.

Devido à sua composição e propriedades, o óleo de mamona difere dos outros óleos vegetais. Ele é viscoso, dissolve vagarosamente no petróleo e em outros solventes orgânicos, e origina um importante lubrificante para motores que trabalham sob condições extremas de temperaturas, como por exemplo, motores de avião.

Na França, Itália, Brasil, Grã Bretanha e outros países, há muitos empreendimentos com o óleo de mamona, voltados a produzir material têxtil artificial. Deste óleo obtêm-se também produtos de perfumaria, bronzeadores e produção de plásticos em geral.

Na Rússia [10], estudos sobre a coleção das espécies de mamonas foram iniciados por G.M. Popova em 1922, na Ásia Central. Estimam-se mais de 1200 tipos de espécies e subespécies. E, neste país, a subespécie *communis* (earlier *sanguineus*), *Persian* e *Chinese* são os mais importantes.

No Brasil, a espécie *Ricinus Communis L.* é a mais comum. Ela é uma planta oleaginosa, arbustiva, da família das Euforbiáceas [10]. Seu país de origem é, ainda hoje, motivo de controvérsias, havendo autores que afirmam ser a Ásia e outros, a África. É uma planta conhecida desde os mais remotos tempos, tendo sido encontradas sementes em sarcófagos dos egípcios, há mais de 4.000 anos.

Segundo [10], a subespécie *communis* origina da região sudoeste da Ásia, e se espalhou ao longo da margem do mar Mediterrâneo e sobre o continente americano. Ela é valiosa por suas sementes grandes, resistência à seca, alta produção e pela grande quantidade de óleo. Muitas dessas subespécies requerem muito calor, e possuem alta resistência ao apodrecimento, durante tempos úmidos.

A especialidade do óleo de mamona reside no fato de que 81-96 % de sua composição consiste de glicerídeos de ácido ricinoleico ($C_{18}H_{34}O_3$), que é o principal componente do óleo

de mamona, formado pelo ácido oleico com uma hidroxila no 12^o carbono. Essa particularidade torna o óleo de mamona único em relação a todos os outros óleos vegetais e animais, conferindo-lhe certas peculiaridades de comportamento e aplicação. Isso possibilita a produção de derivados específicos nas reações com sua hidroxila.

O grupo de hidroxila no óleo de mamona [9] explica esta única combinação das propriedades físicas, relativa viscosidade alta, gravidade específica e solubilidade limitada dentro de um solvente alifático de petróleo. A uniformidade e confiabilidade de suas propriedades físicas são demonstradas por um longo tempo de uso do óleo de mamona como padrão absoluto para viscosidade. Por causa deste grupo de hidroxila extremamente polar, ele é compatível com uma grande variedade de resinas naturais e sintéticas.

2.4.3 Aspecto agrícola e o mercado nacional.

A mamona é uma planta de clima tropical e subtropical, razão de encontrar no Brasil excelentes condições de cultivo. Necessita de chuvas regulares no início de sua vegetação, precipitação mínima de 500 mm durante o ciclo de desenvolvimento e de períodos secos na fase de maturação dos frutos. A temperatura ideal encontra-se entre 25 °C e 30 °C . E sua colheita ocorre a partir do mês de abril e se desenvolve durante um período prolongado, determinado pela degeneração das variedades cultivadas.

O uso do óleo de mamona atende ao mercado interno e externo na área de oleoquímica (inclusive da empresa). O subproduto da industrialização de mamona é o farelo que, por ser tóxico, é utilizado como adubo, e, caso passe pelo processo de desintoxicação, pode ser usado como ração.

O nível tecnológico encontrado nas explorações é muito variado, tendo-se desde cultivos espontâneos até aqueles mecanizados. Isso é reflexo da predominância do pequeno produtor, que por cultivar em pequena escala, gera uma produção espacialmente atomizada, com elevado grau de intermediação na fase de comercialização.

No Brasil, a importância da cultura da mamona varia de região para região [10]. No Nordeste, onde os riscos de ocorrência de adversidades climáticas é maior, a exploração é frequentemente encontrada, fazendo parte do plano agrícola das propriedades, geralmente associada a outras culturas.

A Bahia é responsável por mais de 50 % da produção [11], e a análise do sistema de cultivo da mamona no estado estabelece as seguintes características que evidenciam o seu baixo nível técnico, como por exemplo o baixo rendimento e rentabilidade por hectare plantado, e a perda de áreas aptas para outras culturas concorrentes.

A degeneração das sementes utilizadas e o desinteresse dos produtores frente aos baixos preços são fatores que justificam a situação atual da cultura da mamona na Bahia. Nesse estado, o comprador final de bagas de mamona é o industrial de óleo. Contudo, em regra, a intermediação vai desde a pessoa que troca mamona por gêneros alimentícios até o agente de compras das indústrias, passando pelo caminhoneiro. Essa distorção ocorre em virtude da dispersão da produção e do grande número de pequenos produtores, sem meios de levar sua mercadoria diretamente à indústria.

Como a mamona pode ficar estocada por mais de quatro meses sem perda de qualidade, os intermediários o fazem para oferecer posteriormente maiores volumes nos pontos de compra da indústria, obtendo margens maiores de ganho, e que pode encarecer o produto com os custos de seu transporte.

No entanto, em termos regionais, o Nordeste é a principal região produtora de mamona, seguindo posteriormente a região sudeste, que teve como principal estímulo na introdução inicial da cultura a queda nos preços do café ocorrida na década de 1950 no estado de São Paulo.

Na região centro-sul, onde as condições são mais estáveis e, ainda, existe um maior número de culturas alternativas para os produtores, a exploração da mamona é mais condicionada ao comportamento dos preços dos produtos, havendo um mais rápido ajustamento dos níveis de produção às variações de mercado.

A participação da região sul na produção da mamona é também discreta, e praticamente não é cultivada nas outras regiões do país, as quais segundo [11], participam com muito pouco de área plantada.

A mamona, adequadamente cultivada, pode se tornar uma excelente fonte de renda para o produtor [11]. Para tanto, é necessário observar certos cuidados, para se obter êxito nesta cultura, como por exemplo uma temperatura ideal para o crescimento da planta e maturação dos frutos, melhor época de plantio e colheita, e um correto controle de pragas e doenças. A sua extraordinária capacidade de adaptação, a multiplicidade de aplicações industriais do seu óleo e o valor da sua torta, como fertilizante e suplemento protéico, situam-na entre as oleaginosas tropicais mais importantes da atualidade.

Não há informações precisas sobre a época de sua introdução no Brasil. A maioria dos autores considera que a mamoneira tenha sido trazida pelos colonizadores portugueses, no primeiro século do descobrimento. A multiplicidade de usos dos seus produtos fez com que o cultivo da mamoneira passasse do caráter subespontâneo para o racional, com altos rendimentos propiciados pela tecnologia econômica.

A inclusão do óleo de mamona na pauta de exportações brasileiras ocorreu durante a II Guerra Mundial, quando se iniciou aqui o surto de industrialização das oleaginosas em geral. E com a crescente valorização do óleo de mamona no mercado internacional, o Brasil aumentou consideravelmente a sua produção de óleo para exportação, que, entre 1960/75, representou mais de 70 % das exportações mundiais.

No Brasil, encontram-se bagas das cultivares mais pobres e mais ricas, provenientes do mesmo local de produção. Desde aquelas do grupo *Ricinus zanziberensis*, que possuem apenas 30 % de óleo, até as cultivares do grupo *Ricinus sanguineus*, que chegam a conter 66 % de óleo.

Em levantamento realizado pela Associação de Fomento à Lavoura Oleaginosa (AFLO), em 1970, foram encontrados mais de 90 tipos diferentes de sementes, demonstrando o grau de heterogeneidade da cultura na Bahia [11].

2.4.4 Mercado mundial.

Os maiores produtores mundiais de mamona [11] são Índia, China, Brasil e Tailândia. Os três primeiros respondem por cerca de 90 % da produção mundial.

A evolução do seu cultivo mostra que o Brasil permaneceu como o maior produtor mundial até 1973/1974, quando era responsável por 50 % da produção total. Desde então, ela vem declinando.

A evolução das importações mundiais de óleo de mamona mostra que os maiores mercados importadores são Comunidade Européia, Rússia e Estados Unidos, no período de 1985 a 1991.

Apesar do crescimento significativo da ricinocultura na Índia e na China, acredita-se que, com os investimentos em tecnologia agrícola que estão sendo feitos pelas principais empresas industriais e comercializadores de óleo de mamona e derivados, o Brasil poderá competir e crescer significativamente nos próximos anos [11].

Na análise das tendências da demanda do mercado da mamona, vê-se que, tanto internacionalmente como no mercado nacional, o nível de preços tem-se constituído na variável estratégica.

Em termos de qualidade, é reconhecido que o óleo brasileiro constitui padrão internacional de referência, enquanto o produto originário da Índia, via de regra, não consegue atender a todas as especificações exigidas para usos que requerem processamentos mais complexos.

As boas perspectivas para o óleo brasileiro no mercado nacional e internacional incluem ampliações de demanda decorrentes de novas aplicações ou da intensificação de certos usos que, em face das novas condições de oferta, façam que alguns derivados do óleo de mamona passem a apresentar maiores vantagens comparativas diante dos concorrentes atuais [9].

A maior parte da produção brasileira de óleo de mamona é destinada ao mercado externo, do qual domina mais de 60 % [9]. Portanto, conclui-se que é necessária uma política de preços mínimos para a sustentação dos preços de mercado e, paralelamente, deve-se buscar a ampliação do mercado interno brasileiro de mamona, através da intensificação de pesquisas tecnológicas industriais e o desenvolvimento de novas aplicações, como é o caso deste trabalho.

2.4.5 Resina poliuretana derivada do óleo de mamona.

2.4.5.1 Introdução.

A resina poliuretana derivada do óleo de mamona em estudo é formada de dois componentes: o pré-polímero com terminação isocianato e o polioliol. Quando curados por poliadição, esses dois componentes reagem entre si, resultando em um composto poliuretano. Na mistura dos componentes, quanto maior for a proporção do polioliol, mais flexível fica a estrutura da resina. Enquanto que, se houver maior concentração de pré-polímero, mais rígida se torna a sua estrutura, que apresenta alternativas em relação à sua flexibilidade final.

De um modo geral, a polimerização dos poliuretanos ocorre quando um composto com dois ou mais grupos isocianatos em sua estrutura reage com um polioliol, ou seja, um álcool poli-funcional [12].

A equação 2.1 apresenta a composição química dos poliuretanos.

Os compostos que contêm grupos isocianatos são encontrados em duas classes distintas: os aromáticos, dos quais os mais utilizados são o difenilmetano diisocianato (MDI); o tolueno di-isocianato (TDI), e os alifáticos, sendo mais utilizados o hexametileno diisocianato (HDI) e o isofurona diisocianato (IPDI). O pré-polímero estudado neste trabalho foi sintetizado a partir do MDI e de um polioliol derivado do óleo de mamona.

Portanto, dependendo do material de partida empregado, os produtos da reação podem ter propriedades físicas altamente diferentes, embora quimicamente sejam bastante semelhantes. Maiores detalhes sobre a composição química da resina poliuretana derivada do óleo de mamona e suas reações encontram-se em [1] e [12].

2.4.5.2 Classificação das resinas em estudo.

A classificação das resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona em estudo possui códigos laboratoriais para suas diferenciações. São elas: RI 1, RI 2, RI 1C1, RI 2C1, RI 1C2, RI 2C2, granito sintético RI 1 e granito sintético RI 2.

A proporção dos componentes de polioliol e de pré-polímero na resina RI1 pura (sem carga) é de 1 para 1 respectivamente, enquanto que na resina RI 2 pura é de 1 para 1,75. E o tempo para manusear essas resinas é de até 6 minutos, enquanto que o tempo de cura total é de 24 horas.

Resinas de mesma origem estão sendo aplicadas com sucesso em próteses na medicina [12]. Em relação à Engenharia Elétrica, não há pesquisas específicas da aplicação de tais resinas, o que mostra a importância deste trabalho.

A caracterização elétrica dessas resinas (sem carga) demonstra que elas possuem boas perspectivas para a aplicação em isoladores elétricos, conforme apresenta a tabela 2.1.

Tabela 2.1: Caracterização elétrica das resinas RI 1 e RI 2 [1].

Características Elétricas	Unidade	Resina RI 1	Resina RI 2
Rigidez Dielétrica	KV/mm	28,9	31,2
Resistividade Volumétrica (ρ_v)	$\Omega \cdot \text{cm}$	$4,21 \cdot 10^{15}$	$4,19 \cdot 10^{15}$
Resistividade Superficial (ρ_s)	Ω	$1,40 \cdot 10^{15}$	$1,47 \cdot 10^{15}$
Condutividade Volumétrica (γ_v)	$\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	$2,38 \cdot 10^{-16}$	$2,40 \cdot 10^{-16}$
Condutividade Superficial (γ_s)	Ω^{-1}	$7,26 \cdot 10^{-16}$	$6,86 \cdot 10^{-16}$
Permissividade Dielétrica (ϵ) - 1,5 V	-----	2,80	3,03
Permissividade Dielétrica (ϵ) - 2,0 kV	-----	2,84	2,97
Susceptibilidade Elétrica (χ_e) - 1,5 V	-----	1,80	2,03
Susceptibilidade Elétrica (χ_e) - 2,0 kV	-----	1,84	1,97
Fator de Dissipação ($\text{tg } \delta$) - 1,5 V	-----	$1,73 \cdot 10^{-2}$	$3,37 \cdot 10^{-2}$
Fator de Dissipação ($\text{tg } \delta$) - 2,0 kV	-----	$1,04 \cdot 10^{-2}$	$2,79 \cdot 10^{-2}$
Fator de Qualidade (Q) - 1,5 V	-----	57,8	29,7
Fator de Qualidade (Q) - 2,0 kV	-----	96,2	35,8
Índice de Perdas (ϵ'') - 1,5 V	-----	$4,84 \cdot 10^{-2}$	$10,2 \cdot 10^{-2}$
Índice de Perdas (ϵ'') - 2,0 kV	-----	$2,95 \cdot 10^{-2}$	$8,29 \cdot 10^{-2}$

Notas importantes:

- a caracterização elétrica das resinas RI 1 e RI 2 foi realizada nas seguintes condições ambientais: temperatura de 20 ± 5 °C e umidade relativa do ar de 60 ± 5 % [1];
- os códigos laboratoriais iniciais das resinas, A249+B25015 e A253+B351 [1] foram substituídos por RI 1 e RI 2, respectivamente.
- a resina RI 1 é mais transparente do que a resina RI 2, enquanto que o preço de custo da primeira é quase duas vezes maior que o da segunda. No entanto, segundo as características elétricas das duas resinas, notam-se poucas diferenças entre elas.

Diante dessas características elétricas, tornou-se importante um estudo sobre a adição de cargas para melhorar a viabilidade técnica e econômica dessas resinas, conforme será apresentado no item subsequente.

2.5 Cargas adicionadas nas resinas e granito sintético.

2.5.1 Incorporação de cargas.

No casos destas resinas com cargas adicionadas, tem-se três elementos básicos que compõem o compósito polímero: a carga mineral reforçante ou fibra; a matriz polimérica; e a interface polímero-carga mineral reforçante ou fibra.

Cada um desses três deve apresentar características apropriadas e funcionar tanto individualmente, no sentido de se atingir a máxima eficiência das propriedades desejadas no compósito [13]. Em termos comparativos, a interface polímero – fibra ou carga mineral é o fator crítico que determina até que ponto as propriedades mecânicas em potencial do compósito serão atingidas e mantidas durante seu uso em serviço. As tensões localizadas concentram-se normalmente na ou próximo da interface e, dependendo da natureza das interações na interface entre o polímero e o elemento carga, estas tensões podem funcionar como um foco para falha prematura do compósito. A interface deve, portanto, apresentar características físicas e químicas adequadas para promover uma eficiente transferência de tensão da matriz polimérica para o elemento carga.

Resumindo, pode-se dizer que as propriedades finais do compósito polimérico dependem essencialmente de: propriedades características individuais dos seus componentes; concentração relativa dos componentes; natureza da interface polímero-carga e da região da interface; e eficiência do processo de composição e de transformação em assegurar a melhor morfologia desejada no compósito final.

A eficiência do reforço mecânico depende, entre outros fatores, da escolha do elemento de reforço. E, de forma geral [14], as fibras de vidro (FV), carbono (FC), aramida e algumas cargas minerais tais como mica, wolastonita e talco apresentam desempenho superior em compósitos poliméricos, em relação a outras cargas como carbonatos de cálcio natural e precipitado, caulim e sílica. Essas diferenças na escala de reforço das propriedades mecânicas dos plásticos têm levado à classificação das cargas e fibras de alto módulo da seguinte maneira:

- **fibras de reforço:** as fibras de alto módulo e resistência tais como as fibras de vidro, carbono, aramida e grafite;
- **cargas reforçantes:** alguns minerais de estrutura fibrosa ou lamelar tais como mica, wolastonita e alguns tipos de talco e caulim, (também flocos de vidro);
- **cargas de enchimento:** cargas minerais ou sintéticas de partículas essencialmente de formato esferoidal como CaCO_3 natural e precipitado, talco, caulim, sílica, quartzo, alumina

tridratada, feldspato e esferas de vidro – em que um dos objetivos principais da carga é o de funcionar como “extensor” de baixo custo para as resinas de plásticos.

As cargas indicadas para proporcionarem maior resistência térmica são: os reforços de vidro; a mica, que proporciona reforço lamelar com propriedades dielétricas, térmicas e mecânicas com baixo custo; a wolastonita; e as fibras cerâmicas, que promovem reforço, alta resistência a temperatura e custo elevado. Enquanto que as cargas com concentrações que atuam como pigmento, indicadas como protetor solar são: o dióxido de titânio, que reflete a luz e o **negro de fumo**, que absorve a luz não deixando os raios ultravioleta penetrarem muito ao longo do material.

De acordo com o exposto, uma análise cuidadosa foi realizada e em função da praticidade de obtenção e do custo dessas cargas, e optou-se por utilizar a carga denominada de C1 na proporção de massa de 10:2:0,2 (10 partes de resina para 2 partes de sílica e 0,2 partes de negro de fumo), formando os compósitos RI 1C1 e RI 2C1. E, após ensaios térmicos realizados nesses compósitos, surgiu a necessidade de acrescentar nas resinas uma segunda carga, a mica, que foi denominada de C2, com o objetivo de melhorar as suas suportabilidades térmicas, formando assim os compósitos RI 1C2 e RI 2C2.

Os resultados dos ensaios térmicos nas resinas com mica também não foram satisfatórios, mas, por outro lado, o acréscimo dessas cargas diminui um pouco o custo do isolador e também lhes proporciona uma coloração alternativa, conforme será exposto no próximo capítulo.

2.5.2 Granito sintético.

2.5.2.1 Britagem e classificação do granito sintético.

O granito sintético é um material estrutural composto pela mistura de agregados de granito natural e resina de alta qualidade, cujas primeiras aplicações se deram em 1876 [15].

A excelente qualidade de amortecimento interno, a estabilidade dimensional e o menor custo comparados com os de materiais tradicionais [15], proporciona a esse material, a sua utilização em estruturas de máquinas para ferramentas de grande precisão, em equipamentos de metrologia, em bancadas de equipamentos ópticos e em dispositivos de fixação para usinagem.

O processamento do granito sintético inicia-se com a aquisição da matéria-prima, o granito natural. Ele é geralmente obtido de empresas especializadas do ramo e pode ser comprado em várias formas, sendo a mais comum em forma de cacos, ou seja, restos de material já trabalhado, que têm custo bem mais baixo e já vêm em tamanho apropriado para ser britado. Existem vários

tipos e tonalidades de granito natural. O tipo usado neste trabalho é o granito cinzento, que possui as características descritas na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Composição química média e propriedades do granito cinzento[16].

Componente	Quantidade [%]	Propriedades
SiO ₂	73,23	Dureza: 95 Shore D Porosidade: 0,7 % Densidade: 2,7 g/cm ³ Resistência a compressão: 148 kgf/cm ²
Al ₂ O ₃	13,41	
Fe ₂ O ₃	0,56	
FeO	3,12	
Na ₂ O	3,27	
K ₂ O	2,67	
MgO	0,11	
CaO	1,67	
Outros	1,96	

A britagem do granito natural é feita através de um triturador mecânico. A pedra é inserida no triturador, que, pelo movimento oscilatório de uma mandíbula, quebra o material em tamanhos menores. O menor tamanho de brita obtida pelo triturador é proporcional à sua abertura, que pode ser regulada. O processo de britagem pode ser sucessivo, caso o tamanho da brita não seja adequado.

Após a britagem, é feita a classificação granulométrica do material. A separação das britas se dá por meio de peneiras padronizadas segundo a norma NBR 5734-98, cujas aberturas em mm são: 12,70; 7,93; 4,75; 2,00; 1,19 e 0,59. Essas peneiras classificam o granito natural pelo seu tamanho equivalente, isto é, se uma brita passa por uma peneira 12,70 mm e é retirada por uma peneira de 7,93 mm de abertura, considera-se que ela tem um diâmetro equivalente de 12,70 mm [16].

