

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

**CARACTERIZAÇÃO ELÉTRICA DAS RESINAS  
POLIURETANAS DERIVADAS DO ÓLEO DE  
MAMONA, COMO DIELETRICO SÓLIDO.**



Eng<sup>a</sup> Eletricista Cacilda Ribeiro Murakami

DEDALUS - Acervo - EESC



31100013596

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

Orientador: Prof. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga

- São Carlos -

Fevereiro / 1.998

Class.	TESE. EESC
Cuti.	3777
Tombo	T008898

311 000 135 96

ST 0949458

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

M972c Murakami, Cacilda Ribeiro  
Caracterização elétrica das resinas  
poliuretanas derivadas do óleo de mamona, como  
dielétrico sólido / Cacilda Ribeiro Murakami. --  
São Carlos, 1998.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia  
de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1998.  
Área: Engenharia Elétrica.  
Orientador: Prof. Dr. Diógenes Pereira Gonzaga.

1. Caracterização elétrica - resina  
poliuretana. I. Título.

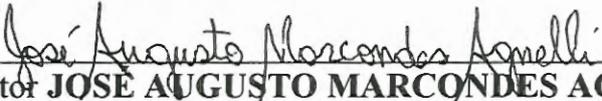
**FOLHA DE APROVAÇÃO**

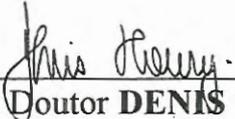
Candidata: Engenheira **CACILDA RIBEIRO MURAKAMI**

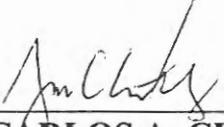
Dissertação defendida e aprovada em 17-02-1998  
pela Comissão Julgadora:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Doutor **DIÓGENES PEREIRA GONZAGA (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Associado **RUY ALBERTO CORRÊA ALTAFIM**  
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Doutor **JOSÉ AUGUSTO MARCONDES AGNELLI**  
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Doutor **DENIS VINICIUS COURY**  
Coordenador da Área de Engenharia Elétrica

  
\_\_\_\_\_  
**JOSÉ CARLOS A. CINTRA**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Ao Jorge  
e a toda minha família,  
que sempre me apoiaram.

---

## SUMÁRIO.

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>i</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>iii</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>v</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>vi</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>ix</b>
<b>SUMMARY.....</b>	<b>x</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2: TIPOS DE RESINAS E APLICAÇÕES.....</b>	<b>4</b>
2.1 Resinas em geral.....	4
2.2 Aspectos históricos da resina poliuretana derivada do óleo de mamona.....	6
2.3 Considerações gerais sobre a química das poliuretanas.....	8
2.3.1 Poliuretanos.....	8
2.3.2 Pré-Polímero.....	9
2.3.3 Polioli.....	10
2.4 Resina A249 + B25015 e Resina A253 + B351.....	11
<b>CAPÍTULO 3: OBTENÇÃO DO CORPO DE PROVA.....</b>	<b>13</b>
3.1 Introdução.....	13
3.2 Confeção de filme de resina poliuretana, por meio de um extensor de filme regulável.....	14
3.3 Confeção de filme de resina poliuretana, por meio de um extensor de filme fixo.....	14
3.4 Confeção de filme de resina poliuretana, por meio do sistema por centrifugação.....	15
3.5 Confeção do corpo de prova, por meio de forma retangular.....	20
3.6 Confeção do corpo de prova, por meio de tarugo de resina.....	20
3.6.1 Complementação sobre o método de confeção do corpo de prova.....	21

<b>CAPÍTULO 4: ENSAIOS ELÉTRICOS PARA A DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS: RIGIDEZ DIELÉTRICA, RESISTIVIDADE E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA.....</b>	<b>23</b>
4.1 Introdução geral.....	23
4.2 Rigidez dielétrica.....	24
4.3 Resistividade volumétrica e superficial.....	27
4.3.1 Resistividade.....	27
4.3.2 Esquema para a medição das resistências volumétrica e superficial.....	29
4.3.3 Técnicas de guarnição.....	33
<b>CAPÍTULO 5: ENSAIOS ELÉTRICOS PARA A DETERMINAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS: PERMISSIVIDADE, FATOR DE DISSIPACÃO, ÍNDICE DE PERDAS, FATOR DE QUALIDADE E SUSCEPTIBILIDADE ELÉTRICA.....</b>	<b>34</b>
5.1 Ensaio elétrico.....	34
5.2 Diagrama fasorial das correntes em um dielétrico.....	39
<b>CAPÍTULO 6: RESULTADOS.....</b>	<b>42</b>
6.1 Divisão dos resultados.....	42
6.2 Resultados da Resina A249 + B25015.....	42
6.2.1 Espessuras das amostras.....	42
6.2.2 Característica: Rigidez dielétrica.....	43
6.2.3 Características: Resistividade e condutividade, volumétrica e superficial.....	44
6.2.4 Características: Permissividade dielétrica, fator de dissipação e índice de perdas dielétricas.....	45
6.3 Resultados da Resina A253 + B351.....	49
6.3.1 Espessuras das amostras.....	49