O processo de separação das britas é feito empilhando-se as peneiras padronizadas em ordem crescente de tamanho de abertura, uma encaixada sobre a outra e todas dentro de uma caixa para reter o material restante da última peneira (pó). Utiliza-se uma mesa vibratória para a separação, e depois o material é acondicionado em recipientes, evitando-se a umidade.

A definição do tamanho das britas a serem usadas na moldagem do granito sintético é feita com base no tamanho da menor cavidade a ser preenchida no molde. O maior tamanho das britas para uma determinada aplicação não deve ser maior que a metade da menor cavidade a ser preenchida pelo material durante a moldagem.

2.5.2.2 Otimização do empacotamento das britas

O melhor coeficiente de empacotamento a ser utilizado na moldagem tem relação direta com o desempenho e custo da peça a ser obtida, pois a resina é muito mais cara que o granito e é responsável pela característica de amortecimento interno da peça, enquanto que o granito natural é o responsável pela rigidez.

Para se obter um material economicamente eficiente, é necessária uma ponderação, a melhor possível, da quantidade de cada um dos componentes do granito sintético. Para se conseguir tal característica, devem-se estudar diferentes porcentagens dos componentes a fim de se obter o melhor coeficiente de empacotamento.

O coeficiente de empacotamento é função dos vazios que ficam dentro de uma mistura compactada de britas de granito natural, preenchidos pela resina durante a moldagem do granito sintético.

2.5.2.3 Cálculo da quantidade de brita e resina.

O cálculo da quantidade dos componentes do granito sintético deve ser feito corretamente para evitar desperdícios e problemas durante a moldagem da peça, e tem como base o valor de volume obtido do empacotamento otimizado das britas (v_e), e a porcentagem de cada tamanho de brita e o volume da peça a ser moldada em granito sintético (v_p).

Com base no valor do v_e , calculado em peso (250 g) e o valor de v_p , é possível calcular a massa do granito sintético da mistura de granito sintético m_{gn} [16]. Com o valor de m_{gn} e as porcentagens em peso de cada tamanho de brita obtida, tem-se a massa de cada brita para a peça a ser moldada. E finalmente, o cálculo da resina é feito com base na densidade do granito natural, d_{gn} , sendo o volume real (v_R) de granito natural para 250 g dado por:

$$v_R = \frac{250}{d_{gn}} \quad (2.2)$$

Com o valor de v_R e o valor de v_e , obtém-se o volume de vazios que deve ser ocupado pela resina v_v , segundo a equação abaixo.

$$v_v = v_e - v_R \quad (2.3)$$

A massa de resina (m_R) é obtida com o valor de v_v multiplicado pela densidade da resina d_R , conforme a equação 2.4.

$$m_R = v_v \times d_R \quad (2.4)$$

Com o valor de m_R e os 250 g de britas, pode-se calcular a porcentagem em peso de cada elemento (resina e britas) para a mistura [16]. Assim sendo, a partir do peso m_{gn} e m_R pode-se calcular a quantidade de resina para a moldagem da peça. No anexo A, encontra-se uma planilha de cálculo que determina a composição em massa do granito sintético em função do volume da peça.

2.5.2.4 Adequação do processo de moldagem.

Do mesmo modo que peças podem diferir uma das outras, o processo de moldagem de peças distintas também pode ser diferente. Devido às diferentes geometrias das peças, os processos de enchimento devem se adequar para evitar problemas no preenchimento e na uniformidade da mistura durante a moldagem da peça.

Na figura 2.5, é apresentado um exemplo de preenchimento difícil, em que é necessária uma variação no enchimento do molde para evitar falhas.

Figura 2.5: Exemplos de preenchimento de um molde [16].

Durante o projeto da peça e do molde, o projetista deve, sempre que possível, facilitar ao máximo o processo de preenchimento do molde pelo granito sintético, mas isso nem sempre é possível. Nesses casos, é necessário um cuidado especial durante a moldagem para se evitar falhas, e uma correta adequação do processo de moldagem ao molde deve ser bem projetada.

Portanto, neste trabalho de pesquisa, foram formados dois tipos de granitos sintéticos, classificados como GSRI 1 e GSRI, originados das resinas RI 1 e RI 2 respectivamente. Eles são compostos por 77 % de granito natural com três dimensões de tamanhos de britas (4,76 mm; 2,00 mm e pó) e 23 % de resina, e o desenvolvimento dos isoladores poliméricos com esses materiais tem o mérito de apresentar isoladores com baixo custo e com ótimas características elétricas, conforme será apresentado posteriormente.

Capítulo 3:

Caracterização das resinas poliuretanas e de seus compósitos derivados do óleo de mamona.

3.1 Introdução.

A caracterização das resinas poliuretanas e de seus compósitos para aplicação em isoladores elétricos deve ser de natureza elétrica, mecânica e térmica. A de natureza elétrica para as resinas puras já foi determinada em [1]. Enquanto que as propriedades elétricas, mecânicas e térmicas das resinas e de seus compósitos seguiram parâmetros e metodologias citados nos itens subsequentes.

3.2 Ensaios elétricos nas resinas.

3.2.1 Procedimentos dos ensaios elétricos nas resinas e nos seus compósitos.

Os procedimentos dos ensaios elétricos acompanharam as orientações da Associação Brasileira de Normas Técnicas, nas seguintes normas:

- NBR 5403: Determinação da resistividade volumétrica e superficial [17];
- NBR 5405: Determinação da rigidez dielétrica sob frequência industrial [18];
- NBR 6936: Técnicas de ensaios elétricos em alta tensão [19].

Nos ensaios elétricos são evidenciados fatores importantes como condicionamento das amostras; tensão aplicada nos ensaios; métodos de medição; precisão correspondente; tipos de eletrodos; e dimensões dos corpos de prova.

Utilizaram-se cinco corpos de provas com diâmetros de 10 cm e 2 mm de espessuras.

Normas técnicas internacionais como ASTM, BS, DIN, também foram analisadas como complementação das normas da ABNT. Elas foram acompanhadas por certos critérios para a avaliação dos métodos e não simplesmente seguidas.

O condicionamento das amostras com cargas seguiu os mesmos procedimentos que as amostras sem cargas, ficando expostas em condições normais de temperatura e umidade

relativa de ar durante três horas antes dos ensaios. Este tempo de condicionamento das amostras foi idêntico para todos os ensaios, devido ao material não ser higroscópico, com capacidade de absorção de água menor que 1 %. Este tempo foi considerado suficiente para que as amostras se condicionassem às condições ambientais do ensaio. A seguir, são apresentados os esquemas de montagem correspondentes aos ensaios elétricos realizados.

I - Rigidez dielétrica.

A rigidez dielétrica é o campo elétrico máximo que o material suporta.

O ensaio elétrico realizado para determinar a rigidez dielétrica foi do tipo de “tempo curto”, em que se aumentou a tensão elétrica alternada aplicada a partir do zero, com taxa uniforme de 500 V/s e com tempo médio de ensaio entre 10 e 20 segundos. O esquema da montagem para a medição encontra-se na figura 3.1.

Figura 3.1: Esquema da montagem para a medição da rigidez dielétrica. Sendo: 1 - medidor de rigidez dielétrica (transformador regulável com indicador de corrente de fuga); 2 - eletrodo superior; 3 - eletrodo inferior; 4 - corpo de prova; 5 - cuba de vidro com óleo isolante de transformador.

II- Resistividades volumétrica e superficial.

A resistividade volumétrica caracteriza a resistência elétrica que o material oferece, com tensão contínua aplicada em um volume específico.

A resistividade superficial caracteriza a resistência que o material oferece ao longo da superfície diante de uma tensão contínua aplicada entre os eletrodos. O esquema de medição das resistividades volumétrica e superficial é apresentado na figura 3.2.

Figura 3.2: Esquema da montagem para a medição de resistividade volumétrica e superficial. Onde: 1 - medidor de resistividade volumétrica e superficial (ponte de resistência alta); 2 - eletrodo superior; 3 - eletrodo central; 4 - eletrodo de guarda; 5 - corpo de prova.

As condições de temperatura e umidade relativa eram de 22,0 °C e 54 %, respectivamente.

Para comparar as resistividades volumétrica e superficial dos materiais, eles têm que ter especificado o mesmo tempo de eletrificação das amostras. Nos ensaios realizados, utilizou-se a seguinte padronização: 50 segundos de tempo de carregamento (*charge*) e 1 minuto de tempo de eletrificação e leitura.

Na figura 3.3, encontra-se uma fotografia do aparelho utilizado para medir a resistividade volumétrica e superficial, juntamente com os corpos de prova das resinas estudadas.

Figura 3.3: Fotografia do aparelho de medir resistividade volumétrica e superficial da marca HP, e os corpos de prova utilizados.

Através dos valores inversos das resistividades volumétrica e superficial, podem-se calcular os valores de condutividades volumétrica e superficial, respectivamente.

III- Ensaio de Tensão de Impulso Atmosférico

O impulso atmosférico pode ser de dois tipos:

- normalizado: quando o impulso não é interrompido por uma descarga de ruptura com tempo de frente de onda de 1,2 μ s e tempo até o meio valor de 50 μ s; e
- cortado: quando o impulso é interrompido por uma descarga de ruptura, causando uma queda abrupta da tensão até um valor praticamente nulo, com ou sem presença de oscilações.

O corte pode ocorrer na frente, na crista ou na cauda do impulso e pode ser obtido por meio de um centelhador de corte ou pela ocorrência de descarga de ruptura através da isolamento interna ou externa do objeto sob ensaio.

Estes impulsos foram aplicados para determinar as seguintes tensões elétricas:

- Tensão suportável: valor presumido de tensão especificado que caracteriza o isolamento da amostra sob ensaio no ensaio de tensão suportável/;

- Tensão de descarga de ruptura assegurada: valor presumido de tensão especificado que caracteriza o isolamento do objeto sob ensaio no ensaio de tensão de impulso de ruptura.

A montagem para a realização dos ensaios encontra-se na figura 3.4.

Figura 3.4: Esquema da montagem para a medição de tensão de impulso. Sendo: G.I. - gerador de impulso; C1 e C2 - capacitores do divisor capacitivo; Osc. - osciloscópio; 1 - eletrodo superior; 2 - eletrodo inferior; 3 - corpo de prova e 4 - cuba de vidro com óleo isolante.

Nas resinas com cargas, houve problemas com aglomerados de negro de fumo, os quais foram resolvidos misturando-se os componentes polioli e carga, com o auxílio de um misturador elétrico e aplicado vácuo em seguida, antes de colocar o pré-polímero. A evolução de melhorias nos corpos de prova pode ser verificada na figura 3.5.

Figura 3.5: Fotografia da evolução dos corpos de prova utilizados nos ensaios elétricos. Superfície ampliada.

3.2.2 Resultados dos ensaios elétricos nas resinas e compósitos.

Os resultados da caracterização das resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona com carga carga negro de fumo e sílica foram para determinar as seguintes propriedades: resistividades volumétrica (ρ_v) e superficial (ρ_s); condutividades volumétrica

(γ_v) e superficial (γ_s); rigidez dielétrica (R_d); tensão de descarga de ruptura; e tensão de descarga suportável.

Os resultados dos ensaios elétricos encontram-se nas tabelas apresentadas a seguir:

Tabela 3.1: Ensaios de resistividades da resina RI 1C1, comparados com os da RI 1.

Nº Amostra	S [mm]	R_v · 10 ¹³ [Ω]	R_s · 10 ¹³ [Ω]	ρ_v · 10 ¹⁴ [Ω.cm]	ρ_s · 10 ¹⁴ [Ω]	γ_v · 10 ⁻¹⁵ [Ω.cm] ⁻¹	γ_s · 10 ⁻¹⁵ [Ω] ⁻¹
1	2,06	0,38	0,17	3,62	0,320	2,76	31,3
2	2,30	1,20	0,20	10,2	0,376	0,980	26,6
3	1,89	0,80	0,90	8,30	1,69	1,20	5,91
4	1,90	0,42	2,00	4,33	3,76	2,31	2,66
5	2,06	1,20	0,34	11,4	0,639	0,877	15,6
6	2,11	0,46	1,50	4,27	2,82	2,34	3,55
7	2,21	1,40	2,50	12,4	4,70	0,805	2,13
Média RI 1C1	---	0,837	1,09	7,79	2,04	1,61	12,5
Desvio- padrão RI 1C1	---	0,429	0,933	3,70	1,75	0,826	12,2
Média RI 1	---	2,66	9,5	26,4	17,9	0,381	0,563
Desvio- padrão RI 1	---	0,2171	0,0707	0,199	0,133	0,277	0,454

Tabela 3.2: Ensaios de resistividades da resina RI 2C1, comparados com os da RI 2.

Nº Amostra	S [mm]	R_v · 10 ¹³ [Ω]	R_s · 10 ¹³ [Ω]	ρ_v · 10 ¹⁴ [Ω.cm]	ρ_s · 10 ¹⁴ [Ω]	γ_v · 10 ⁻¹⁵ [Ω.cm] ⁻¹	γ_s · 10 ⁻¹⁵ [Ω] ⁻¹
1	2,27	0,55	0,28	4,75	0,526	2,11	19,0
2	1,96	0,40	0,46	4,00	0,865	2,50	11,6
3	2,23	2,1	0,22	18,5	0,414	0,541	24,2
4	2,20	1,5	1,2	13,4	2,26	0,746	4,42
5	1,95	1,6	2,0	16,1	3,76	0,621	2,66
6	1,82	1,2	1,0	12,9	1,88	0,775	5,32
7	2,00	0,65	0,40	6,37	0,752	1,57	13,3
Média RI 2C1	---	1,14	0,794	10,9	1,49	1,27	11,5
Desvio- padrão RI 2C1	---	0,633	0,648	5,79	1,22	0,794	8,03
Média RI 2	---	2,64	9,65	25,7	18,1	0,391	0,552
Desvio- padrão RI 2	---	0,165	0,0474	0,180	0,0892	0,274	0,280

Tabela 3.3: Ensaios de rigidez dielétrica (R_d) da resina RI 1C1.

Nº da Amostra	Espessura [mm]	Tensão de ruptura [kV]	Rigidez dielétrica [kV/mm]
1	1,90	23,2	12,2
2	1,85	20,5	11,1
3	2,06	24,0	11,7
4	2,11	25,6	12,1
5	2,21	25,2	11,4
R_d médio (2 mm)	---	23,7	11,7
Desvio-padrão	---	2,03	0,464

Nota: O valor da rigidez dielétrica da resina RI 1 com corpos de prova de 2 mm é 20,1 kV/mm.

Tabela 3.4: Ensaios de rigidez dielétrica (R_d) da resina RI 2C1.

Nº da Amostra	Espessura [mm]	Tensão de ruptura [kV]	Rigidez dielétrica [kV/mm]
1	2,06	21,0	10,2
2	1,90	20,1	10,6
3	2,33	26,4	11,3
4	2,24	23,8	10,6
5	2,29	29,5	12,9
R_d médio (2 mm)	---	24,2	11,1
Desvio-padrão	---	3,88	1,07

Nota: O valor da rigidez dielétrica da resina RI 2 com corpos de prova de 2 mm é 18,4 kV/mm.

Tabela 3.5: Ensaios de tensão de impulso de descarga de ruptura e de tensão de impulso suportável da resina RI 1 (amostras de 2,0 mm de espessura).

Nº das amostras	Tensão de descarga de ruptura [kV]	Tensão suportável [kV]
1	129,5	100
2	123,7	100
3	128,7	100
4	112,5	100
5	119,6	100
Média	122,8	100
Desvio-padrão	7,015	0

Tabela 3.6: Ensaios de tensão de impulso de descarga de ruptura e de tensão de impulso suportável na resina RI 2 (amostras de 2,0 mm de espessura).

Nº das amostras	Tensão de descarga de ruptura [kV]	Tensão suportável [kV]
1	95,2	78,0
2	94,8	78,0
3	95,6	78,0
4	106	78,0
5	90,0	78,0
Média	96,32	78,0
Desvio-padrão	5,25	0

Tabela 3.7: Valores da tensão de impulso de descarga de ruptura da resina RI 1C1.

Nº da amostra	Espessura [mm]	Tensão descarga de ruptura [kV]
1	2,06	48,6
2	2,31	67,6
3	2,34	52,9
Média	---	56,4
Desvio-padrão	---	9,96

Nota: O valor da tensão de impulso de descarga de ruptura da resina RI 1 é 122,8 kV/mm.

Tabela 3.8: Valores da tensão de impulso de descarga de ruptura da resina RI 2C1.

Nº da amostra	Espessura [mm]	Tensão de descarga de ruptura [kV]
1	2,200	65,00
2	1,945	51,00
3	1,815	50,00
Média	---	55,33
Desvio-padrão	---	8,39

Nota: O valor da tensão de descarga de ruptura da resina RI 2 é 96,32 kV/mm.

3.3 Ensaios mecânicos.

3.3.1 Procedimentos dos ensaios mecânicos realizados nas resinas e nos compósitos.

Os ensaios mecânicos realizados nas resinas e nos seus compósitos foram para determinar a tensão de tração e a de compressão e flexão.

Segundo [20, 21 e 22], tem-se algumas definições importantes:

- tensão de tração (nominal) é a razão entre a carga ou força de tração aplicada e a área inicial mínima da seção transversal do corpo de prova, devendo ser expressa em megapascal (MPa);
- módulo de elasticidade em tração ou módulo de Young é a razão entre a tensão de tração (nominal) e a deformação correspondente, abaixo do limite de proporcionalidade do material. O limite de proporcionalidade é a maior tensão que o material é capaz de suportar sem qualquer desvio de proporcionalidade entre a tensão e a deformação (*Lei de Hooke*). Esse módulo, embora não deva ser utilizado como sinônimo de rigidez, está diretamente relacionado com este comportamento mecânico. Isto é, quanto maior for o valor do módulo de Young, maior será a rigidez do polímero;
- tensão de compressão (nominal) é a razão entre a carga ou força de compressão aplicada e a área inicial mínima da seção transversal do corpo de prova, devendo ser expressa em megapascal (MPa);
- tensão de flexão (nominal) é a razão entre a carga ou força de flexão aplicada e a área inicial mínima da seção transversal do corpo de prova, devendo ser expressa em megapascal (MPa);

Os equipamentos utilizados foram ajustados de acordo com os procedimentos das normas técnicas, e estão identificados no anexo B.

No ensaio mecânico de tração, foram empregados 5 corpos de prova com espessura em torno de 5 mm de acordo com as especificações do corpo de prova do tipo II relatado na norma ASTM D638 [20], e velocidade do ensaio de 5,08 mm/minuto.

No ensaio de compressão, utilizaram-se 5 corpos de prova de 12,7 mm diâmetro e 25,4 mm de comprimento, com velocidade do ensaio de 1,30 mm/minuto, segundo ASTM D695 [21].

Para determinar a dureza dos materiais, foram usados 5 corpos de prova retangulares de 70 x 50 mm e 4,5 mm de espessura, segundo ASTM D2240 [23].

No ensaio de flexão, utilizaram-se corpos de prova retangulares de 128 x 12,8 mm e 3,5 mm de espessura, segundo ASTM D790 [22].

A figura 3.6 apresenta fotografias dos corpos de provas utilizados durante os ensaios mecânicos.

Figura 3.6: Fotografia dos corpos de prova utilizados nos ensaios mecânicos das resinas. Da direita para a esquerda, respectivamente os de: tração, compressão, dureza e flexão. O de flexão é só ilustrativo, na verdade ele possui um comprimento maior do que o apresentado.

A figura 3.7 apresenta fotografias dos corpos de provas submetidos aos ensaios mecânicos de tração e compressão.

(a)

(b)

(c)

Figura 3.7: Fotografias dos corpos de prova, durante os ensaios mecânicos: (a) de tração antes da aplicação da tensão, (b) de tração após a ruptura e (c) de compressão após a ruptura.

3.3.2 Resultados dos ensaios mecânicos realizados nas resinas e nos compósitos.

Os resultados dos ensaios mecânicos foram divididos nas seguintes três partes:

- Resultados dos ensaios mecânicos das resinas com cargas C1 e C2 nas proporções de 10:2:0,2 e 10:2, respectivamente;
- Resultados dos ensaios mecânicos de dureza da resina RI 1 nas proporções de mica de 10:1, 10:2, 10:3 e 10:4;
- Resultados da carga de compressão nos granitos sintéticos.

3.3.2.1 Resultados dos ensaios mecânicos das resinas com cargas C1 e C2 nas proporções de 10:2:0,2 e 10:2, respectivamente.

Os resultados dos ensaios mecânicos de compressão, de tração, de flexão e de dureza encontram-se nos itens apresentados a seguir.

a) Ensaio de compressão.

Os resultados encontram-se na tabela 3.9.

Tabela 3.9: Resultados dos ensaios de tensão de compressão de ruptura.

Tipo de resina	Tensão de Compressão [MPa]
Resina RI 1	* 193,2
Resina RI 1C1	* 257,9
Resina RI 1C2	220,0
Resina RI 2	83,7
Resina RI 2C1	80,7
Polímero usado como isolador	80,0 – 170,0 [ref.24]

Notas: 1- * Não foi possível a obtenção do valor da tensão de compressão de ruptura na resina RI 1 e RI 1C1, com o aparelho de medida utilizado. Porém os valores apresentados são os picos de tensões; e

2- Não foram confeccionadas amostras da resina RI 2 com carga C2 para a realização dos ensaios mecânicos porque essa resina apresentou características térmicas desfavoráveis, conforme verificado nos resultados descritos posteriormente.

As curvas características da variação da deformação nos corpos de prova das resinas (carga C1) com a tensão de compressão aplicada são apresentadas a seguir na figura 3.8.

Figura 3.8: Variação da deformação nos corpos de prova das resinas com a tensão de compressão aplicada das resinas: (a) RI 1; (b) RI 1C1; (c) RI 2 e (d) RI2C1.

As curvas características da variação da deformação nos corpos de prova da resina RI 1 e do compósito RI 1C2, com a tensão de compressão aplicada são apresentadas a seguir na figura 3.9.

Figura 3.9: Variação da deformação nos corpos de prova das resinas com a tensão de compressão aplicada nas resinas: (a) RI 1, (b) RI 1C2 e (c) nas cinco amostras com mica.

b) Ensaio de tração.

Os resultados encontram-se na tabela a seguir.

Tabela 3.10: Resultados dos ensaios de tensão de tração de ruptura.

Tipo de resina	Tensão de tração [MPa]
Resina RI 1	24,219
Resina RI 1C1	23,691
Resina RI 1C2	23,593
Resina RI 2	5,658
Resina RI 2C1	5,782
Polímero usado como isolador	20,0 – 35,0 [24]

As curvas características da variação da deformação nos corpos de prova das resinas (carga C1) com a tensão de tração aplicada são apresentadas a seguir na figura 3.10.

Figura 3.10: Variação da deformação nos corpos de prova das resinas com a tensão de tração aplicada das resinas: (a) RI 1; (b) RI 1C1; (c) RI 2 e (d) RI 2C1.

As curvas características da variação da deformação nos corpos de prova da resina RI 1 e do compósito RI 1C2, com a tensão de tração aplicada são apresentadas a seguir na figura 3.11.

Figura 3.11: Variação da deformação nos corpos de prova das resinas com a tensão de tração aplicada nas resinas: (a) RI 1, (b) RI 1C2 e (c) nas cinco amostras com mica.

c) Ensaio de flexão

Os resultados encontram-se na tabela a seguir.

Tabela 3.11: Resultados dos ensaios de tensão de flexão de ruptura.

Tipo de resina	Tensão de flexão [MPa]
Resina RI 1C2	159,1

Nota: Na referência utilizada [24], não foi encontrado o valor de tensão de flexão de um polímero usado em isolamento elétrica.

As curvas características da variação da deformação nos corpos de prova das resinas com a tensão de flexão aplicada são apresentadas a seguir na figura 3.12.

Figura 3.12: Variação da deformação nos corpos de prova das resinas com a tensão de flexão aplicada nas resinas: (a) RI 1C2 e (b) RI 1C2 das 5 amostras.

Os ensaios de flexão nos outros materiais serão realizados juntamente com os ensaios nos isoladores desenvolvidos, e os resultados serão apresentados no capítulo 5.

d) Ensaio de dureza.

Os resultados do ensaio de dureza na escala Shore D (amostras rígidas) encontram-se na tabela 3.12.

Tabela 3.12: Resultados dos ensaios de dureza na escala Shore D.

Tipo de resina	Dureza [Shore D]
Resina RI 1	79,0
Resina RI 1C1	81,0
Resina RI 1 C2	79,4
Resina RI 2	45,0
Resina RI 2C1	48,0

Nota: Na referência utilizada [24], não foi encontrado o valor de dureza de um polímero usado em isolamento elétrica.

As resinas com carga C1 e C2, apresentadas acima, possuem a mesma proporção de carga aditivadas (10:2 na mistura com a resina).

3.3.2.2 Resultado do ensaio mecânico de dureza da resina RI 1 com mica nas proporções de 10:1, 10:2, 10:3 e 10:4.

Os resultados do ensaio mecânico de dureza da resina RI 1 com mica nas proporções de 10:1, 10:2, 10:3 e 10:4 encontram-se na tabela 3.13.

Tabela 3.13: Dureza mecânica das resinas RI 1 e RI 1C2, com variação de proporções.

Localização dos pontos nas amostras	Amostras puras (10:0)	Amostras (10:1)	Amostras (10:2)	Amostras (10:3)	Amostras (10:4)
1	80,0	79,0	80,0	81,0	80,0
2	79,0	80,0	79,0	80,0	80,0
3	80,0	80,0	79,0	80,0	79,0
4	79,0	79,0	80,0	79,0	80,0
5	79,0	80,0	79,0	79,0	79,0
Média	79,4	79,6	79,4	79,8	79,6
Desvio-padrão	0,548	0,548	0,548	0,837	0,548

Na figura 3.13, é apresentada a curva dos resultados dos ensaios de dureza destes materiais.

Figura 3.13: Variação da dureza das resinas RI 1 e RI 1C2, com diferentes porcentagens de carga, em função dos 5 pontos diferentes das amostras.

3.3.2.3 Resultado da carga de compressão nos granitos sintéticos.

Os ensaios de compressão dos granitos sintéticos produzidos com as resinas poliuretanas em estudo foram realizados em uma máquina usada para ensaios em concreto. A norma técnica acompanhada foi a NBR 5739 [25], empregada em material de concreto,

com corpos de prova mais robustos, de forma também cilíndrica, com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Na figura 3.14, encontram-se os corpos de prova com rupturas após os ensaios de compressão.

Figura 3.14: Corpos de prova após o ensaio de compressão. Da esquerda para a direita, tem-se: granito sintético RI 1 e granito sintético RI2.

A carga foi aplicada continuamente com uma velocidade constante, e a tensão de ruptura a compressão foi obtida dividindo-se a carga de ruptura pela área transversal do corpo de prova.

Os resultados dos ensaios de tensão de compressão realizados nos granitos sintéticos GSRI 1 e GSRI 2 encontram-se nas tabelas 3.14 e 3.15, a seguir.

Tabela 3.14: Tensão de compressão no granito sintético GSRI 1.

Número dos corpos de prova	Força aplicada [kgf]	Tensão de compressão [kgf/cm ²]	Tensão de compressão [MPa]
1	9830	500,6	50,06
2	10400	529,7	52,97
3	9500	483,8	48,38
4	9500	483,8	48,38
5	9600	488,9	48,89
Média	9766	497,4	49,74
Desvio	379	19,3	1,93

Tabela 3.15: Ensaio de compressão no granito sintético GSRI 2.

Número dos corpos de prova	Força aplicada [kgf]	Tensão de compressão [kgf/cm ²]	Tensão de compressão [MPa]
1	4880	248,5	24,85
2	4230	215,4	21,54
3	4580	233,3	23,33
4	4000	203,7	20,37
5	4260	217,0	21,70
Média	4390	223,6	22,36
Desvio	343	17,5	1,75

A curva característica dos valores de tensão de compressão nos granitos sintéticos nas cinco amostras encontra-se na figura 3.15.

Figura 3.15: Ensaios de compressão do granito sintético GSRI 1 e GSRI 2.

Na figura 3.15, pode-se observar que o granito sintético GSRI 1 possui aproximadamente o dobro da tensão de compressão do granito sintético GSRI 2, do mesmo modo que as resinas puras.

3.4 Ensaios térmicos nas resinas e nos compostos.

3.4.1 Procedimentos dos ensaios térmicos nas resinas e compostos.

Os ensaios térmicos foram realizados para determinar a temperatura de transição vítrea e a temperatura de decomposição das resinas [26].

Os equipamentos utilizados foram ajustados de acordo com os procedimentos das normas técnicas [27], e estão identificados no anexo B. São eles: DMA (Análise Dinâmico-

Mecânica) e TG (Termogravimetria). As informações sobre essas técnicas encontram-se no Apêndice A.

No ensaio térmico, para determinar a temperatura de transição vítrea, usou-se 1 corpo de prova retangular de 60 x 12 mm com espessura de 3,0 mm. E para determinar a temperatura de decomposição foram necessárias apenas pequenas quantidades dos materiais (em torno de 10 miligramas).

Na figura 3.16, apresenta-se uma fotografia com os equipamentos que foram utilizados para os ensaios térmicos.

Figura 3.16: Equipamentos utilizados nos ensaios térmicos. Da direita para esquerda: DMA (Análise Dinâmico Mecânica), TG (Análise Termogravimétrica), processador termoanalisador 2000 (microcomputador) e DSC (Calorimetria Diferencial de Varredura).

As condições dos ensaios foram:

- Análise Dinâmico-Mecânica: corpo de prova retangular de 60 x 12 mm com espessura de 3,0 mm; método de frequência fixa de 1Hz; modo de flexão em 3 pontos; amplitude de 0,50 mm; e taxa de aquecimento de 5 °C/min; e
- Termogravimetria: 10 mg de massa; taxa de aquecimento de 10 °C/min; atmosfera de nitrogênio; e 50ml/min de fluxo de nitrogênio.

3.4.2 Resultados dos ensaios térmicos nas resinas e nos seus compósitos.

Os resultados dos ensaios térmicos nas resinas e nos seus compósitos também foram divididos em duas partes, e serão apresentados nos itens subsequentes:

- Resultados dos ensaios térmicos das resinas com negro de fumo e sílica (carga C1); e
- Resultados dos ensaios térmicos na resina RI 1 com mica (carga C2).

3.4.2.1 Resultados dos ensaios térmicos das resinas com negro de fumo e sílica.

Os resultados dos ensaios térmicos das resinas com os seus compósitos RI 1C1 e RI 2C1 encontram-se na tabela 3.16, apresentada a seguir.

Tabela 3.16: Ensaios térmicos: temperatura de transição vítrea (T_g) e temperatura de decomposição (T_{id}).

Tipo de resina	T_g [°C]	T_{id} [°C]
Resina RI 1	70,0	260,8
Resina RI 1C1	69,0	265,9
Resina RI 2	-----	255,8
Resina RI 2C1	-----	259,6

Não foi possível determinar o valor da temperatura de transição das resinas RI 2 e RI 2C1, com os recursos utilizados no DMA, em razão de seus valores estarem abaixo da temperatura ambiente. Por essa razão, não foram confeccionadas amostras da resina RI 2 com carga C2, porque essa resina apresentou características térmicas desfavoráveis para as condições de uso em ambiente externo, onde as temperaturas são superiores à ambiente.

As curvas características do ensaio de transição vítrea das resinas RI 1 e RI 1C1 são apresentadas na figura 3.17.

Figura 3.17: Variação da temperatura com os valores de tangente delta para determinação da temperatura de transição vítrea: (a) resina RI 1 e (b) resina RI 1C1. Instrumento DMA 983 da Du Pont Instruments, Modelo 983001.918.

Também foi constatado que a amostra da resina RI 1, após o ensaio no DMA, alterou sua cor de amarelo claro para amarelo escuro.

As curvas características do ensaio de determinação da temperatura de decomposição das resinas são apresentadas na figura 3.18.

Figura 3.18: Variação da temperatura com as porcentagens de massa para a determinação da temperatura de decomposição das resinas: (a) RI 1; (b) RI 1C1; (c) RI 2 e (d) RI2C1.

Instrumento TA da Du Pont Instruments.

3.4.2.2 Resultados dos ensaios térmicos das resinas com mica.

Na figura 3.19, são apresentadas as curvas dos resultados da temperatura de transição vítrea desses materiais.

Figura 3.19: Resultados da temperatura de transição vítrea da resina RI 1 nas seguintes proporções de mica: (a) 10:0; (b) 10:1; (c) 10:2; (d) 10:3; e (e) 10:4.

Os resultados dos ensaios térmicos da resina RI 1 com as diferentes proporções de mica encontram-se na tabela 3.17 a seguir.

Tabela 3.17: Temperaturas de transição (T_g) e de decomposição inicial (T_{id}) da resina RI 1 com diferentes proporções de mica.

Características térmicas	Amostras: 10:0 (sem carga)	Amostras: 10:1 de mica	Amostras: 10:2 de mica	Amostras: 10:3 de mica	Amostras: 10:4 de mica
T_g [°C]	70,0	71,0	70,0	69,0	68,0
T_{id} [°C]	260,8	257,1	262,2	262,0	259,2

Na figura 3.20, são apresentadas as curvas dos resultados da temperatura de decomposição da resina RI 1 com as diferentes proporções de mica.

Figura 3.20: Resultados da temperatura de decomposição da resina RI 1 com as diferentes proporções de mica: (a) 10:1; (b) 10:2; (c) 10:3; e (d) 10:4.

Como pode ser observado, diferentemente do que se esperava, o acréscimo da mica não alterou o valor da temperatura de transição vítrea e da temperatura de decomposição da resina RI 1. A figura 3.21 demonstra essa semelhança nos resultados de temperatura de transição vítrea.

Figura 3.21: Variação da temperatura de transição da resina RI 1 com as diferentes proporções de cargas acrescentadas.

Porém houve um aumento nas características dos módulos de armazenamento e de perda, conhecido como E' e E'' respectivamente, e detectado no ensaio de DMA como mostra a figura 3.22.

Figura 3.22: Curvas obtidas no ensaio de DMA da resina RI sem carga.

Onde: E' é o módulo de elasticidade de armazenamento do material dado em GPa; E'' é o módulo de perda dado em MPa; e **tangente delta** é a relação do E'' com E' , e foi o fator usado para analisar a temperatura de transição.

O aumento dos valores dos módulos de elasticidade de armazenamento e de perda desses materiais para uma temperatura ambiente de 29,9 °C é apresentada na tabela 3.18.

Tabela 3.18: Variação dos módulos E' e E'' da resina RI 1 com as diferentes proporções de mica.

Características mecânica	Amostras: 10:0 (sem carga)	Amostras: 10:1 de mica	Amostras: 10:2 de mica	Amostras: 10:3 de mica	Amostras: 10:4 de mica
E' [GPa]	1,668	1,679	1,829	2,629	3,036
E'' [MPa]	78,45	99,29	111,2	140,5	162,1

3.5 Conclusões.

As resinas com cargas negro de fumo e sílica acrescidas, em relação às resinas sem cargas, obtiveram uma variação maior nos resultados de cada amostra e uma pequena diminuição nos valores de resistividade volumétrica e superficial, aumentando-se conseqüentemente a condutividade. Em relação ao ensaio de rigidez dielétrica, verificou-se uma diminuição nos resultados, embora eles tenham sido aprovados para a aplicação em isoladores elétricos. O comportamento da variação das características elétricas dessas resinas não é linear à sua espessura. Em corpos de prova com espessuras de 1 mm, os valores de rigidez dielétrica das resinas RI 1 e RI 2 foram 28,9 kV/mm e 31,2 kV/mm [1], respectivamente.

No caso da carga mica que foi acrescentada com a finalidade de melhorar o valor da temperatura de transição vítrea nas resinas, não foram realizados os ensaios elétricos em função da não-obtenção do objetivo principal, que era aumentar o valor da temperatura de transição vítrea, mesmo variando as proporções de mica de 10:1, 10:2, 10:3 e 10:4. A temperatura de decomposição, como os ensaios de tração e dureza, também não teve alteração importante em seus valores, embora existisse um acréscimo nas características viscoelásticas dos polímeros, aumentando os módulos de armazenamento e de perda.

Os ensaios de temperatura de transição vítrea foram feitos somente nas resinas RI 1 pura e com carga. Não foram realizados na resina RI 2 (pura e com carga) porque elas apresentam valores abaixo da temperatura ambiente. O uso de uma célula com nitrogênio líquido no aparelho DMA, para determinar a temperatura de transição vítrea que se encontra abaixo da temperatura ambiente, foi descartado porque esta faixa de temperatura não

apresenta interesse nas aplicações em isolações elétricas comuns de áreas externas, nas quais os materiais isolantes ficam expostos a temperaturas que variam muito, com valores superiores aos da ambiente.

As curvas de decomposição dos polímeros sem cargas estudados possuem duas etapas de decomposição: a primeira inicia-se a partir de 260,8 °C na RI e 255,8 °C na RI 2; a segunda, a partir de 420 °C. A primeira decomposição está relacionada ao rompimento das ligações uretana, visto que está presente em maior quantidade no polímero. A segunda decomposição, que termina em aproximadamente 500 °C, está relacionada à decomposição da ligação éster presente no poliol.

Nas características térmicas e mecânicas, com exceção da tensão de compressão da RI 1C2, tanto a carga C1 (negro de fumo e sílica) quanto a carga C2 (mica) **nas proporções especificadas** não apresentaram alteração significativa nas resinas, deixando evidente a sua utilização em isoladores para uso de serviço em ambientes internos com temperatura em torno de 60° C.

Nas figuras 3.10 e 3.11, pode-se verificar a deformação nas resinas em função da tensão de tração a que foi submetida. A resina RI 1 e os compósitos RI 1C1 e RI 1C2 alongam-se muito pouco em função da tensão de tração, caracterizando-se como materiais não elásticos, enquanto que a RI 2 e a RI 2C1 possuem comportamento característicos de elastômeros, alongando-se linearmente com o aumento da tensão e suportando um valor menor. Das figuras 3.9(c) e 3.11(c), pode-se inferir a qualidade da mistura usada na preparação das amostras, que, por estarem todos os valores de resistências máximos de cada amostra muito próximos, encontra-se homogeneizada

Nas resinas RI 1, RI 2 e RI 2C1, os comportamentos são os mesmos nos ensaios de compressão e tração, resultando em comportamento de material duro e tenaz no caso da RI 1, e comportamento de materiais duros e frágeis nas outras duas.

Analisando-se os resultados dos ensaios de dureza nos materiais, verifica-se que a resina RI 1 pura ou com cargas C1 ou C2 são consideradas materiais com durezas rígidas de acordo com a escala Shore D, e também, possuem quase o dobro da dureza das resinas RI 2 e RI 2C1. A adição de cargas favoreceu muito pouco essa característica nas resinas, considerando-se os aumentos dos valores dentro da faixa de erro da leitura.

Com as amostras de granito sintético RI 1, de granito sintético RI2 e da resina RI 1C2 (com mica), os resultados do ensaio mecânico de compressão apresentaram uma

diminuição bem significativa no valor da tensão de ensaio em relação às resinas puras, devido ao agregado de granito natural.

Portanto, diante desses resultados, pôde-se concluir que essas resinas e seus compósitos poderão ser aplicados, a princípio, em isoladores poliméricos para uso em ambiente interno, pelo fato de se adequarem melhor às solicitações térmicas e mecânicas das condições de serviço desse tipo de isolador.

Capítulo 4:

Fabricação dos isoladores de resina e de granito sintético.

4.1 Introdução.

Os processos de fabricação dos isoladores de resina e dos isoladores de granito sintético à base de resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona, que serão descritos neste capítulo, referem-se a uma produção laboratorial desenvolvida neste trabalho de pesquisa, sem comprometimento com um processo industrial em grande escala.

Antes das descrições dos processos de fabricação dos isoladores, é de fundamental importância apresentar também a sequência de confecção da matriz de moldagem desenvolvida. Assim, serão apresentados os seguintes assuntos nos itens subsequentes:

- Processo de confecção da matriz dos isoladores do tipo Suporte;
- Processo de fabricação dos isoladores de resina e de compósito;
- Processo de fabricação dos isoladores de granitos sintéticos; e
- Materiais utilizados na fabricação dos isoladores.

4.2 Processo de confecção da matriz do isolador polimérico.

Objetivando-se a praticidade e durabilidade da matriz do isolador de Suporte em estudo, optou-se por desenvolver uma matriz moldada com elastômero de silicone, de cor transparente.

Esse elastômero é um produto bicomponente, formado de base e catalisador, de média viscosidade. Ao misturar os componentes na proporção de 10:1 em massa, cura-se à temperatura ambiente e forma-se um elastômero de silicone rígido, resistente ao rasgo. Em comparação com o elastômero de silicone branco que foi utilizado numa matriz anterior e que se encontra descrita no anexo C, o elastômero de silicone transparente possui o dobro do preço, maior durabilidade e maior visibilidade de preenchimento no momento da moldagem, enquanto que o processo de preparação é semelhante para ambos.

Para a fabricação da matriz de moldagem, construiu-se uma caixa de náilon, cujas dimensões também se encontram-se no anexo C.

Uma das principais preocupações no projeto da matriz foi a construção dos canais para a saída de ar e para a entrada dos materiais, no sentido horizontal do isolador, localizados nos pontos críticos da matriz onde o aparecimento das bolhas de ar é mais comum.

A seqüência do processo de fabricação da matriz do isolador do tipo Suporte foi dividida em oito fases que são demonstradas a seguir nas figuras de números 4.1 a 4.10.

- a) **Fase 1:** Preparar 220 g de elastômero de silicone transparente e vertê-lo dentro do suporte colocado na parte inferior do isolador de epóxi, usado como referência, para a confecção da rosca do isolador.

Figura 4.1: Primeira fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Suporte.

Observação: Foram utilizados tubos de PVC na parte inferior e na parte superior do isolador para confeccionar as duas roscas de silicone.

- b) **Fase 2:** Preparar 380 g de elastômero de silicone transparente e repetir o procedimento da primeira fase para a confecção da rosca da parte superior do isolador.

Figura 4.2: Segunda fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Suporte.

Observa-se que o tempo de cura do elastômero de silicone transparente é de aproximadamente vinte e quatro horas.

- c) **Fase 3:** Colocar as roscas no isolador de epóxi, usado como modelo, e posicioná-lo dentro da caixa de náilon.

Figura 4.3: Terceira fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Suporte.

- d) **Fase 4:** Preparar 1.480 g de elastômero de silicone transparente e vertê-lo dentro da caixa de náilon até a metade do isolador de epóxi usado como modelo.