6.3.2 Característica: Rigidez dielétrica.....	50
6.3.3 Características: Resistividade e condutividade, volumétrica e superficial.....	51
6.3.4 Características: Permissividade dielétrica, fator de dissipação e índice de perdas dielétricas.....	52
6.4 Resultados finais das Resinas: A249 + B25015 e A253 + B351.....	56
<b>CAPÍTULO 7: CONCLUSÕES.....</b>	<b>58</b>
7.1 Discussão das dificuldades encontradas.....	58
7.2 Discussão dos resultados e conclusão final.....	59
<b>ANEXOS</b>	
Anexo A.....	61
Anexo B.....	76
Anexo C.....	78
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>81</b>
<b>OBRAS CONSULTADAS.....</b>	<b>84</b>

---

**LISTA DE FIGURAS**

<b>FIGURA 01:</b> Extensor de filme de resina com espessura de ajuste fixo.....	15
<b>FIGURA 02:</b> Equipamento para confecção de filme de resina, pelo sistema de centrifugação.....	16
<b>FIGURA 03:</b> Bancada para a confecção de filme de resina poliuretana derivada do óleo de mamona.....	17
<b>FIGURA 04:</b> Fotomicrografia do filme da Resina A253 + B351 (aumento de 25 vezes)....	18
<b>FIGURA 05:</b> Fotomicrografia do filme da Resina A249 + B25015 (aumento de 25 vezes).	18
<b>FIGURA 06:</b> Fotomicrografia do filme pintado da Resina A249 + B25015 (25 vezes).....	19
<b>FIGURA 07:</b> Fotomicrografia do filme pintado da Resina A253 + B351 (25 vezes), após o ensaio de rigidez dielétrica.....	19
<b>FIGURA 08a:</b> Corpo de prova (reprovado).....	25
<b>FIGURA 08b:</b> Detalhe do corpo de prova (reprovado).....	26
<b>FIGURA 09:</b> Esquema da montagem para a medição da rigidez dielétrica.....	26
<b>FIGURA 10:</b> Esquema da montagem para a medição da resistividade vol. e sup.....	28
<b>FIGURA 11:</b> Esquema principal da montagem para medir resistividade volumétrica.....	30
<b>FIGURA 12:</b> Esquema principal da montagem para medir resistividade superficial.....	32
<b>FIGURA 13:</b> Disposição concêntrica dos eletrodos em uma amostra ao medir $\rho_s$ .....	32
<b>FIGURA 14:</b> Célula de eletrodos para a medição da permissividade e do fator de dissipação dielétrica.....	35
<b>FIGURA 15:</b> Circuito equivalente do capacitor com perdas.....	36
<b>FIGURA 16:</b> Diagrama fasorial das correntes em um dielétrico.....	40
<b>FIGURA 17:</b> Curva característica da variação da permissividade dielétrica da Resina A249 + B25015, com a frequência da tensão aplicada.....	48

---

<b>FIGURA 18:</b> Curva característica da variação do fator de dissipação dielétrica da Resina A249 + B25015, com a frequência da tensão aplicada.....	48
<b>FIGURA 19:</b> Variação da permissividade dielétrica da Resina A249 + B25015 com o fator de dissipação .....	49
<b>FIGURA 20:</b> Variação da permissividade dielétrica da Resina A253 + B351, com a frequência da tensão aplicada.....	55
<b>FIGURA 21:</b> Variação do fator de dissipação dielétrica da Resina A253 + B351, com a frequência da tensão aplicada.....	55
<b>FIGURA 22:</b> Permissividade dielétrica em função do fator de dissipação dielétrico.....	56