Figura 4.4: Quarta fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Suporte.

- e) **Fase 5:** Desmoldar essa parte inferior da matriz e lixá-la, deixando-a com a superfície plana.

Figura 4.5: Quinta fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Suporte.

- f) **Fase 6:** Com o auxílio da furadeira, fazer quatro furos de 6,0 mm, os quais servirão como guia de montagem da matriz e colocar um suporte na parte inferior do isolador, para deixar o espaço que corresponderá à entrada de material polimérico.

Figura 4.6: Sexta fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Suporte.

- g) **Fase 7:** Preparar 1.400 g de elastômero de silicone transparente e vertê-lo dentro da caixa até cobrir por inteiro o isolador de epóxi, usado como referência.

Figura 4.7: Sétima fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Suporte.

A numeração existente na caixa de náilon tem como objetivo orientar a sua montagem correta de acordo com a matriz de elastômero de silicone.

- h) **Fase 8:** Fazer furos com o auxílio de uma furadeira, na parte superior da matriz de silicone, para funcionar como saídas de ar.

Figura 4.8: Oitava fase para a confecção da matriz do isolador do tipo Suporte.

Finalizando, na figura 4.9 são apresentadas as partes da matriz final do isolador polimérico do tipo Suporte.

Figura 4.9: Matriz final dos isoladores do tipo Suporte: (a) partes individuais; e (b) montagem final.

Essa matriz do isolador foi aprovada após várias alterações realizadas no projeto, conforme é apresentado no anexo C.

A seguir, são apresentados os processos de fabricação dos isoladores de resinas e de seus compósitos.

4.3 Processo de fabricação dos isoladores de resina e de compósito.

Além do projeto adequado da matriz, um outro fator que contribuiu para a melhoria da moldagem dos isoladores poliméricos foi o aperfeiçoamento da produção das resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona, onde os componentes das resinas resultaram em menos bolhas de ar quando misturados no processo de moldagem, aumentando a qualidade do material final.

No entanto, o procedimento de confecção dos isoladores também teve o seu processo aperfeiçoado ao longo do tempo, e a seqüência final foi dividida em onze fases que são apresentadas nas figuras de números 4.10 a 4.19.

- a) **Fase 1:** Pesar a carga a ser utilizada e colocar para secar numa estufa a 150 °C durante 20 minutos. Após essa secagem, deixar a carga esfriar durante duas horas dentro da estufa.

Figura 4.10: Primeira fase para a confecção do isolador de resina.

- b) **Fase 2:** Passar a vaselina sólida, como desmoldante, na matriz de silicone para protegê-la e posicionar os insertos de metal nas rosca da matriz do isolador.

(a)

(b)

Figura 4.11: Segunda fase para a confecção do isolador de resina: (a) passar a vaselina como desmoldante; e (b) posicionar os insertos de metal na matriz.

- c) **Fase 3:** Colocar fita adesiva em volta da matriz para auxiliar em sua vedação e depois colocá-la dentro da caixa de náilon, utilizando-se um suporte em volta da caixa para prender as rosca de silicone.

(a)

(b)

Figura 4.12: Terceira fase para a confecção do isolador de resina: (a) fita adesiva enrolada na matriz; e (b) matriz dentro da caixa de náilon.

- d) **Fase 4:** Pesar o polioliol numa balança semi-analítica.

Figura 4.13: Quarta fase para a confecção do isolador de resina.

- e) **Fase 5:** Acrescentar a carga com o auxílio de uma balança semi-analítica ao polioliol e misturar durante três minutos com um misturador elétrico.

(a)

(b)

Figura 4.14: Quinta fase para a confecção do isolador de resina: (a) acrescentar a carga; e (b) misturar.

Observação: Esta quinta fase não é realizada na confecção do isolador de resina pura, sem carga.

- f) **Fase 6:** Efetuar vácuo na mistura (polioliol com a carga) durante 5 minutos.

Figura 4.15: Sexta fase para a confecção do isolador de resina.

- g) **Fase 7:** Retirar a mistura (poliol com a carga) do vácuo, acrescentar o pré-polímero, misturar durante 2 minutos e realizar vácuo novamente durante 3 minutos.
- h) **Fase 8:** Verter vagarosamente o compósito ou a resina pura dentro da matriz.

(a)

(b)

Figura 4.16: Oitava fase para a confecção do isolador de resina: (a) compósito; e (b) resina pura (sem carga).

- i) **Fase 9:** Tampar a matriz e aguardar 6 horas para desmoldagem do isolador polimérico.

Figura 4.17: Nona fase para a confecção de resina.

Observação: O tempo de cura total das resinas ou de seus compósitos é 24 horas.

- j) **Fase 10:** Após o tempo de cura de 24 horas do material polimérico, desmoldar o isolador e retirar as suas rebarbas com auxílio de serras.

Figura 4.18: Décima fase para a confecção do isolador de resina: (a) desmontagem da caixa de náilon; (b) isolador com o acabamento final após a retirada das rebarbas.

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

Figura 4.19: Décima primeira fase para a confecção do isolador de resina.

Portanto, o tempo total para a confecção dos isoladores de resina e de seus compósitos é de aproximadamente 9 horas, sendo ele dividido em:

- 20 minutos para a secagem da carga ou do granito natural na estufa;
- 2 horas para a carga 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 cura do material polimérico.

Comparando-se com o isolador tradicional de porcelana, que tem um tempo maior de fabricação, o isolador polimérico possui maior facilidade de manuseio do processo de fabricação, além de precisar de um local com uma área física menor e de menos mão-de-obra para a sua produção. Enquanto que ele e o isolador tradicional de epóxi exigem um tempo total de fabricação semelhante e também uma área física menor para a sua fabricação.

Na figura 4.20, é apresentado o esquema resumido do processo de fabricação dos isoladores de resina e de seus compósitos.

Figura 4.20: Esquema resumido do processo de fabricação dos isoladores de resina pura e com carga.

4.4 Processo de fabricação do isolador de granito sintético.

A matriz utilizada na fabricação dos isoladores de resinas e de compósitos, apresentada no item 4.2, é a mesma utilizada na confecção dos isoladores de granito sintético.

A principal diferença entre os isoladores de granito sintético e os demais encontra-se no seu processo de fabricação, em que é necessário vibrar o material e inverter a posição da matriz após a introdução do material, para uma melhor acomodação das britas de granito.

A sequência do processo de fabricação dos isoladores do tipo Suporte foi dividida em treze fases que são apresentadas nas figuras de números 4.21 a 4.32.

- l) **Fase 1:** Pesar a carga a ser utilizada, e colocar para secar numa estufa à 150 °C durante 20 minutos. Após essa secagem, deixar a carga esfriar durante duas horas dentro da estufa.

Figura 4.21: Primeira fase para a confecção do isolador de granito sintético.

- m) **Fase 2:** Passar o desmoldante vaselina na matriz de silicone para protegê-la e posicionar os insertos de metal nas roscas da matriz do isolador.

(a)

(b)

Figura 4.22: Segunda fase para a confecção do isolador de granito sintético: (a) passar a vaselina como desmoldante; e (b) posicionar os insertos de metal na matriz.

- n) **Fase 3:** Passar fita adesiva em volta da matriz para auxiliar sua vedação e depois colocá-la dentro da caixa de náilon, utilizando um suporte em volta da caixa para prender as roscas de silicone.

(a)

(b)

Figura 4.23: Terceira fase para a confecção do isolador de granito sintético: (a) fita adesiva enrolada na matriz; e (b) matriz dentro da caixa de náilon.

- o) **Fase 4:** Pesar o polioli numa balança semi-analítica.

Figura 4.24: Quarta fase para a confecção do isolador de granito sintético.

- p) **Fase 5:** Acrescentar o granito natural com o auxílio de uma balança semi-analítica ao polioli e misturar manualmente durante três minutos.

(a)

(b)

Figura 4.25: Quinta fase para a confecção do isolador de granito sintético: (a) acrescentar o granito natural; e (b) misturar.

- q) **Fase 6:** Efetuar vácuo na mistura (poliol com a carga) durante 5 minutos.

Figura 4.26: Sexta fase para a confecção do isolador de granito sintético.

- r) **Fase 7:** Retirar a mistura (poliol com o granito natural) do vácuo, acrescentar o pré-polímero e depois misturar manualmente durante 2 minutos.

Figura 4.27: Sétima fase para a confecção do isolador de granito sintético.

- s) **Fase 8:** Efetuar vácuo na mistura de granito sintético durante 3 minutos.

- t) **Fase 9:** Verter metade do granito sintético dentro da matriz com o auxílio de uma espátula.

Figura 4.28: Nona fase para a confecção do isolador de granito sintético.

- u) **Fase 10:** Verter a outra metade do granito sintético dentro da matriz sob uma mesa vibratória, para melhor acomodação do material.

Figura 4.29: Décima fase para a confecção do isolador de granito sintético.

- v) **Fase 11:** Retirar a matriz da mesa vibratória, tampá-la com uma placa de náilon, inverter a sua posição e aguardar 6 horas para a desmoldagem do isolador polimérico.

(a)

(b)

Figura 4.30: Décima primeira fase para a confecção do isolador de granito sintético: (a) colocar uma tampa; e (b) inverter a posição da caixa de náilon.

Observação: O tempo de cura total do granito sintético é de 24 horas.

- w) **Fase 12:** Efetuar a limpeza dos utensílios utilizados na confecção dos isoladores poliméricos com o auxílio de estopa e solvente (acetona).

Figura 4.31: Décima segunda fase para a confecção do isolador de granito sintético.

Observação: Esta fase é feita antes de o material estar curado devido à sua dificuldade de limpeza.

- x) **Fase 13:** Após o tempo de cura de 24 horas do material polimérico, desmoldar o isolador e retirar as suas rebarbas com auxílio de ferramentas diamantadas.

(a)

(b)

Figura 4.32: Décima terceira fase para a confecção do isolador de granito sintético: (a) desmontagem da caixa de náilon; (b) isolador com o acabamento final após a retirada das rebarbas.

Portanto, o tempo total para a confecção dos isoladores de granito sintético é semelhante ao dos isoladores de resina, de aproximadamente 9 horas, dividido em:

- 20 minutos para a secagem da carga ou do granito natural na estufa;
- 2 horas para a carga 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 cura do material polimérico.

Na figura 4.33, é apresentado o esquema resumido do processo de fabricação dos isoladores de granito sintético.

Figura 4.33: Esquema resumido do processo de fabricação dos isoladores de granito sintético.

4.5 Materiais utilizados na fabricação dos isoladores.

4.5.1 Quantidades dos componentes utilizados na fabricação dos isoladores.

As quantidades dos componentes utilizados na produção dos isoladores de resina e de granito sintético do tipo Suporte dependem do tipo de resina empregada e das cargas empregadas.

A proporção do pré-polímero em relação ao poliol da resina RI 1 é de 1:1, enquanto que a da resina RI 2 é 1:1,75, respectivamente. As tabelas 4.1 e 4.2 a seguir apresentam as quantidades dos componentes utilizados na fabricação dos isoladores poliméricos em estudo.

Tabela 4.1: Quantidade dos componentes utilizados nos isoladores à base de resina RI1.

Tipo de isolador	Pré-polímero A249 (g)	Poliol B25015 (g)	Pigmento: negro de fumo (g)	Carga: Sílica (g)	Carga: mica (g)	Granito natural (g)	* Total (g)
RI 1	400,0	400,0	---	---	---	---	800,0
RI 1C1	370,0	370,0	14,8	148,0	---	---	902,8
RI 1C2	370,0	370,0	---	---	148,0	---	888,0
GSRI 1	176,0	176,0	---	---	---	1.179,0	1.531,0

Tabela 4.2: Quantidade dos componentes utilizados nos isoladores à base de resina RI2.

Tipo de isolador	Pré-polímero A253 (g)	Poliol B351 (g)	Pigmento: negro de fumo (g)	Carga: Sílica (g)	Carga: mica (g)	Granito natural (g)	* Total (g)
RI 2	291,0	509,3	---	---	---	---	800,3
RI 2C1	260,1	470,9	14,8	148,0	---	---	902,8
RI 2C2	269,1	470,9	---	---	148,0	---	888,0
GSRI 2	128,0	224,0	---	---	---	1.179,0	1.531,0

**Nota:* Embora os volumes dos materiais utilizados nos isoladores sejam iguais, as quantidades totais deles em massa são diferentes porque eles possuem densidades diferentes.

Como foi utilizado o granito natural com três tamanhos diferentes de britas, a tabela 4.3 apresenta a quantidade de cada brita utilizada nos granitos sintéticos GSRI 1 e GSRI 2.

Tabela 4.3: Quantidades das britas utilizadas nos granitos sintéticos, GSRI 1 e GSRI 2.

Tamanho da brita de granito natural	Quantidade (g)
Brita de 4,0 mm	589,0
Brita de 2,0 mm	354,0
Pó de granito (< 2,0 mm)	236,0
Total	1.179,0

4.5.2 Preços estimados das resinas utilizadas na fabricação dos isoladores.

Neste trabalho não será apresentada a comparação de preço entre os isoladores desenvolvidos e os isoladores poliméricos comerciais, por causa da complexidade existente num cálculo de custo de um novo produto que não tem a sua linha de produção definida. Por isso, esse assunto se enquadrará melhor numa nova pesquisa que inclua as áreas de engenharia de produção e de economia, onde serão discutidos itens como, por exemplo, desgaste de máquinas, levantamento de produção, gastos com encargos sociais e tributários.

Os preços estimados das resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona, RI 1 e RI 2, em grande escala são: R\$50,00 (US\$17,99)¹ e R\$25,00 (US\$8,99)¹, respectivamente. E sabendo-se que o preço final do isolador de epóxi usado como referência é de R\$30,50 (US\$10,79)¹, estima-se, também, que parte dos isoladores desenvolvidos apresentem preços competitivos no mercado, de acordo com os dados apresentados na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Custo da principal matéria prima dos isoladores poliméricos desenvolvidos.

Tipo de isolador	Custo com a resina utilizada no isolador (R\$)	Custo com a resina utilizada no isolador (US\$) ¹
RI 1	40,00	14,39
RI 1C1	37,00	13,31
RI 1C2	37,00	13,31
GSRI 1	17,60	6,33
RI 2	20,01	7,20
RI 2C1	18,28	6,58
RI 2C2	18,28	6,58
GSRI 2	8,80	3,17

¹ Cotação do dólar comercial efetuada no dia 21 de junho de 2002 (US\$1,00 a R\$2,78). 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.

No entanto, **estima-se** que os isoladores produzidos com a resina RI 2 e com os compósitos RI 2C1 e RI 2C2 possam ter custos menores que o do isolador de epóxi, usado como referência. Porém, esses isoladores não poderão ser comercializados porque eles não apresentaram características mecânicas adequadas para a sua aplicação em instalação elétrica, conforme será apresentado no capítulo 5.

Portanto, conclui-se que dentre os demais isoladores, destacam-se os que são produzidos com os granitos sintéticos e que possuem somente 23% de resina, por eles possivelmente apresentarem, em escala industrial, preços competitivos com os isoladores poliméricos comerciais.

Capítulo 5:

Caracterização dos isoladores poliméricos face às condições de serviço.

5.1 Introdução.

Para a caracterização dos isoladores poliméricos fabricados com resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona, foram desenvolvidos inúmeros ensaios que reproduziram as suas reais condições de serviço.

Os procedimentos desses ensaios realizados, bem como seus resultados encontram-se apresentados neste capítulo, nos seguintes tópicos:

- Ensaio de envelhecimento acelerado;
- Ensaio elétrico com tensão alternada e frequência industrial; e
- Ensaio mecânicos de flexão e de compressão.

Os isoladores poliméricos submetidos aos ensaios foram: Isolador RI 1; Isolador RI 2; Isolador RI 1C1; Isolador RI 2C1; Isolador RI 1C2; Isolador RI 2C2; Isolador GSRI 1; Isolador GSRI 2; e Isolador de epóxi.

5.2 Ensaio de envelhecimento acelerado nos isoladores poliméricos.

5.2.1 Procedimentos do ensaio de envelhecimento acelerado.

O ensaio de envelhecimento acelerado teve como finalidade analisar o comportamento elétrico dos isoladores poliméricos fabricados com as resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona diante de sua suportabilidade às condições ambientais e à intempérie.

Procedimentos do ensaio de envelhecimento acelerado:

- o ensaio foi realizado no aparelho Atlas *Weather-Ometer*, com um fator de aceleração igual a seis, aproximadamente. Pelo fato de os materiais dos quais foram fabricados os novos isoladores poliméricos serem inéditos, adotou-se esse fator de aceleração, que é considerado mais crítico [28]; e

- dividiu-se esse ensaio em duas etapas para a avaliação do comportamento elétrico nesses novos isoladores, a fim de proporcionar uma análise com maior segurança nas condições de serviço. Na primeira etapa, foi utilizado um tempo total de envelhecimento na máquina de 2.500 horas, que equivale a aproximadamente 1 ano e 8,5 meses de envelhecimento natural, para depois serem realizados os ensaios elétricos. E, na segunda fase, o envelhecimento foi realizado até atingir 5.000 horas, que simula aproximadamente 3,5 anos de envelhecimento natural [28].

5.2.2 Resultados do ensaio de envelhecimentos acelerado.

Os resultados dos ensaios realizados nos isoladores foram divididos de acordo com o tipo de ensaios. No de envelhecimento acelerado de 5.000 horas, os resultados basearam-se na inspeção visual nos isoladores para análise do comportamento dos materiais dielétricos submetidos a esse tipo de solicitação, e os critérios utilizados para essa verificação foram: alteração na cor; existência de rachaduras e microtrincas; e deformação.

Na primeira fase do ensaio de envelhecimento acelerado de 2.500 horas, houve alteração somente nas cores dos isoladores para uma tonalidade de amarelo mais escuro. E na segunda fase, em que os isoladores ficaram submetidos ao ensaio durante 5.000 horas, não houve diferença significativa em relação à primeira fase, e os isoladores continuaram com as cores comprometidas. E também, nas duas fases, não houve nenhum tipo de deformação e de rachaduras nos isoladores. Contudo, como modo de apresentação desses resultados foram tiradas fotografias após as 5.000 horas de ensaios de envelhecimento, que serão demonstradas nas figuras de números 5.1 a 5.9; observando que, elas foram colocadas em caráter ilustrativo porque as diferenças são muito sutis em relação à variação do brilho nos isoladores.

Figura 5.1: Isolador Suporte RI 2: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; e (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.

Figura 5.2: Isolador Suporte RI 1: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.

Figura 5.3: Isolador Suporte RI 2 C1: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; e (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.

Figura 5.4: Isolador Suporte RI 1 C1: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; e (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.

Figura 5.5: Isolador Suporte RI 2C2: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; e (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.

Figura 5.6: Isolador Suporte RI 1C2: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; e (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.

Figura 5.7: Isolador Suporte GSRI 1: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; e (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.

Figura 5.8: Isolador Suporte GSRI 2: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; e (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.

Figura 5.9: Isolador Suporte Epóxi: (a) lado submetido a maior radiação ultravioleta; e (b) lado oposto, submetido a menor radiação ultravioleta.

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.

5.3 Ensaio Elétrico nos isoladores poliméricos.

5.3.1 Simulação computacional do isolador do tipo Suporte.

Antes da realização dos ensaios elétricos, foi efetuada uma simulação computacional com a finalidade de verificar as partes críticas e a distribuição do campo elétrico ao longo do isolador polimérico do tipo Suporte, com auxílio de um programa baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). O MEF é uma consagrada ferramenta no mapeamento de campos elétricos e magnéticos em dispositivos e sistemas elétricos [29]. Com esse método, foi

possível mapear as regiões críticas do isolador polimérico quanto à suportabilidade elétrica, empregando-se o *software ANSYS* [30], que possui uma ampla gama de aplicações como ferramenta CAE (*Computer Aided Engineering*).

O processo de utilização do programa computacional *ANSYS* na simulação do isolador elétrico foi dividido basicamente em três partes [31]:

- Pré-processamento: que se iniciou com o desenho da seção transversal do isolador no programa *Auto Cad* e depois foi transportado para o Programa *ANSYS*. Neste trabalho, executou-se a análise no isolador do tipo Suporte, fabricado com a resina RI 1, adotando-se como condições de contorno: tensão elétrica de 13,8 kV na parte superior do isolador e 0,0V na parte próxima às roscas do mesmo.
- Processamento: em que foi executada a simulação e calculadas as tensões em cada elemento através da geração de matrizes geométricas. Para essa simulação empregou-se o regime estacionário.
- Pós-processamento: em que foi selecionada a característica elétrica e feita a análise do resultado.

O resultado obtido na simulação computacional para o isolador em estudo correspondeu à distribuição do campo elétrico ao longo do isolador do tipo Suporte, que é apresentada na figura 5.10.

Figura 5.10: Análise de elementos finitos no isolador do tipo Suporte com ângulo de 90°, geometria planissimétrica em relação ao campo elétrico (V).

Na figura 5.10, constata-se que a região crítica do isolador submetido a uma tensão elétrica encontra-se na parte superior do isolador (principalmente a representada pela cor vermelha), onde o campo elétrico é mais intenso, indicando que, caso haja falhas, elas ocorrerão nessa região e que as partes restantes do isolador assumem menor importância em face às solicitações elétricas.

Como exemplo de uma falha real ocorrida nessa região crítica do isolador, é apresentado na figura 5.11 um isolador de porcelana retirado da rede de distribuição de energia elétrica.

Figura 5.11: Defeito no dielétrico do isolador.

Portanto, embora esse estudo possua um aspecto qualitativo, foi possível observar que os resultados **computacional e de campo** apresentados são **concordantes**.

5.3.2 Procedimentos do ensaio elétrico.

Após as simulações computacionais, os ensaios elétricos nos isoladores foram efetuados objetivando-se confirmar as regiões críticas, através da detecção dos prováveis locais de ocorrências de falhas no dielétrico dos isoladores. Nesses ensaios, foi aplicada uma tensão elétrica alternada, com frequência industrial de 60 Hz, nos isoladores poliméricos, antes e depois deles ficarem expostos ao envelhecimento acelerado. A tensão elétrica foi aplicada até produzir descargas externas intermitentes com uma periodicidade de poucos segundos e com taxa uniforme de 500 V/s. Por ocasião dos ensaios, a temperatura manteve-se constante no valor de $23,3 \pm 5$ °C e a umidade relativa, no valor de 52 ± 5 %. A montagem dos isoladores no laboratório pode ser visualizada na figura 5.12, onde se pode observar a colocação de esferas equalizadoras de campo nas extremidades do condutor superior.

(a)

(b)

Figura 5.12: Ensaio elétrico nos isoladores poliméricos: (a) dispositivo de cobre; (b) tensão aplicada.

Para a realização do ensaio elétrico nos isoladores poliméricos envelhecidos, de uma forma mais prática, foi construído um dispositivo próprio que tornou possível o ensaio elétrico em quatro isoladores de uma só vez sem comprometer os resultados finais, conforme pode ser visualizado na figura 5.12-(a).

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.

5.3.3 Resultados dos ensaios elétricos nos isoladores antes e depois do envelhecimentos acelerado.

Diante dos resultados obtidos nas simulações computacionais, os ensaios elétricos foram realizados com atenção maior na região crítica do isolador, antes e após o seu envelhecimento acelerado. Em ambos casos, os isoladores não sofreram ruptura elétrica interna, atestando as excelentes qualidades elétricas dos seus dielétricos, embora alguns deles apresentassem algumas bolhas de ar em sua parte inferior.

Nestes casos, o arco elétrico, ocorrido entre os condutores superior e inferior, foi externo (no ar), denominado de *flashover* externo, e os seus resultados obtidos das tensões RMS (V_{RMS}) e das tensões 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 *antes* do ensaio de envelhecimento acelerado

Tipo de Isolador	V_{RMS} 1ª aplicação (kV)	V_{RMS} 2ª aplicação (kV)	V_{RMS} 3ª aplicação (kV)	Média V_{RMS} (kV)	Desvio Padrão V_{RMS}	Média $V_{pico\ instantânea}$ (kV)
RI 1	84,59	84,68	85,06	84,78	0,25	126,10
RI 1C1	83,30	84,02	83,63	83,65	0,36	124,60
RI 1C2	84,59	84,46	84,68	84,58	0,11	125,90
GSRI 1	87,16	84,97	86,64	86,26	1,14	122,00
RI 2	84,86	85,08	85,00	84,98	0,11	120,20
RI 2C1	84,23	85,69	85,42	85,11	0,78	126,80
RI 2C2	85,72	85,72	85,69	85,71	0,02	127,57
GSRI 2	84,91	84,10	83,30	84,10	0,81	118,90
Epóxi	80,17	82,00	81,30	81,57	0,92	114,80

Tabela 5.2: Tensão de ocorrência de flahover externo nos isoladores *depois* do ensaio de envelhecimento acelerado

Tipo de Isolador	V_{RMS} 1ª aplicação (kV)	V_{RMS} 2ª aplicação (kV)	Média V_{RMS} (kV)	Desvio Padrão V_{RMS}	Média $V_{pico\ instantânea}$ (kV)
RI 1	80,36	80,31	80,34	0,035	111,95
RI 1C1	80,36	80,31	80,34	0,035	111,95
RI 1C2	79,76	80,01	79,89	0,177	112,95
GSRI 1	79,76	80,01	79,89	0,177	112,95
RI 2	80,36	80,31	80,34	0,035	111,95
RI 2C1	80,36	80,31	80,34	0,035	111,95
RI 2C2	79,76	80,01	79,89	0,177	112,95
GSRI 2	79,76	80,01	79,89	0,177	112,95
Epóxi	79,95	80,10	80,03	0,106	112,90

Os resultados dos ensaios elétricos da tabela 5.2 correspondem ao envelhecimento acelerado de 5.000 horas de ensaio, uma vez que o desempenho elétrico dos isoladores foi semelhante aos obtidos durante 2.500 horas [31]. E eles apresentaram alguns valores iguais porque foram obtidos com o auxílio do dispositivo da figura 5.12-(a), que possibilita o ensaio em quatro isoladores simultaneamente.

A figura 5.13 mostra os resultados das tabelas 5.1 e 5.2 em forma de gráficos como alternativa de apresentação da pequena variação entre os valores.

Figura 5.13: Resultados dos ensaios elétricos nos isoladores: (a) antes do ensaio de envelhecimento acelerado; e (b) depois do ensaio de envelhecimento acelerado.

Considerando-se as condições ambientais dos ensaios, que foram realizados em dois dias distintos (antes e depois do ensaio de envelhecimento) e o *flashover* que ocorreu pelo ar, a variação entre os resultados obtidos não é significativa para a caracterização elétrica dos isoladores. Porém, observa-se que eles suportaram aproximadamente tensões *RMS* acima de 80 kV e tensões de pico (instantâneas) superiores a 110 kV.

5.4 Ensaios mecânicos nos isoladores poliméricos.

5.4.1 Procedimentos do ensaios mecânicos.

Os ensaios mecânicos nos isoladores poliméricos foram realizados com a finalidade de determinar os seus desempenhos quando submetidos às cargas à flexão e à compressão.

Para a realização do ensaio mecânico de flexão, foi elaborado também um dispositivo, procurando-se reproduzir exatamente as suas condições de serviço, cujo esquema e fotografia são apresentados na figura 5.14.

Figura 5.14: Dispositivo utilizado no ensaio mecânico de flexão dos isoladores: (a) esquema inicial do dispositivo; e (b) fotografia do dispositivo utilizado.

Nesse dispositivo, foi necessário utilizar um sistema de fixação dos isoladores bem resistente para obter-se resultados adequados às condições de serviço; portanto, diferentemente dos ensaios de envelhecimento e dos ensaios elétricos, optou-se por desenvolver os isoladores poliméricos com as suas roscas de fixação para a realização dos ensaios mecânicos. Para isso, projetaram-se insertos de metal com as dimensões das roscas-padrão do isolador de epóxi, usado como referência. A diferença entre os insertos encontra-se na parte exterior, onde o inserto do isolador de epóxi é de alumínio fundido e o do isolador em estudo é de alumínio usinado, conforme demonstra a figura 5.15.

Figura 5.15: Inseros de metal: (a) do isolador de epóxi; e (b) do isolador em estudo; (c) na parte superior do isolador GSRI 1 e (d) na parte inferior do isolador GSRII.

Observa-se na figura 5.15-(b), que foram usinados alguns canais na parte externa dos insertos para proporcionarem uma melhor aderência das resinas poliuretanas, uma vez que eles não possuem a superfície áspera igual à do inserto de metal fundido. A rosca superior é do tipo M12 com 25 mm de profundidade e a inferior, do tipo M16, com 50 mm de profundidade.

No caso do ensaio de compressão mecânica, foi utilizado o dispositivo próprio da Máquina Universal de Ensaio Mecânico, também chamado de célula de carga, conforme é demonstrado na figura 5.16.

Figura 5.16: Ensaio mecânico de compressão nos isoladores poliméricos: (a) dispositivo utilizado; e (b) sistema de aquisição de dados.

A Máquina Universal de Ensaio Mecânico utilizada é da marca INSTRON CORPORATION, modelo 5500 R, número de série 7010 com capacidade para 25 toneladas, e com aquisição de dados através do *software* Merlin Versão 4.0.

A velocidade dos ensaios que são parâmetros fundamentais para a avaliação dos resultados variou conforme o tipo de ensaio:

- Ensaio de flexão nos isoladores: 10 mm/min (constante);
- Ensaio de compressão nos isoladores: 5,0 mm/min (constante).

A princípio, iniciou-se o ensaio de flexão no isolador com a velocidade padronizada do ensaio em materiais que foi de 1,30 mm/minuto, segundo as normas da ASTM. Após esse ensaio preliminar, aumentou-se o valor da velocidade porque se verificou a necessidade de diminuir o tempo de ensaio, em torno de 300 segundos; por isso optou-se por velocidades maiores e diferenciadas de acordo com o tipo de ensaio.

5.4.2 Resultados dos ensaios mecânicos.

Os resultados dos ensaios mecânicos de flexão e de compressão dos isoladores poliméricos do tipo Suporte são apresentados nos itens subsequentes.

5.4.2.1 Comportamento dos isoladores sob carga de flexão.

Na análise dos resultados dos ensaios mecânicos, foi considerada uma classificação para cada tipo de ruptura mecânica em função do tipo de material ensaiado. De acordo com [32], foram adotadas as seguintes classificações para:

- ruptura dúctil: o material se deforma antes de romper; e
- ruptura frágil: o material se rompe praticamente sem qualquer deformação e sem nenhuma falha incipiente antes da ruptura.

Os isoladores do tipo Suporte produzidos com a resina RI 1, sob carga de flexão, apresentaram rupturas do tipo frágil, conforme demonstrado na figura 5.17.

(a)

(b)

Figura 5.17: Ensaio de flexão mecânica nos isoladores produzidos com a resina RI 1: (a) RI 1, (b) RI 1C1; (c) RI 1C2; e (d) GSRI 1.

Enquanto que os isoladores do tipo Suporte produzidos com a resina RI 2 sob carga de flexão, com exceção do isolador GSRI 2, apresentaram rupturas dúcteis conforme apresentado na figura 5.18.

Figura 5.18: Ensaio de flexão mecânica nos isoladores produzidos com a resina RI 2: (a) RI 2, (b) RI 2C1; (c) RI 2C2; e (d) GSRI 2.

Conforme demonstra a figura 5.18-(d), o isolador confeccionado com o granito sintético RI 2 apresentou uma ruptura do tipo frágil.

No entanto, o comportamento do isolador comercial do tipo Suporte produzido com a resina epóxi e usado como referência, sob carga de flexão, foi semelhante aos dos isoladores produzidos com a resina RI 1, apresentando uma ruptura do tipo frágil, conforme é apresentado na figura 5.19.

Figura 5.19: Ensaio de flexão mecânica no isolador comercial produzido com a resina epóxi.

Os valores obtidos nos ensaios de flexão mecânica encontram-se na tabela 5.3.

Tabela 5.3: Resultado do ensaio de flexão nos isoladores poliméricos com insertos.

Tipo de Isolador	Carga máxima de ruptura (kN)	Carga máxima de ruptura (daN)	Tempo de ensaio (s)	D.e. (mm)	Velocidade (mm/min)
RI 1	6,79	678,51	197,49	32,92	10,00
RI 1C1	5,65	564,59	222,30	37,05	10,00
RI 1C2	6,48	645,73	217,53	36,26	10,00
GSRI 1	4,90	490,35	90,00	15,00	10,00
RI 2	3,03	303,21	902,35	150,39	10,00
RI 2C1	* 3,48	348,36	720,95	120,16	10,00
RI 2 C2	* 3,54	354,19	796,84	132,81	10,00
GSRI 2	2,93	293,01	135,22	22,54	10,00
Epóxi	7,46	746,02	101,15	16,86	10,00

* Nota: Não foi possível determinar a carga de ruptura desses isoladores, porque houve descolamento do inserto do material elastomérico diante da sua grande deformação.

O valor médio e o desvio-padrão do ensaio de flexão nos isoladores confeccionados com a resina RI 1 foram 5,46 kN e 0,85, respectivamente. Enquanto que, no caso dos isoladores produzidos com a resina RI 2, foram, respectivamente, 3,25 e 0,31.

A carga nominal dos isoladores poliméricos foi considerada 75% da carga de ruptura, garantindo uma boa margem de segurança, conforme os dados descritos na tabela 5.4.

Tabela 5.4: Carga de flexão dos isoladores poliméricos com insertos.

Tipo de Isolador	Carga de flexão Nominal (kN)	Carga de ruptura à flexão (kN)
RI 1	5,09	6,79
RI 1C1	4,24	5,65
RI 1C2	4,86	6,48
GSRI 1	3,68	4,90
GSRI 2	2,20	2,93
Epóxi	5,60	7,46

As curvas características do ensaio de flexão nos isoladores produzidos com as resinas RI 1 encontram-se nas figuras 5.20 e 5.21.

Figura 5.20: Flexão mecânica nos isoladores poliméricos com insertos de metal produzidos com epóxi e com a resina RI 1, em relação à deformação específica do isolador no dispositivo montado para esse ensaio.

Figura 5.21: Flexão mecânica nos isoladores poliméricos com insertos de metal produzidos com epóxi e com a resina RI 1, em relação ao tempo.

As curvas características do ensaio de flexão nos isoladores produzidos com as resinas RI 2 encontram-se nas figuras 5.22 e 5.23.

Figura 5.22: Flexão mecânica nos isoladores poliméricos com insertos de metal produzidos com epóxi e com a resina RI 2, em relação à deformação específica do isolador no dispositivo montado para o ensaio.

Figura 5.23: Flexão mecânica nos isoladores poliméricos com insertos de metal produzidos com epóxi e com a resina RI 2, em relação ao tempo.

Embora os isoladores com insertos de metal sejam mais adequados para a análise dos ensaios mecânicos, o gráfico da figura 5.24 apresenta as curvas características de alguns isoladores sem insertos de metal fabricados com a resina RI 2, com a finalidade de demonstrar que eles suportaram cargas à flexão inferiores aos isoladores apresentados anteriormente.

Figura 5.24: Flexão mecânica nos isoladores poliméricos sem insertos de metal produzidos com a resina RI 2, em relação à deformação específica do isolador no dispositivo montado para o ensaio.

5.4.2.2 Comportamento dos isoladores sob carga de compressão.

Os comportamentos dos isoladores do tipo Suporte com insertos de metal, sob carga de compressão, são apresentados na figura 5.25.

Figura 5.25: Ensaio de compressão mecânica nos isoladores com insertos de metal:

(a) RI 1; (b) RI 2; (c) GSRI 1; e (d) GSRI 2.

Os isoladores produzidos com os insertos de metal tiveram rupturas semelhantes às dos isoladores produzidos sem os insertos e também às dos isoladores envelhecidos, conforme é apresentado na figura 5.26.

Figura 5.26: Ensaio de compressão no isoladores RI 1C2 sem insertos de metal: (a) isolador não envelhecido; (b) vista superior do isolador não envelhecido; (c) isolador envelhecido; e (d) vista lateral do isolador envelhecido.

Os ensaios mecânicos de compressão foram realizados primeiramente nos isoladores poliméricos sem insertos. Em seguida, eles foram repetidos em alguns isoladores com insertos, em função de os resultados não serem satisfatórios, porque apresentaram uma grande deformação por serem fabricados com materiais dúcteis. Portanto, o ensaio de compressão para determinar a carga de ruptura para esses materiais não tem sentido prático para a aplicação em isoladores elétricos, por causa de sua deformação plástica.

As curvas características dos ensaios de compressão realizados nos isoladores sem inserto de metal do tipo Suporte à base da resina RI 1 e do isolador com inserto de metal de epóxi encontram-se na figura 5.27.

(a)

(b)

Figura 5.27: Compressão mecânica nos isoladores poliméricos: (a) RI 1 sem os insertos de metal em relação ao tempo; e (b) RI sem insertos e epóxi com insertos em relação à deformação específica do isolador.

Na figura 5.27-(b), observa-se que o isolador de epóxi possui uma carga de ruptura superior à capacidade da máquina universal de ensaios utilizada, que é de 25.000 kgf (aproximadamente 245 kN).

As diferenças obtidas nos resultados dos ensaios de compressão dos isoladores com insertos, em relação aos isoladores sem insertos, encontram-se demonstradas nas curvas características da figura 5.28 a seguir.

Figura 5.28: Ensaio de compressão mecânica nos isoladores de resina RI I com inserto, em relação: (a) à deformação específica do ensaio; e (b) ao tempo.

Os insertos de metal juntamente com as resinas não favoreceram a resistência dos isoladores nos ensaios de compressão, como demonstram a figura 5.27 e a 5.28, porque os

isoladores com insertos suportaram uma carga inferior no início do ensaio. Isso se deve ao fato de os insertos se posicionarem nas extremidades dos isoladores e não possuírem uma base de apoio para maior sustentação.

Como os materiais produzidos com as resinas RI 2 possuem a metade da dureza dos materiais fabricados com as resinas RI 1, foi realizado somente o ensaio de compressão no isolador com inserto de metal fabricado com a resina RI 2 pura, porque os isoladores fabricados com os seus compósitos tenderiam a ter um comportamento semelhante e sem sentido prático para a aplicação como isoladores elétricos para alta tensão, que necessita de um comportamento mais resistente à carga de compressão. Suas curvas características encontram-se na figura 5.29.

Figura 5.29: Ensaio de compressão mecânica nos isoladores de resina RI 2, com insertos de metal, em relação: (a) à deformação específica do ensaio; e (b) ao tempo.

Em contrapartida, os isoladores com insertos de metal produzidos com granitos sintéticos apresentaram comportamentos diferentes dos isoladores anteriores, em relação ao ensaio de compressão. Eles revelaram características de materiais dúcteis, com a carga de ruptura visível, conforme demonstra a figura 5.30.

Figura 5.30: Ensaio de compressão mecânica nos isoladores de granito sintético, com insertos de metal, em relação: (a) à deformação específica do ensaio; e (b) ao tempo.

Os valores das cargas de ruptura obtidos nos ensaios de compressão dos isoladores de granitos sintéticos encontram-se na tabela 5.5.

Tabela 5.5: Ensaio de compressão nos isoladores com insertos de metal.

Tipo de Isolador	Carga de ruptura (kN)	Carga de ruptura (daN)	Tempo de ensaio (s)	D.e. (mm)	Velocidade (mm/min)
GSRI 1	129,80	12.979,74	56,11	4,68	5,00
GSRI 2	53,66	5.365,93	165,36	13,78	5,00
Epóxi	> 257,43	25.742,54	47,13	3,93	5,00

Nota: D.e.: deformação específica do isolador no ensaio de compressão mecânica.

A carga nominal à compressão dos isoladores poliméricos também foi considerada 75 % da carga de ruptura, garantindo uma boa margem de segurança, conforme os dados descritos na tabela 5.6.

Tabela 5.6: Carga de compressão dos isoladores com insertos de metal.

Tipo de Isolador	Carga de compressão nominal (kN)	Carga de ruptura à compressão (kN)
GSRI 1	97,35	129,80
GSRI 2	40,25	53,66
Epóxi	> 257,43	> 257,43

Portanto, resumindo, para uma análise adequada da carga nominal de compressão para os isoladores produzidos com as resinas poliuretanas em estudo, deve-se realizar o ensaio à compressão até uma deformação específica, determinada de acordo com o projeto de aplicação do isolador. Por exemplo, a tabela 5.7 apresenta os valores de carga à compressão dos isoladores com uma deformação (do isolador sob ensaio) de 2,0 mm.

Tabela 5.7: Carga de compressão dos isoladores com insertos de metal.

Tipo de isolador	Deformação específica do isolador (mm)	Carga à compressão (kN)
RI 1	2,0	4,64
RI 2	2,0	7,41
GSRI 1	2,0	53,27
GSRI 2	2,0	22,12
Epóxi	2,0	114,95

5.5 Conclusão.

No ensaio de envelhecimento acelerado, houve alteração somente nas cores dos isoladores devido ao fato de as ligações duplas, existentes na composição química das resinas utilizadas, sofrerem um processo de oxidação quando submetidas a altas temperaturas.

Em relação à simulação do campo elétrico, pôde-se evidenciar a região crítica do isolador quando submetido a uma tensão elétrica. E embora esses estudos possuam um aspecto **qualitativo**, foi possível observar que os resultados **computacional e de campo** apresentados são **concordantes**.

Diante dos resultados dos ensaios elétricos, verificou-se que não houve alteração no desempenho dos isoladores poliméricos submetidos ao envelhecimento acelerado. Os isoladores não envelhecidos e os envelhecidos artificialmente (após 5.000 horas) suportaram tensões RMS acima de 80 kV e tensões de pico (instantâneas) superiores a 110 kV.

Nos ensaios mecânicos, de um modo geral, todos os isoladores fabricados com as resinas poliuretanas em estudo romperam-se com cargas de flexão menores que a carga de ruptura do isolador do tipo Suporte de epóxi, usado como referência. E no caso dos isoladores produzidos com as resinas RI 2, com exceção do granito sintético, eles foram reprovados porque houve o descolamento dos insertos.

No entanto, como todos os isoladores foram aprovados no ensaio de envelhecimento artificial e nos ensaios elétricos, os resultados dos ensaios mecânicos foram o fator diferenciador para a análise final e conclusiva dos isoladores desenvolvidos. Portanto, conclui-se que:

- o isolador polimérico que possui o melhor desempenho como isolador elétrico para ambiente interno é o isolador fabricado com o granito sintético GSRI 1, porque ele apresentou características próximas do isolador de epóxi, suportando aproximadamente 46% da carga nominal à compressão com uma deformação de 2,0 mm e em torno de 66% da carga nominal à flexão do isolador usado como referência;
- os isoladores fabricados com a resina RI 2 e seus compósitos RI 2C1 e RI 2C2 não são adequados para a aplicação de isoladores elétricos; e
- os demais isoladores produzidos com as resinas RI 1, RI 1C1, RI 1C2 e GSRI 2 podem ser aplicados em isoladores elétricos para uso em ambiente interno, porém com restrições em relação às suas suportabilidades a esforços mecânicos.

Capítulo 6:

Uma nova metodologia para a análise do desempenho e da qualidade dos isoladores poliméricos.

6.1 Introdução.

Um levantamento das principais causas de defeitos nos sistemas elétricos de energia, ocasionados por isoladores elétricos, tem demonstrado que grande parte deles se deve a falhas no material isolante e a falhas não determinadas, relacionadas com fugas de corrente e com perfurações normalmente não visíveis.

Concentrando-se a atenção apenas nas falhas do material isolante, objetiva-se neste capítulo apresentar uma nova metodologia para avaliar o desempenho e a qualidade dos processos de fabricação dos isoladores poliméricos. Nesses processos, podem surgir eventualmente imperfeições na composição e na homogeneidade dos materiais dielétricos, como também a formação de bolhas, fatores que ocasionam distorções nos campos elétricos, comprometendo sobremaneira o desempenho dos isoladores.

Esta nova metodologia é formada pela integração de três técnicas já consagradas: microscopia de força atômica [33], difração de raios-X [34] e tomografia computadorizada de raios- γ [35].

Na Microscopia de Força Atômica (MFA), usando-se pequenas amostras, é possível verificar a homogeneidade e a aglutinação dos compósitos formados pelas resinas e pelas cargas e também detectar a presença de porosidades. Na difração de raios-X, que também emprega pequenas quantidades de material, embora dedicada principalmente à análise de materiais cristalinos, tornou possível identificar os tipos e a composição das cargas cristalinas existentes nos compósitos de resinas. Finalmente, na tomografia computadorizada de raios- γ , que é uma técnica completamente não destrutiva, foi possível a análise de isoladores já moldados e, portanto, a identificação da presença de defeitos, de bolhas e de alterações na densidade do material compósito.

No entanto, no momento, concentrou-se mais na técnica de tomografia computadorizada porque ela apresentou uma contribuição maior e mais significativa para a construção da matriz do isolador, proporcionando características de densidade e de homogeneidade dos materiais em estudo já no produto final, que é o isolador elétrico.

6.2 Técnica de Microscopia de Força Atômica (MFA).

O microscópio de força atômica foi aplicado pela primeira vez no estudo de polímeros em 1988, logo depois de sua invenção [36]. Atualmente, os estudos em polímeros abrangem desde a simples visualização da morfologia até o exame mais avançado da estrutura e propriedades do material em escalas nanométricas. As principais vantagens da microscopia de força atômica (AFM), quando comparadas a outras técnicas como as microscopias eletrônicas de varredura (SEM) e de transmissão (TEM), para a análise morfológica e estrutural de materiais, em geral são [36]: tem maior resolução e imagem em três dimensões; não necessita de recobrimento condutivo; não requer métodos específicos de preparação da amostra; permite a quantificação direta da rugosidade da amostra; permite a medida da espessura de filmes ultrafinos sobre substratos; e custa menos do que os microscópios eletrônicos.

As medidas com MFA foram realizadas usando-se o aparelho Topometrix, Discoverer TMX 2010 [37] no modo contato de obtenção de imagem, em condição ambiente. O conjunto haste-agulha é construído com Si_3N_4 , e as hastes utilizadas foram de formato "V" (200 mm de comprimento) com constante de mola nominal de aproximadamente 0,06 N/m e a agulha de formato piramidal.

Os resultados desta técnica aplicada a resinas RI 1, RI 2, RI 1C1 e RI 2C1, encontram-se ilustrados na Figura 6.1.

Figura 6.1: Análises das topografias através das imagens e rugosidades obtidas com MFA nos materiais: (a) RI 1, (b) RI 2, (c) RI 1C1 e (d) RI 2C1.

Das microscopias obtidas, podem-se observar claramente as incrustações de sílica existentes na resina, indicadas pelas setas. Na figura 6.2, encontra-se a indicação do grau de rugosidade das superfícies das amostras.

Figura 6.2: Grau de rugosidade das amostras: (a) RI 1C1; (b) RI 2C1; (c) RI 1C2, com diferentes proporções de mica e (d) RI 1, RI 1C1, RI 2 e RI 2C1.

6.3 Técnica de difração de raios-X.

A técnica de difração de raios-X [38] é muito aplicada em materiais cristalinos, porém neste trabalho, ela apresentou-se útil e interessante para as análises de materiais amorfos como as resinas e seus compósitos.

Foram utilizados corpos de prova das resinas com dimensões de 20 mm de comprimento por 20 mm de largura e 4 mm de espessura, analisados através de varreduras $\theta:2\theta$ contínuas ou em passos de $0,02^\circ$ (2θ), em um difratômetro para amostras policristalinas, Philips PW1710, usando-se radiação $\text{CuK}\alpha$, dotado de monocromador secundário de grafite.

Esta técnica revelou que as amostras das resinas e seus compósitos apresentaram, como era esperado, difratogramas típicos de amorfos, com a presença de pequenas quantidades de materiais cristalinos. Seus resultados encontram-se na figura 6.3.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 6.3: Difratogramas das resinas em estudo: (a) RI 1 e RI 1C1; (b) RI 1 (areia) e RI 2 (areia) e (c) RI 1NF e RI 2NF; e (d) RI 1C2, com diferentes proporções de mica.

Na Figura 6.3-(a), pode-se observar que as amostras apresentaram picos identificados como sílica (SiO_2), com um escore de ajuste muito bom. Esses picos correspondentes à difração da sílica são novamente apresentados na Figura 6.3-(b), onde as amostras são misturadas somente com sílica; nesse caso a concordância entre o difratograma teórico e o medido ficou em torno de 9,15 – 9,67, que é um ótimo valor, principalmente porque as medidas foram realizadas numa varredura contínua, sem muita resolução, com $2\theta = 10$ a 70 graus.

Na Figura 6.3–(c), o difratograma exibe uma borda larga com ângulo baixo, da ordem de $2\theta = 20$, identificando as amostras com as pequenas porcentagens de negro de fumo, com características de materiais praticamente amorfos.

A análise de raios X nas resinas RI 1C2 da Figura 6.3–(d) apresenta a variação das proporções de mica existente no compósito.

Em outros difratogramas obtidos com diferentes resoluções, puderam-se verificar pequenas modificações nas intensidades de alguns picos, que são decorrentes possivelmente de imperfeições na preparação das amostras. E nada se pode dizer com certeza sobre as influências das porcentagens das cargas utilizadas nas resinas.

6.4 Técnica de tomografia computadorizada de raios- γ .

6.4.1 Geral.

A tomografia computadorizada (TC) de raios-x, de raios γ ou de Ressonância Magnética Nuclear (RMN) é uma técnica que tem obtido uma boa repercussão devido à não-invasibilidade das amostras e às resoluções alcançadas. Ela fornece imagens de seções transversais de objetos opacos [39].

A TC por RMN possui fortes restrições de uso em meios porosos que contêm materiais paramagnéticos. É também difícil, ou praticamente impossível, quantificar os resultados por meio da correlação do sinal de RMN e do conteúdo de água, por exemplo. Enquanto que a TC por raios-x ou γ não sofre essas restrições, podendo ser usada na presença de materiais paramagnéticos, bem como também serem efetuadas calibrações, correlacionando os coeficientes de atenuação com valores de densidade e umidade.

Portanto, em função do equipamento disponível, optou-se por usar TC de raios γ nesse trabalho de pesquisa, onde se obtiveram bons resultados das imagens tomográficas e pôde-se atingir o seu objetivo, que é o de analisar a homogeneidade e qualidade das resinas e dos compósitos inéditos, do tipo poliuretanos derivados do óleo de mamona que foram utilizados na fabricação de isoladores elétricos.

6.4.2 Atenuação de raios gama.

Na figura 6.4, segundo [40], é demonstrado onde os raios gama monoenergéticos são colimados para um feixe estreito, permitindo-se atingir um detector depois de passar através de um absorvedor (amostra) de espessura variável, sendo o resultado representado por uma atenuação exponencial simples dos raios γ .

Figura 6.4: Transmissão por raios λ : (a) representação da aplicação e (b) curva exponencial, medida sob ótimas condições geométricas.

Cada um dos processos de interação remove o fóton dos raios γ do feixe por absorção ou por espalhamento da direção do detector e pode ser caracterizado por uma probabilidade fixa de ocorrência por unidade de comprimento no caminho do absorvedor. A soma dessas probabilidades é simplesmente a probabilidade por unidade de comprimento do caminho do fóton de raio γ que é removido do feixe, conforme a equação 6.1 [40].

$$\mu = \tau \text{ (do efeito fotoelétrico)} + \sigma \text{ (do efeito Compton)} + \kappa \text{ (da formação de pares)} \quad (6.1)$$

Onde: μ é chamado de coeficiente de atenuação linear, em cm^{-1} ; e

τ , σ e κ correspondem às três principais formas de interação da radiação com a matéria, para energias médias e baixa (com valores menores ou iguais a 1 MeV = $1,602 \cdot 10^{-13}$ joules), cujos fenômenos são apresentados em [4].

O número de fótons transmitidos I é, então, dado em termos do número de fótons transmitidos sem o absorvedor (amostra) I_0 , como demonstra a equação 6.2, originada da *Lei de Beer* [40].

$$I / I_0 = e^{-\mu x} \quad (6.2)$$

Na figura 6.5, é representada a atenuação de um feixe de fótons por uma amostra homogênea.

Figura 6.5: Atenuação de um feixe de fótons por uma amostra homogênea.

O uso do coeficiente linear é limitado pelo fato de que ele varia com a densidade do absorvedor, embora o material do absorvedor seja o mesmo. Porém, o coeficiente de atenuação de massa é muito mais utilizado do que o coeficiente de atenuação linear, e é definido segundo a equação 6.3 [40].

$$\mu_m = \mu / \rho \quad (6.3)$$

Onde: μ_m = coeficiente de atenuação de massa, em cm^2/g ;

μ = coeficiente de atenuação linear, em cm^{-1} ; e

ρ = massa / volume = a densidade do meio (da amostra), em g/cm^3 .

Para uma dada energia de raios γ , o coeficiente de atenuação de massa não muda com o estado físico de um dado absorvedor (amostra), porque já está incluída a sua densidade, sendo uma característica constante do material. Por exemplo, no caso da água, o μ_m é o mesmo, tanto para a forma líquida como para a forma em vapor. Portanto, justifica-se a importância de se determinar essa característica dos materiais inéditos, com os quais são fabricados os isoladores poliméricos em estudo.

6.4.3. Condições de ensaios.

Na técnica de tomografia computadorizada, foram analisados nove isoladores, descritos anteriormente. Para cada isolador foram obtidas duas imagens, focando cada uma delas regiões distintas do isolador - seção 1 e seção 2. O equipamento usado foi um mini-tomógrafo, apresentado na fotografia da figura 6.6, de sistema de varredura de primeira geração, cuja fonte radioativa é o Amerício – 241 (60 keV) com atividade de 300 mCi [37]. 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.

Figura 6.6: Tomografia computadorizada e seções analisadas: (a) minitomógrafo utilizado; e (b) seção 1 do isolador Suporte.

A figura 6.6-(b) apresenta a seção 2 do isolador, referente à parte superior; enquanto que a seção 1 corresponde à parte inferior do isolador.

O isolador com defeito bem visível está apresentado na figura 6.7.

Figura 6.7: Isoladores RI 1 com bolhas de ar visíveis.

6.4.4 Métodos utilizados.

6.4.4.1 Determinar a densidade média (ou global) das resinas e dos compósitos 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.

6.4.4.2 Determinar os dados estatísticos das imagens tomográficas.

Para determinar os valores dos coeficientes de atenuação linear, foi utilizado um programa computacional de reconstrução de imagens tomográficas. Com auxílio desse programa, selecionou-se a imagem a ser analisada e com o cursor do *mouse*, escolheu-se a área em que deveriam ser determinados os dados estatísticos dos coeficientes de atenuação linear. Um exemplo de uma área selecionada encontra-se na figura 6.8.

Figura 6.8: Área escolhida no isolador RI 1: (a) seção 1 e (b) seção 2.

Portanto, com os valores de densidade média dos materiais e dos valores médios dos coeficientes de atenuação linear, através da equação 6.3 descrita anteriormente, calcularam-se os valores dos coeficientes de atenuação de massa, característicos de cada material, conforme se desejava.

A menor medida efetuada pelo tomógrafo é definida pelo valor do passo linear especificado antes da realização das tomografias. Para esses isoladores foi utilizado um passo linear de 0,103 mm, que equivale à largura de um pixel nas imagens.

6.4.5 Resultados.

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.

Na figura 6.9, são apresentadas as imagens tomográficas e seus histogramas, obtidos dos isoladores fabricados com resina RI 1.

Figura 6.9: Seção 1 do isolador RI 1: (a) imagem tomográfica com escala em cm^{-1} ; e (c) histograma da tomografia.

Na figura 6.10, são apresentadas as imagens tomográficas e seus histogramas, obtidos dos isoladores fabricados com o granito sintético GSRI 1.

Figura 6.10: Seção 1 do isolador GSRI 1: (a) imagem tomográfica com escala em cm^{-1} ; e (c) histograma da tomografia.

Primeiramente, são apresentados os resultados estatísticos obtidos das cargas separadas e depois os resultados obtidos nos isoladores, produzidos com elas.

Na tabela 6.1 e na figura 6.11, são apresentadas as propriedades das cargas utilizadas, sendo μ , o coeficiente de atenuação linear e μ_m , o coeficiente de atenuação de massa, característico do material.

Tabela 6.1: Propriedades das cargas utilizadas.

Tipo de carga	Massa (g)	Volume (cm^3)	Densidade (g/cm^3)	Coeficiente de atenuação de massa, μ_m (cm^2/g)	Coeficiente de atenuação linear, μ (cm^{-1})
Sílica	83,156	78,149	1,064	0,261	0,278
Negro de fumo	19,832	78,467	0,253	0,183	0,046
Mica	60,855	79,102	0,769	0,302	0,232
Granito natural e ar	125,327	78,407	1,598	0,329	0,526

Figura 6.11: Cargas utilizadas: (a) quantidade; (b) densidade; e (c) coeficiente de atenuação de massa obtido e coeficiente de atenuação linear calculado.

Como o granito natural analisado encontra-se na forma de três tamanhos diferentes de brita, e também juntamente com o ar, ele apresentou valores diferentes dos valores específicos do granito natural compacto.

Os resultados das tomografias nas duas seções dos isoladores apresentaram valores semelhantes com desvio padrão entre 0 e 0,006. Através da diferenciação das tonalidades de cor cinza, puderam-se obter informações quanto à densidade dos materiais ou das bolhas de ar em seu interior; e também, como as duas seções apresentaram imagens tomográficas parecidas, pode-se observar que há uma homogeneidade nos materiais dielétricos utilizados.

Na tabela 6.2 e na tabela 6.3, encontram-se os resultados obtidos.

Tabela 6.2: Resultados dos isoladores, com as tomografias realizadas na seção 1.

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)
Epóxi	1334,000	717,000	1,861	0,391	0,210
RI 1	747,400	668,000	1,119	0,204	0,182
RI1 c/ defeito	705,100	681,000	1,035	0,195	0,188
RI 2	724,400	664,000	1,091	0,202	0,185
RI 1C1	824,600	663,000	1,244	0,238	0,191
RI 2C1	810,400	667,000	1,215	0,234	0,193
RI 1C2	826,400	667,000	1,239	0,245	0,198
RI 2C2	811,000	667,000	1,216	0,242	0,199
GSRI 1	1364,800	734,000	1,859	0,459	0,247
GSRI 2	1346,200	766,000	1,757	0,438	0,249
Média	949,430	689,400	1,364	0,285	0,204
Desvio - padrão	278,530	36,510	0,327	0,103	0,024

Tabela 6.3: Coeficiente linear da seção 1, dos materiais dos isoladores do tipo Suporte.

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 (%)
Epóxi	0,281	0,495	0,391	0,029	7,285
RI1	0,152	0,251	0,204	0,014	7,052
RI1c/ defeito	- 0,014	0,259	0,195	0,035	17,965
RI2	0,153	0,254	0,202	0,014	6,979
RI1C1	0,188	0,298	0,238	0,016	6,783
RI2C1	0,185	0,293	0,234	0,015	6,567
RI1C2	0,177	0,306	0,245	0,017	7,008
RI2C2	0,176	0,296	0,242	0,017	6,880
GSRI1	0,045	1,487	0,459	0,100	21,873
GSRI2	0,084	0,862	0,438	0,097	22,159
Média	0,143	0,480	0,285	0,035	11,055
Desvio - padrão	0,084	0,401	0,103	0,034	6,726

Observações:

1. O valor negativo do coeficiente linear não tem sentido físico, porque ele reflete o erro (flutuação de medida) no aparelho, representando um material sem densidade, que é conseqüentemente a bolha de ar, em grande dimensão.
2. O valor do coeficiente linear μ , descrito na tabela 6.6, 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.

Para análise do comportamento dos diferentes materiais, a figura 6.12 apresenta as principais características dos isoladores.

Figura 6.12: Características dos isoladores do tipo Suporte, seção 1: (a) massa e volume dos isoladores; (b) densidade; e (c) coeficientes μ e μ_M .

Os valores médios obtidos nas análises entre as duas seções selecionadas nos isoladores são demonstradas nos gráficos das figura 6.13.

Figura 6.13: Valores médios das análises entre as seções 1 e 2 dos isoladores: (a) dos coeficientes de atenuação; e (b) dos desvios padrão das medidas dos coeficientes de atenuação.

Diante do amplo banco de dados das imagens tomográficas obtidas, algumas foram selecionadas em função de alguns pontos em destaque e são apresentadas na figura 5.14, onde se observam pequenas concentrações de materiais com densidades diferentes e com bolhas de ar em seu interior.

Figura 6.14: Identificação dos valores de baixa densidade (valor baixo de μ) dos materiais e das bolhas de ar existentes: (a) Isolador RI 1- seção 1 e (b) Isolador RI 1 com defeito - seção 1.

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 com relação às bolhas de ar, que não têm densidades, classificam-se esses pontos mais escuros como a presença marcante do ar.

Na figura 6.14-(a), verifica-se que há uma homogeneidade na mistura dos componentes das resinas, porque há uma distribuição uniforme dos coeficientes de atenuação linear μ , com valores próximos uns dos outros.

Enquanto que, pela figura 6.14-(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, há um furo que serve para encaixar o isolador em sua instalação de serviço, e sendo ele composto de ar, os seus coeficientes de atenuação muito pequenos, comprovando-se, também, a classificação de cores bem escuras para bolhas de ar.

Na figura 6.15, encontram-se outros pontos importantes a se observar nos isoladores do tipo Suporte, nas seções 1 e 2.

Figura 6.15: Identificação dos valores de baixa densidade (valor baixo de μ) nos isoladores do tipo Suporte: (a) GSRI 1- seção 1; (b) de Epóxi – seção 1; (c) RI 1C1- seção 1; (d) RI 2C1 – seção 2; (e) RI 2 C2 – seção 2.

6.5 Conclusões e discussões.

Pelos resultados obtidos na MFA, principalmente os do gráfico da figura 6.2- (d), observou-se que os compósitos apresentaram, nas suas superfícies, rugosidades maiores do que as resinas puras, o que torna essa técnica muito útil em trabalhos futuros para se estudar a propriedade de hidrofobicidade, que é uma característica muito importante para o caso dos isoladores elétricos para uso em ambiente externo.

Com a técnica de difração de raios-X, foi possível identificar os materiais que compõem os isoladores poliméricos em estudo, proporcionando uma caracterização de difratogramas específicos das cargas adicionadas nas resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona.

Na tomografia computadorizada, o valor do coeficiente de atenuação linear do negro de fumo é $0,046 \text{ cm}^{-1}$, conforme indica a tabela 6.1, e é muito parecido com o encontrado para as bolhas de ar. Porém, os isoladores fabricados com esse compósito, contendo negro de fumo, podem ser considerados sem concentrações de negro de fumo e com uma mistura homogênea, conforme apresentam as figuras 6.15-(c) e 6.15-(d), porque os valores encontrados são diferentes do valor característico do negro de fumo.

Na figura 6.15-(e) referente ao isolador com o compósito, que contém a carga mica, pode-se afirmar também que a mistura está homogênea, porque há uma distribuição uniforme dos valores dos coeficientes de atenuação linear. Todos os valores obtidos são próximos do valor característico da resina e da mica.

Nos isoladores feitos com os granitos sintéticos, verificam-se defeitos em sua fabricação porque eles apresentam bolhas de ar no seu interior, conforme é demonstrado na figura 6.15-(b).

Como foi comentado anteriormente, 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 ao valor característico do granito natural puro. Por isso, os valores encontrados nas imagens tomográficas são diferentes dos valores da tabela 6.1, e a sua mistura pode-se considerar praticamente homogênea, porque se observa uma distribuição do granito natural ao longo dos isoladores.

Portanto, pode-se concluir que essa nova metodologia, utilizando em conjunto essas três técnicas de análise, não só proporciona condições para um aprimoramento dos processos de fabricação de isoladores poliméricos, como também fornece subsídios para garantir o controle de qualidade de produtos comerciais.

Capítulo 7:

Conclusões

7.1 Conclusões e discussões.

Embora, durante o texto, tenham sido apresentadas algumas conclusões, neste capítulo serão apresentados tópicos complementares e finais para o entendimento dos resultados obtidos.

Em relação ao capítulo 2, que trata das informações sobre a mamona e o seu óleo, verificou-se a importância de apresentar a posição em nível nacional e internacional dessa matéria-prima e a aplicação de seus derivados que contribuem para o avanço tecnológico do país, que é o caso das resinas poliuretanas e dos isoladores poliméricos desenvolvidos.

Os resultados da caracterização térmica das resinas e dos seus compósitos (capítulo 3) demonstraram que esses materiais seriam adequados à aplicação em isoladores para uso em ambiente interno, uma vez que os isoladores utilizados em ambiente externo necessitariam de um estudo mais profundo, que proporcionasse um aumento da temperatura de transição vítrea (até um valor aproximado de 80°C) nas características de seus dielétricos.

Sobre a temperatura de decomposição térmica dos polímeros, os resultados obtidos nos levaram a concluir que ela se inicia com o rompimento das ligações uretanas e conseqüente perda das moléculas de diisocianato; em seguida ocorre a decomposição das moléculas do poliol, conforme os casos descritos de resinas semelhantes de mesma origem (óleo de mamona) porém próprias para uso na área médica [12]. Conforme os gráficos das figuras 3.18 e 3.20, pode-se verificar que as resinas começam a perder massa, isto é, a se degradar a partir de temperaturas altas. A decomposição da parte orgânica (resina) é acentuada até os 500 °C; depois, destaca-se a presença das cargas acrescentadas.

A mudança nas cores das resinas e dos seus compósitos, de uma cor clara para uma cor mais escura, e também, conseqüentemente, a mudança nas cores dos isoladores envelhecidos artificialmente, foram devidas ao fato de as ligações duplas, existentes nas composições químicas desses materiais, sofrerem um processo de oxidação quando

submetidas a altas temperaturas. No caso da aplicação em isolador elétrico, esta característica não é significativa, porém servirá para indicar que ele sofreu um aumento de temperatura.

Sobre a caracterização mecânica dos materiais, o comportamento de um mesmo polímero pode ser diferente nos ensaios de tração e de compressão, o que ocorreu no caso das resinas RI 1C1 e RI 1C2. Na figura 3.8-(b), observa-se que a resina RI 1C1 mostra uma curva indicando um comportamento duro e tenaz no ensaio de compressão, enquanto que no ensaio de tração apresenta uma curva característica de comportamento duro e forte, conforme pode ser visto na figura 3.10-(b). A resina RI 1C2, conforme a figura 3.9-(b), apresenta um comportamento duro e tenaz, e no ensaio de tração, demonstra ser duro e frágil (figura 3.11-b). A diferença de comportamento é baseada no fato de que o ensaio de compressão causa a diminuição dos defeitos provocados pelo processamento das resinas (por exemplo: microtrincas), e o ensaio de tração acentua a influência destes defeitos [6].

As características elétricas das resinas e de seus compósitos apresentaram boas perspectivas para as suas aplicações em isoladores elétricos. Isso ocorreu, mesmo com o pequeno acréscimo do pigmento negro de fumo, nos compósitos RI 1C1 e RI 2C1, que proporcionou uma diminuição nas características isolantes desses materiais, por ele apresentar característica condutiva.

Conforme pôde ser observado no capítulo 4, os processos de fabricação dos novos isoladores são cuidadosos devido ao curto tempo de manuseio (ou tempo de gel) das resinas, de seus compósitos e dos granitos sintéticos. Porém, conclui-se que esses materiais possuem uma viabilidade econômica e prática de produção, porque requerem menos mão-de-obra e um espaço físico menor que no caso dos isoladores de cerâmica. E comparando-se com os isoladores poliméricos de epóxi, os isoladores de granitos sintéticos apresentam estimativas de preços competitivos, que viabilizam a sua comercialização. Dentre todos os isoladores desenvolvidos, o isolador polimérico de granito sintético produzido com a resina RI 1 foi o isolador que apresentou características mais próximas do isolador de epóxi, usado como referência.

Em relação às características dos isoladores poliméricos apresentadas no capítulo 5, conclui-se que eles podem ser utilizados em instalações com **tensão RMS nominal de 40 kV** com ótimo desempenho de isolamento elétrica. Porém, em relação às características mecânicas dos isoladores, a resina RI 2, os compósitos (RI 2C1 e RI 2C2) e o granito sintético (GSRI2) formados a partir dela, indicaram que esses materiais não são adequados

para a aplicação neste tipo de isolador elétrico, porque eles possuem características elastoméricas, e os isoladores produzidos com eles se deformaram muito com as cargas mecânicas de flexão e de compressão aplicadas. Já os demais isoladores fabricados com a resina RI 1 são adequados para a aplicação neste tipo de isolador elétrico, embora eles possuam algumas restrições, que devem ser especificadas de acordo com os resultados apresentados no capítulo 5, com o projeto de instalação e com as cargas mecânicas a que serão submetidos.

Os isoladores produzidos com os granitos sintéticos apresentam um peso semelhante ao de isolador de epóxi, em torno de 1,3 kg, enquanto que os isoladores fabricados com as resinas e com os seus compósitos pesam em torno da metade desse massa. Logo, os isoladores produzidos com as resinas e com os seus compósitos destacam-se nesse ponto em relação aos de granitos sintéticos e de epóxi, devido ao fato de um peso menor corresponder a vantagens no transporte e na instalação desses equipamentos.

Os resultados das microscopias de força atômica (MFA) realizadas nas amostras de resinas e de seus compósitos aproximaram-se bastante daqueles produzidos pela tomografia computadorizada em isoladores fabricados com os mesmos materiais. Eles indicaram pequenos pontos de concentrações de materiais ou de bolhas, distribuídos nas amostras de forma praticamente homogênea - forte indicativo de que o processo de fabricação dos isoladores está coerente e que o material composto terá poucas regiões de distorção de campo elétrico. Com a técnica de difração de Raios-X foi possível identificar os materiais que compõem os isoladores poliméricos em estudo, proporcionando uma caracterização de difratogramas específicos das cargas adicionadas nas resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona. Na técnica de tomografia computadorizada, como as bolhas de ar não têm densidades, 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 nas figuras 6.14-(b) e 6.15-(b). Então, conclui-se que essa nova metodologia pode ser aplicada tanto para materiais conhecidos para confirmação de sua composição de acordo com a sua especificação, como também em amostras com composição desconhecida para efeito de averiguação. E cabe ressaltar que as bolhas de ar identificadas por meio dessa metodologia não influenciaram nos ensaios elétricos realizados nos isoladores, porque as suas dimensões e a sua permissividade dielétrica são desprezíveis em comparação com as dos materiais poliméricos, que apresentam ótimas características como dielétricos sólidos.

Portanto, neste trabalho de pesquisa, além de ampliação das possibilidades do uso de polímeros como matéria-prima para a fabricação de isoladores elétricos, observou-se a preocupação de atender ao anseio nacional, que é a de empregar a matéria-prima, cujas tecnologias já se encontram aqui dominadas, como é o caso das resinas poliuretanas à base do óleo de mamona.

7.2 Sugestões de trabalhos futuros.

Devido à grande importância destes materiais, que demonstraram ter um bom desempenho como dielétricos sólidos, quanto mais forem exploradas as suas aplicações, mais subsídios se terá para entender os seus comportamentos. Em nível de propriedades térmicas, outras cargas poderiam ser utilizadas nessas resinas para o estudo da viabilidade de confecção de isoladores elétricos para uso em ambiente **externo**. Outros ensaios seriam extremamente necessários como por exemplo: ensaio mecânico sob uma temperatura em torno de 80° C, 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. Do ponto de vista biológico, como esses materiais são derivados de um óleo vegetal, seria também interessante realizar alguns ensaios no laboratório de microbiologia para verificar se os materiais que compõem os isoladores a serem desenvolvidos para o uso em ambiente externo, apresentam susceptibilidades à biodegradabilidade.

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.

Anexo A:

Planilha de cálculo do granito sintético

1. Cálculo dos constituintes do granito sintético.

Para calcular a quantidade em peso de cada constituinte do granito sintético, foi elaborada uma planilha de cálculo no *Excel*, segundo a otimização de custo do produto final e em função do granito bruto.

Para obter as quantidades de resina e de granito natural com os diferentes tamanhos de britas, basta inserir o volume da peça em ml no respectivo campo, que o programa calcula as massas correspondentes a cada uma delas, conforme a tabela I, a seguir.

Tabela I: Planilha de cálculo dos componentes do granito sintético em estudo.

DADOS

Volume da peça (ml)		850,00	
Densidade do granito natural (g/cm ³)		2,70	
Densidade da resina (g/cm ³)		1,10	

MISTURA DO COMPÓSITO			
BRITAS			
Peso total das britas		1,518	Kg
Peso das britas de 4,76mm		0,759	Kg
Peso das britas de 2,00mm		0,455	Kg
Peso das britas em pó		0,304	Kg

RESINA POLIURETANA DERIVADA DO ÓLEO DE MAMONA			
Peso total da resina		0,453	Kg
Peso do poliol		226,500	g
Peso do pré-polímero		226,500	g
	Peso total	1,971	Kg

Anexo B

Lista de instrumentos utilizados.

A utilização dos equipamentos nos ensaios realizados exigiu o estudo do manual de instrução de cada um, para o seu manuseio correto.

Estes instrumentos estão listados a seguir.

1) Medidor de rigidez dielétrica das resinas:

High Voltage Construction System-Control Device

TUR DRESDEN – SGI, VEB TRANSFORMATOREN-U

Hermann Mattern

Número de série: 891037

60 Hz, 220 V (35 A – 6,3 A).

2) 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, cont.
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 min.
- 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

3) Medidor de resistência alta:

High Resistance Meter

Hewlett Packard

Modelo 4329 A, Número de série: 2510J10028

Escala: 500 K Ω a 2x10¹⁶ Ω (precisão de 3%); 0,05 pA a 20 μ A (precisão 5%) e 0 a 1000 V (tensão contínua)

4) Medidor de capacitância e fator de dissipação dielétrica:

Precision LCR Meter

Yokogawa - Hewlett - Packard Ltd.

Modelo: 4284

Número de série: 04284-90000

Faixa de frequência: 20 Hz a 1 MHz.

5) Gerador de Impulso

Hipotronics

4 estágios de 100 kV

6) DMA 983 (Análise Dinâmico-mecânica)

Du Pont Instruments

Modelo 983001.918

Número de série: 1146

7) DSC (Calorimetria Diferencial de Varredura)

Du Pont Instruments

8) TA (Análise Termogravimétrica)

Du Pont Instruments

9) Termoanalizador 2000

Du Pont Instruments

Processador 486

10) Sistema Computadorizado para Ensaio Mecânico em Materiais

Fabricante SINTECH

Número de serviço: 651.300 R

Pressão máxima: 21 Mpa / 3000 psi

Capacidade de força: 25 kN / 5,5 Kip

Número do modelo: 647-02

Número de série: 0106013 E

Garra hidráulica acoplada – número 647

11) Durômetro Wulstest MP3

Shore D

12) Medidor de tensão de compressão :

Aparelho da marca: Alfred J. Amsler & Co.

Schaffhausen – Suíça, número de série 66/64

Assistência técnica: Dinateste Indústria e Comércio Ltda – São Paulo

13) Relógio comparador

Mitutoyo, nº 2046-08

Shock proof: 0,01 a 10 mm;

14) Medidor de temperatura e umidade relativa do ar

Marca: Templec Ltda;

15) Estufa

Quimis Aparelhos Científicos Ltda

Modelo: B242; número de série: 902342; temperatura: até 200 °C.

16) Máquina Universal de Ensaio Mecânico

Marca: Instron Corporation

Modelo: 5500 R, número de série: 7010.

Anexo C:

Estudo das matrizes de moldagem dos isoladores poliméricos do tipo Suporte.

1. Introdução.

O projeto da matriz de moldagem do isolador polimérico do tipo Suporte foi aperfeiçoada ao longo deste trabalho de pesquisa. E até atingir os bons resultados com a matriz apresentada no capítulo 4, foram realizadas algumas alterações no projeto inicial, conforme serão apresentadas nos itens subseqüentes.

2. Primeira matriz de moldagem do isolador polimérico.

Na primeira matriz de moldagem do novo isolador polimérico, foi escolhido o elastômero de silicone branco, que é um produto bicomponente, formado de base e catalisador (de estanho), de média viscosidade, do fabricante Vantico, que é distribuído pela Maxepoxi. Ao misturar os componentes na proporção de 20:1 (100 partes da base por 5 do catalisador, em massa), eles se curavam à temperatura ambiente, e formava-se um elastômero de silicone flexível, resistente ao rasgo.

Comparando-se essa matriz com uma matriz usinada de náilon, verificou-se que ela possui custo menor, maior rapidez na sua confecção e maior facilidade de desmoldagem do isolador, sendo, também, optativo o uso de desmoldante, como por exemplo a vaselina sólida.

O isolador de epóxi usado como modelo foi centralizado dentro de uma caixa de madeira, conforme é mostrado na figura 1.

Figura 1: Preparação da matriz: (a) isolador centralizado e (b) base e catalisador utilizados.

A base e o catalisador foram homogeneizados antes da mistura. A seguir, fez-se a mistura manualmente durante aproximadamente 2 minutos, à temperatura ambiente, na proporção definida anteriormente. Durante a mistura, tomou-se o cuidado de se introduzir o mínimo de bolhas de ar possível.

Foi realizado vácuo na mistura durante uns vinte minutos e, em seguida, ela foi vertida dentro da caixa com o isolador.

Embora o tempo de secagem do elastômero seja de apenas duas horas, aguardaram-se 24 horas para retirá-lo da caixa. O bloco moldado foi cortado ao meio lateralmente ao isolador, com lâminas de bisturi de aço carbono, conforme demonstra a figura 2.

Figura 2: Matriz de elastômero branco: (a) bloco com isolador e (b) matriz cortada em duas partes; e (c) matriz pronta para moldagem.

O primeiro isolador reproduzido não ficou circular como o esperado. Ficou um pouco oval, dada a compressão da matriz entre duas placas de madeira seguras por presilhas, conforme demonstra a figura 2-(c).

O elastômero de silicone utilizado foi escolhido em função do seu baixo custo e de ser flexível para desmoldagem. No entanto, quando se introduz massa num molde flexível, ela gera uma tensão interna contra o molde, podendo alterar um pouco a estabilidade geométrica do molde e, conseqüentemente, da peça moldada. Por isso, deve-se colocar um recurso de apoio para auxiliar a manutenção dessa estabilidade.

A solução para esse problema foi colocar presas as duas partes do molde dentro de duas caixas de madeira, servindo como suporte de apoio à matriz, conforme apresenta a figura 3.

Figura 3: Matriz apoiada dentro de uma caixa de madeira.

Conforme se observa na figura 3, a entrada de material era na parte superior dos isoladores, e eles não possuíam insertos de metal para as suas fixações na instalação elétrica.

Os isoladores moldados com essa primeira matriz, após os seus acabamentos finais, são demonstrados na fotografia da figura 4

Figura 4: Isoladores poliméricos, fabricados com os materiais: RI 1, RI 2, RI 1C1, RI 2C1, RI 1C2, RI 2C2, granito sintético GSRI 1 e granito sintético GSRI 2

Essa primeira matriz apresentou uma vida útil muito pequena, danificando-se após a fabricação de 18 isoladores produzidos com os novos materiais poliméricos em estudo, conforme apresenta a figura 5.

Figura 5: matriz de elastômero de silicone branca danificada.

As saídas de ar foram feitas através de pequenos cortes no elastômero de silicone, próximos à parte de moldagem das saias dos isoladores, conforme está na figura 5.

Após esse problema com a matriz de elastômero branco, verificou-se a necessidade de alterar a matriz de moldagem conforme se verá a seguir.

2. Segunda matriz de moldagem do isolador polimérico.

Na confecção da segunda matriz de moldagem dos isoladores poliméricos, foi escolhido um elastômero mais resistente ao rasgo e um pouco mais rígido que o utilizado na primeira matriz. Optou-se por um elastômero transparente, que também é um produto bicomponente, do mesmo fabricante do elastômero branco, e cujo processo de confecção da matriz foi descrito no capítulo 4. Ressalta-se, também, que foi invertido o sentido de entrada de material na matriz com a finalidade de diminuir as bolhas de ar originadas na moldagem. A figura 6 apresenta o isolador posicionado no sentido horizontal, para facilitar a acomodação das resinas e dos compostos e auxiliar a saída do ar no interior da matriz.

Figura 6: Projeto da segunda matriz do isolador polimérico do tipo Suporte.

A caixa de náilon que apóia a matriz foi projetada de um modo mais prático para a sua desmontagem, conforme apresenta a figura 7.

Figura 7: Caixa para fabricação e para suporte da molde de elastômero de silicone do isolador do tipo Suporte: (a) vista frontal; (b) vista lateral e (c) vista superior.

Uma outra importante alteração nessa segunda matriz foi o acréscimo dos insertos de metal nos isoladores poliméricos.

3. Conclusão.

De acordo com as duas matrizes de isoladores apresentadas, pôde-se verificar a sua praticidade de confecção com estes elastômeros de silicone. No entanto, para se obter um ótimo produto final, é necessário, além de um bom material de moldagem, um projeto adequado da matriz, que possua uma posição correta de sua entrada de material e de suas saídas de ar, para se evitar as bolhas de ar em seu interior.

Referências bibliográficas.

- 1 **MURAKAMI, C. R.** (1998). *Caracterização Elétrica de Resinas Poliuretanas derivadas de Óleo de Mamona, como Dielétrico Sólido*. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia Elétrica de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- 2 **GONZAGA D.P., MURAKAMI C.R., CHIERICE G.O. AND R.A.C. ALTAFIM** (1998). *Electrical Characterization of Castor Oil Resins*. In: International Symposium on Electrical Insulation (ISEI). Arlington, Virginia, June 7-10, USA, vol. 1, p. 181-185.
- 3 **ALTAFIM, R. A. C.** (1997). *Workshop realizado pelo PIEPAL- FORD FOUNDATION (Programa Internacional de Estudos e Projetos para a América Latina). Relatório: Isoladores Cerâmicos*. Instituto de Estudos Avançados de São Carlos - USP, São Carlos.
- 4 **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.
- 5 **NIEDERMEIER, R.K.** (1990). *Relatório: Aplicações de Materiais Poliméricos em Alta Tensão*. OHIO BRASS COMPANY. Wadsworth, OH 44281.
- 6 **MURAKAMI, C.R.; ALTAFIM, R.A.C.; ARAÚJO, L.C.R.; CLARO NETO, S. e CHIERICE, G.O.** (2000). *Resinas poliuretanas derivadas do óleo e mamona na fabricação de isoladores poliméricos – Parte III*. III Encontro Nacional de Engenharia de Alta Tensão (ENEAT). Junho, Campina Grande, Paraíba.
- 7 **DOW CORNING** (1999). *Dow Corning introduces new range of silicones targeted at HV insulator applications*. Insulator New & Market Report, vol. 7, Nº 1, Canada.

- 8 **PATTON, T. C.** (1952). *Source, production and application of dehydrated castor oil in the protective coatings industry*. The Baker Castor Oil Company. Official Digest, março. Bayonne, N. Y., USA.
- 9 **HEMERLY, F.X.** (1981). *Mamona: comportamento e tendências no Brasil*. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA). Departamento de Informação e Documentação. Brasília.
- 10 **EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA DA BAHIA S.A. E SECRETARIA DA AGRICULTURA**, s/d. *A importância da mamona*. Folheto 5113. Salvador, Bahia.
- 11 **SECRETARIA DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO E MINERAÇÃO** (1995). *Diagnóstico e oportunidades de investimentos: Mamona*. Série Oleaginosas, vol. V, Governo da Bahia – Salvador.
- 12 **CLARO NETO, S.** (1997). *Caracterização Física e Química de Poliuretanas derivadas do óleo de mamona, utilizadas em implantes ósseos*. Tese de Doutorado – IFQSC. Universidade de São Paulo, São Carlos.
- 13 **PLASTICS COMPOUNDING REDBOOK** (1987/88). Duluth MN, USA.
- 14 **SOUZA, J.A. E CIMELLI, R.R.** (1995). *Apostila: Plásticos Carregados e Reforçados*. Associação Brasileira de Polímeros (ABPol). São Carlos.
- 15 **PENTEADO, L.A.A.; e PURQUÉRIO B.M.** (1993). *Aplicação de granito polimérico na engenharia mecânica de precisão*. II Encuentro Argentino de Cerámico Y Refratarios. San Carlos de Bariloche, Argentina.
- 16 **RIBEIRO, F.M.M.**, 1998. *Técnicas de projeto para aplicação de granito sintético em estrutura de microscópio óptico*. Dissertação de mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- 17 **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS** (1983). *NBR 5403 - Determinação da Resistividade Volumétrica e Superficial*. Rio de Janeiro, ABNT.

-
- 18 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1983). *NBR 5405 - Determinação da Rigidez Dielétrica sob frequência industrial*. Rio de Janeiro, ABNT.
- 19 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1985). *NBR 6936 - Técnicas de ensaios elétricos em Alta Tensão*. Rio de Janeiro, ABNT.
- 20 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1996). *ASTM D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. West Conshohocken, USA.
- 21 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1991). *ASTM D695 - Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*. West Conshohocken, USA.
- 22 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1990). *ASTM D790 - Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced and Electrical Insulating Materials*. West Conshohocken, USA.
- 23 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1997). *ASTM D2240 - Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness*. West Conshohocken, USA.
- 24 LOOMS, J.S.T. (1988). *Insulators for High Voltages. Chapter 1: Introduction*. Peter Peregrinus Ltd. Publisher, London, United Kingdom.
- 25 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1980). *NBR 5739: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos de concreto - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, ABNT.
- 26 CANEVAROLO, JR.S. (1991). *Análise Dinâmica Mecânica para Sistemas Poliméricos. Parte 1 - O amortecimento (Tan δ)*. Associação Brasileira de Polímeros (ABPol), p. 36, São Carlos.
- 27 DU PONT (1986). *Manual de operação do DMA 983*. São Paulo, SP.

- 28 ROSA, D.S. (1996). *Correlação entre envelhecidos acelerado e natural do Polipropileno Isotático (PPI)*. Tese de Doutorado da Faculdade de Engenharia Química da Universidade de Campinas, Campinas.
- 29 SYLVESTER, P. AND FERRARI, R. (1990). *Finite Element fo Electrical Engineer*. Cambridge/UK, Cambridge University Press, USA.
- 30 USER'S MANUAL OF ANSYS 5.3 (1998). Swanson Analysis Systems, Inc., Houston, USA.
- 31 ALTAFIM, R.A.C.; GONZAGA, D.P.; MURAKAMI, C.R.; ATIQUE JUNIOR, W. ; CHIERICE, G.O. and AGNELLI, J.A.M. (2001). *Analysis of performance of polymeric insulators manufactured with polyurethane resins*. In: 2001 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD), IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society. June, Eindhoven, Holland, p.191-194.
- 32 CHIAVERINI, V. (1977). *Tecnologia Mecânica – Estrutura e Propriedades dos Metais e Ligas*. McGraw-Hill do Brasil, vol. 1.
- 33 HERRMANN JR, P.S.P.; MATTOSO, L.H.C.; FROMMER, J.E. e COLNAGO, L.A. (1996). *Uso da Microscopia de Força Atômica para estudos de morfologia de fibra vegetal*. In: Simpósio Nacional de Instrumentação Agropecuária. Anais, EMBRAPA-CNPDIA, São Carlos.
- 34 AVANCI, L.H.; CARDOSO, L.P.; GIRDWOOD, S.E.; PUGH, D.; ROBERTS, K.J.; SASAKI, J.M. and SHERWOOD, J.N. (2000). *Synchrotron radiation X-ray multiple diffraction applied to the study of electric field induced strain in MBANP organic non-linear optical material*. Phys. Rev. B, 61 (10), p. 6507-6514.
- 35 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.

- 36 HERRMANN, P.S.P.; SILVA, M.A.P., BERNARDES FILHO, R.; JOB, A.E.; COLNAGO, L.A.; FROMMER J.E. e MATTOSO L.H.C. (1997). *Microscopia de varredura por força: uma ferramenta poderosa no estudo de polímeros*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, São Paulo.
- 37 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 Nº 15.
- 38 KNOLL, G.F. (1989). *Radiation detection and measurement*. Segunda edição, John Wiley & Sons Inc., New York, pag. 54-55, USA.
- 39 CRUVINEL, P.E. (1987). *Minitomógrafo de raios X e raios – gama computadorizado para aplicações multidisciplinares*. Campinas. 329p. Tese de Doutorado da Universidade de Campinas, Campinas.
- 40 SILVA, A.M. (1997). *Construção e uso de um tomógrafo com resolução micrométrica para aplicações em ciências do solo e do ambiente*. Tese de doutorado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- 41 SPERLING, L. H (1986). *Introduction to Physical Polymer Science*. J. Wiley & Sons, New York, USA.
- 42 FLYNN, J.H. e WALL, L.A. (1966). *Polymer*. Poymer Lett., p.323, USA.

Obras consultadas.

- 1 **AGNELLI, J. A. M.** (1995). *Apostila: Tecnologia de Polímeros*. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos.
- 2 **AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS** (1994). *ASTM D374M - 94 - Standard Test Methods for Thickness of Solid Electrical Insulation (Metric)*. Philadelphia.
- 3 **ARAÚJO, L. C. R.** (1997). *Caracterização química, térmica e mecânica de poliuretanas elastoméricas baseadas em materiais oleoquímicos*. Tese de Doutorado - IFQSC. Universidade de São Paulo, São Carlos.
- 4 **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS** (1998). *NBR 7110 - Isolador de Pino de Porcelana ou Vidro - Padronização de dimensões e características*. Rio de Janeiro, ABNT.
- 5 **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS** (1985). *NBR 5049: Isoladores de porcelana ou de vidro para linhas aéreas e subestações de alta tensão - Método de ensaio*. Rio de Janeiro, ABNT.
- 6 **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS** (1984). *NBR 5032: Isoladores de porcelana ou de vidro para linhas aéreas e subestações de alta tensão - Especificações*. Rio de Janeiro, ABNT.
- 7 **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS** (1998). *NBR 7110: Isoladores de pino de porcelana ou vidro - Padronização de dimensões e características*. Rio de Janeiro, ABNT.
- 8 **BARTNIKAS, R.** (1971). *Dielectric losses in solid - liquid insulating systems - Part II*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI- 6, N^o 1, p. 14.

- 9 **BERGER, T.;** SUNDHARARAJAN, S. and NAGAOSA, T (1997). *Influence of Temperature on the Hydrophobicity of Polymers*. In: Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Minneapolis, October 19-22, V.1, p. 394-397, USA.
- 10 **BINDER, R.G.;** APPLEWHITE, T.H.; KOHLER, G.O. and GOLDBLATT, L.A. (1967). *Chromatographic analysis of seed oil fatty acid. Composition of castor oil*. Western Regional Research Laboratory, Albany, Califórnia. JAOCS 39 (12), USA.
- 11 **CASCHEM COMPANY** (1982). *Castor oil And its chemistry*. Copyright CasChem Inc., New Jersey; USA.
- 12 **CATÁLOGOS DE ISOLADORES ELÉTRICOS** (1998). Empresa Santa Teresinha Ltda. Pedreiras- São Paulo.
- 13 **CATÁLOGOS DE ISOLADORES ELÉTRICOS** (1998). Empresa Ritz – Chance Ind. e Com. S/A. Betim – São Paulo.
- 14 **CLARK, F. M.** (1962). *Insulating Material for design and Engineering Practice*. New York, Editora John Wiley and Sons.
- 15 **DEKKER, A.J.** (1985). *Electrical Engineering Materials*. Prentice - Hall Electrical Engineering Series, USA.
- 16 **DOW CORNING DO BRASIL LTDA.** (s/data). *Informativo: Sugestões para sucesso na moldagem*. São Paulo.
- 17 **EHRlich, A., SMITH, M. K., PATTON, T. C.**(1959). *Castor Polyols for Urethane Foams*. The Journal of the American Oil Chemist's Society, 39, 149.
- 18 **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.

- 19 **GOFFAUX, R.** (1978). *On the nature of dielectric loss in high voltage insulation*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-13, Nº 1, p. 1-8.
- 20 **IGNÁCIO, H.** (1995). *Utilização do Cimento Derivado do Polímero da Mamona no Preenchimento de Falha Óssea. Estudo Experimental em Coelhos*. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto.
- 21 **IGNÁCIO, H., MAZZER, N., BARBIERI, C.H., CHIERICE, G.O.** (1996). *Estudo sobre a Aplicabilidade Médica da Poliuretana Derivada da Mamona*. Resenha Ortopédica, Órgão Oficial da Área de Ortopedia e Traumatologia da Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, Nº 6, Ribeirão Preto.
- 22 **JAIN, G. C.** (1967). *Proprieties of Electrical Engenheering Materials*. New York. Harper International Edition.
- 23 **CALLISTER JR., W. D.** (1994). *Materials Science and Engineering – An Introduction*. John Willey & Sons, Inc. Cap. 4: Imperfections in solids. New York, USA.
- 24 **KELEN, A.** (1977). *Ageing of insulating materials and equipament insulation in service and in tests*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-12, Nº 1, p. 55.
- 25 **KHARMANDAYAN, P.** (1997). *Estudo da Interface de Contato entre Osso e Implantes de Poliuretano com e sem Carbonato de Cálcio, Empregando Microscopia de Luz e Eletrônica de Varredura, em Coelhos*. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Paulo - Escola Paulista de Medicina, São Paulo.
- 26 **KUFFEL, E.** (1984). *High Voltage Engineering*. Great Britain. Printed by Wheaton & Co. LTD, Exeter. Great Britain.
- 27 **KORITSKY, YU** (1970). *Electrical Engineering Materials*. Trad. Por Jacob Feinberg. Moscow. Mir Publishers.
- 28 **KURIYAMA, I.; HAYAKAWA, N; NAKASE, Y.; OGURA, J.; YAGYU, H.; KASAI, K.** (1979). *Effect of dose rate on degradation behavior of insulating polymer materials*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-14, Nº 5, p. 272.

-
- 29 **LAMB, M.A.** (1967). *Electrical Conduction Mechanisms in Thin Insulating Films*. London. General Editor: B.L. Worsnop, B.Sc, PH.D Methuem and Co LTD.
- 30 **LEDA, M.; NAGAO, M.; HIKITA, M.** (1994). *High - field conduction and breakdown in Insulating Polymers*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 1, Nº 5, October.
- 31 **LIMA, A.G.G. E MARTINS, H.J.A.** (1997). *Desempenho de materiais e equipamentos para o setor de energia elétrica*. Seminário Nacional de Qualificação de Materiais e Equipamentos do Setor de Energia Elétrica (SQME), Rio de Janeiro.
- 32 **MAMMAOTTY, K.P.; RAMUTS, T.S.** (1981). *Analysis of Dielectric behavior of castor oil impregnated all paper capacitors*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-16, Nº 5, pp 417-422, October.
- 33 **MATTOSO, L.H.C.** (1993). *Síntese, caracterização e processamento de Polianilina e seus derivados*. Tese (Doutorado) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- 34 **MCCMAHON, E.J.; PUNDERSON, J.O.** (1973). *Dissipation factor of composite polymer and oil insulation structures on extended exposure to simultaneous thermal and voltage stresses*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI- 8, Nº 3, p. 92.
- 35 **MONTANARI, G.C.; RAGHUVeer, R.** (1986). *Thermal endurance evaluation of insulating materials: a theoretical and experimental analyses*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-21, Nº 1, p. 69-77.
- 36 **MOSHKIN, V.A.** (1986). *Castor*. Oxonian Press Pvt. Ltd., New Delhi; USA.
- 37 **NIKULIN, N.V.** (1977). *Manual del electricista principiante sobre materiales y artículos electrotécnicos*. Capítulo 2: Construcciones electroaislantes. Editorial Mir Moscú.
- 38 **Oertel, G.** (1985). *Polyurethane Handbook*,. Hanser. Publisher, Munich, Viena, New York.

-
- 39 **PENTEADO, L.A.A.** (1996). *Torno de ultraprecisão: revisão de projeto mecânico e estrutural*. Dissertação de Mestrado da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos
- 40 **PLANILHA PARA ORÇAMENTO** (1999). *SAP – Contrato 1999*. Companhia Paulista de Força e Luz. São Carlos.
- 41 **PURQUÉRIO, B.M.** (1991). *Granito sintético para estruturas de máquinas e equipamentos de precisão*. Congresso Brasileiro de Polímeros, 1. São Paulo.
- 42 **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.
- 43 **SAUNDERS, J. H. AND FRISCH, K. C.** (1987). *Polyurethanes Chemistry and Technology*. Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.
- 44 **SEIFERT, J.M.; STIETZEL, U. AND KÄRNER, H.C.** (1998). *The Ageing of Composite Insulating Materials – New possibilities to detect and to classify ageing phenomena with dielectric diagnostic tools*. Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Arlington, June, Virginia, USA.
- 45 **TIDJANI, A .ET ALL** (1993). *The Oxidative degradation of stabilized LL.DPE under accelerated and natural conditions*. Die Angewandte Makromolekulare Chemie.v.212. p. 35-43.
- 46 **WINSLOW, F. H.; MATREYEK, W AND TROZZOLO, A. M.** (1972). *Polymers Under the Weather*. SPE Journal, vol. 28.
- 47 **ZANIN, M.** (1992). *Propriedades elétricas do elastômero EPDM para aplicação em isolamento elétrica*. Tese (Doutorado) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- 48 **ZHANG, L.; DING, H.** (1997). *Study on the properties, morfology and applications of castor oil polyurethane-poly (mthyl methacrylate) IPNs*. Journal of Applied Polymer Science, vol. 64, Nº 7 - May 16, p. 1393-1401. IPNs: Interpenetrating Polymer Networks.

Apêndice A:

Técnicas DMA e TG utilizadas na caracterização das resinas poliuretanas.

I Introdução.

Esta parte do texto tem como objetivo descrever as técnicas de **Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)** e **Termogravimetria (TG)**, que foram utilizadas na determinação da temperatura de transição vítrea e da temperatura de decomposição, para a caracterização térmica das resinas poliuretanas.

I.1 DMA - Conceitos teóricos.

O comportamento viscoelástico confere aos polímeros propriedades ímpares, que variam de acordo com sua estrutura molecular. O estudo desse comportamento é importante, porque caracteriza suas propriedades frente a variações de temperaturas e solicitações mecânicas, servindo como indicativo para possíveis aplicações industriais.

O método de análise dinâmico-mecânica (DMA) [12] é baseado na resposta viscoelástica de um polímero, quando este é submetido a uma solicitação senoidal variável, de frequência angular ω , de pequena amplitude.

Quando se aplica uma solicitação senoidal em um material com características de um sólido ideal, este terá uma resposta à deformação também senoidal, porém em fase com esta solicitação. Se o material tiver o comportamento de um líquido ideal, sua resposta será uma deformação de 90° fora de fase, com a resultante defasada em 90° da solicitação. Em uma resposta viscoelástica, ter-se-á os dois comportamentos, como mostra figura I, a seguir.

Figura I: Comportamento: a) resposta elástica, em fase com a solicitação senoidal. b) resposta viscosa ou plástica, 90° fora de fase com a solicitação senoidal. (c) resposta viscoelástica, fora de fase entre 0° e 90° com a solicitação senoidal.

O ângulo de fase pode ser definido como a medida da resposta na deformação, estando esta resposta entre 0° e 90° com a solicitação senoidal, ou seja, quanto o polímero se afasta do comportamento de um sólido ideal, ou se aproxima do comportamento de um líquido ideal. Essa defasagem nas propriedades dinâmicas faz que as curvas de recuperação não acompanhem o mesmo padrão que o da tensão aplicada, sendo acompanhada de uma conseqüente perda de energia. Esta energia é utilizada internamente pelo polímero para que ocorram rearranjos moleculares, a fim de, em seguida, ser dissipada em forma de calor, estando associada a mecanismos de relaxação. A resposta de um material viscoelástico, portanto, é governada por um componente viscoso, que dissipa energia pelo movimento relativo das moléculas e por um componente elástico, que armazena energia até que a tensão seja removida.

A tensão e a deformação podem ser expressas [12], respectivamente por:

$$\sigma = \sigma_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (\text{I.1})$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \sin \omega t \quad (\text{I.2})$$

Onde ω é a frequência e δ é o ângulo de fase.

A equação I.1 pode ser escrita como:

$$\sigma = \sigma_0 \sin \omega t \cos \delta + \sigma_0 \cos \omega t \sin \delta \quad (\text{I.3})$$

Assim, pode-se dizer que a tensão possui dois componentes: um em fase com a deformação ($\sigma_0 \cos \delta$) e outro fora de fase ($\sigma_0 \sin \delta$). Dividindo-se pela deformação ε , é

possível separar os módulos em uma parte real (em fase) e uma parte imaginária (fora de fase). Os componentes podem ser escritos como:

$$E' \text{ ou } G' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \cos \delta \quad (\text{I.4})$$

$$E'' \text{ ou } G'' = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} \sin \delta \quad (\text{I.5})$$

Onde E é o módulo de elasticidade e G, o módulo de cisalhamento.

Pode ser representado também como módulos complexos:

$$E^* = E' + iE'' \quad (\text{I.6})$$

$$G^* = G' + iG'' \quad (\text{I.7})$$

Que podem ser resolvidos matematicamente pelas equações:

$$E^2 = (E')^2 + (E'')^2 \quad (\text{I.8})$$

$$G^2 = (G')^2 + (G'')^2 \quad (\text{I.9})$$

O componente em fase, E' (ou G'), é o módulo de armazenamento que está relacionado com a energia armazenada em cada ciclo, e E'' (ou G'') é o módulo de perda que está relacionado com a energia viscosa, dissipada como calor em cada ciclo. A razão adimensional entre a energia perdida por ciclo (dissipada na forma de calor) e a energia potencial máxima armazenada por ciclo (recuperável) são chamadas de *fator de dissipação* ou *tangente de perda*, ou ainda, *amortecimento* ou *atrito interno*, de acordo com a relação:

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} = \frac{G''}{G'} \quad (\text{I.10})$$

Essa relação indica quanto está longe o comportamento do polímero do comportamento elástico ideal. Materiais com alto valor de $\tan \delta$ dissipam muito da energia que foi utilizada para desfigurá-lo na forma de calor. Se o material tivesse um comportamento elástico ideal, o valor de $\tan \delta$ seria igual a zero, portanto não haveria amortecimento. Por outro lado, se o material tivesse o comportamento de um líquido (*Newtoniano*), o valor de $\tan \delta \rightarrow \infty$, sendo um caso extremo de total dissipação da energia

em calor, ou seja, amortecimento infinito. O comportamento viscoelástico dos polímeros apresenta valores intermediários de amortecimento, situados entre os dois extremos, $0 < \tan \delta < \infty$. Na prática, esses valores se situam de 0,001 a 3 [12].

Uma aplicação direta do amortecimento ($\tan \delta$) é que este pode ser interpretado matematicamente como sendo a variável que define a taxa de mudança do módulo de elasticidade (derivada). Assim, geralmente se utilizam os pontos máximos das curvas $\tan \delta \times$ Temperatura, para determinar as temperaturas de transições vítreas dos materiais viscoelásticos.

2.4.3. Temperatura de Transição Vítrea.

O conhecimento da temperatura de transição vítrea dos polímeros é de grande importância para determinar o tipo de aplicação em que este pode ser utilizado. Polímeros como as borrachas, em temperaturas abaixo da sua transição vítrea, se tornam rígidos, perdendo suas propriedades elásticas. Polímeros rígidos, em temperaturas acima da sua transição vítrea, tornam-se flexíveis, perdendo portanto sua rigidez. A transição vítrea é uma transição termodinâmica de segunda ordem, que está relacionada com a mudança da movimentação molecular dos segmentos das cadeias, devido à rotação de grupos laterais em torno de ligações covalentes. Em um estado vítreo, ou seja, em temperaturas abaixo da transição vítrea, esse tipo de rotação desaparece, vibrando em posições fixas, com pouca chance de rearranjos nas posições. Acima da temperatura de transição vítrea, a amplitude de vibração torna-se maior, ocasionando os movimentos de rotação dos segmentos das cadeias.

Na temperatura de transição vítrea, todas as propriedades do polímero que dependem do movimento molecular irão mostrar uma alteração marcante. Propriedades como a viscosidade, calor específico, coeficiente de expansão e módulo de elasticidade podem ser utilizadas para se determinar esta transição, por meios de métodos como dilatometria, DSC, DMA, Reômetros, etc [41].

Neste estudo, para se determinar a temperatura de transição vítrea do poliuretano, utilizou-se o método de DMA.

2.4.1 Termogravimetria - Conceitos Teóricos

A termogravimetria é uma técnica muito utilizada para a determinação de parâmetros cinéticos de decomposição de materiais poliméricos. Essa determinação fornece informações quantitativas sobre a estabilidade térmica do polímero, podendo ser estimado o seu tempo de

vida. Flynn e Wall [42] observaram que a temperatura de decomposição de uma amostra, quando realizada com razões de aquecimento diferentes, é deslocada para valores diferentes, ou seja, quando se aumenta a razão de aquecimento, a temperatura inicial de decomposição é deslocada para valores mais altos e quando se diminui, a temperatura é deslocada para valores menores. Como o mecanismo de decomposição é o mesmo em todos os níveis de conversão, as curvas obtidas pela equação de Arrhenius ($\log$ razão de aquecimento $\times 1/T$), devem ter todas as mesmas inclinações. A partir desses resultados, Flynn e Wall [42] propuseram o método para o estudo cinético de decomposição.

Portanto, para se determinar a temperatura de decomposição das resinas, utilizou-se o método de termogravimetria.