---

**LISTA DE TABELAS**

<b>TABELA 01:</b> Média aritmética das espessuras dos corpos de prova da Resina 249 + B25015, de aproximadamente 1 mm.....	43
<b>TABELA 02:</b> Média aritmética das espessuras dos corpos de prova da Resina A249 + B25015, de aproximadamente 2 mm.....	43
<b>TABELA 03:</b> Resultados dos valores de rigidez dielétrica da Resina A249+ B25015.....	44
<b>TABELA 04:</b> Resultados dos valores da resistividade volumétrica e superficial da Resina A249+ B25015.....	44
<b>TABELA 05:</b> Resultados dos valores da condutividade volumétrica e superficial da Resina A249+ B25015.....	45
<b>TABELA 06:</b> Resultados dos valores da permissividade dielétrica, do fator de dissipação e índice de perdas dielétricas da Resina A249+ B25015 com tensão elétrica aplicada de 1,5 V a 60 Hz.....	45
<b>TABELA 07:</b> Resultados dos valores da permissividade dielétrica, do fator de dissipação e índice de perdas dielétricas da Resina A249+ B25015 com tensão elétrica aplicada de 2,0 kV a 60 Hz.....	46
<b>TABELA 08:</b> Valores da susceptibilidade dielétrica e do fator de qualidade da Resina A249 + B25015 com tensão elétrica aplicada de 1,5 V a 60 Hz.....	46
<b>TABELA 09:</b> Valores da susceptibilidade dielétrica e do fator de qualidade da Resina A249 + B25015 com tensão elétrica aplicada de 2,0 kV a 60 Hz.....	47
<b>TABELA 10:</b> Variação da permissividade e do fator de dissipação da Resina A249 + B25015, em função da frequência da tensão aplicada.....	47
<b>TABELA 11:</b> Média aritmética das espessuras dos corpos de prova da Resina A253 + B351, de aproximadamente 1 mm.....	49

---

<b>TABELA 12:</b> Média aritmética das espessuras dos corpos de prova da Resina A253 + B351, de aproximadamente 2 mm.....	50
<b>TABELA 13:</b> Resultados dos valores de rigidez dielétrica da Resina A253 + B351.....	50
<b>TABELA 14:</b> Resultados dos valores da resistividade volumétrica e superficial da Resina A253 + B351.....	51
<b>TABELA 15:</b> Resultados dos valores da condutividade volumétrica e superficial da Resina A253 + B351.....	51
<b>TABELA 16:</b> Valores da permissividade dielétrica, do fator de dissipação e do índice de perdas dielétricas da Resina A253 + B351 com tensão elétrica aplicada de 1,5 V a 60 Hz.....	52
<b>TABELA 17:</b> Valores da permissividade dielétrica, do fator de Dissipação e do índice de perdas dielétricas da Resina A253 + B351 com tensão elétrica aplicada de 2,0 kV a 60 Hz.....	53
<b>TABELA 18:</b> Valores da susceptibilidade dielétrica e do fator de qualidade da Resina A253 + B351 com tensão elétrica aplicada de 1,5 V a 60 Hz.....	53
<b>TABELA 19:</b> Valores da susceptibilidade dielétrica e do fator de qualidade da Resina A253 + B351 com tensão elétrica aplicada de 2,0 kV a 60 Hz. ....	54
<b>TABELA 20:</b> Valores da permissividade e do fator de dissipação dielétrico da Resina A253 + B351, em função da frequência.....	54
<b>TABELA 21:</b> Resultado final da caracterização elétrica das Resinas: A249+B25015 e A253 + B351.....	57

---

### Lista de Abreviaturas e Siglas.

- A.B.N.T. - Associação Brasileira de Normas Técnicas;
- ASTM - American Society for Testing and Materials;
- BS - British Standard
- c.p. - corpo de prova;
- C.N.P.T.U. - condições normais de pressão, temperatura e umidade relativa do ar;
- DIN - Deutscher Industrie Normen;
- I.P.T. - Instituto de Pesquisas Tecnológicas;
- NBR - Normas Brasileiras;
- P.V.C. - Poli Cloreto de Vinila;
- PU's - Poliuretanas e
- r.p.m. - rotações por minuto;

---

**Lista de Símbolos.**

- $C'$  - componente da capacitância, pF;
- $C_{add}$  - capacitância adicional, pF;
- $C_b$  - capacitância de borda, pF;
- $C_m$  - capacitância medida e corrigida, pF;
- $C_m'$  - capacitância medida, pF;
- $C_o$  - capacitância correspondente no vácuo (igual ao do ar) corrigida, pF;
- $C_o'$  - capacitância correspondente no vácuo (igual ao do ar), pF;
- $C_p$  - capacitância em paralelo, pF;
- $C_t$  - capacitância de dispersão do campo, pF;
- $d_1$  - diâmetro do eletrodo interno, cm;
- $d_2$  - diâmetro interior do eletrodo guarda, cm;
- $E$  - intensidade do campo elétrico, V/cm;
- $\epsilon''$  - índice de perda dielétrica, %;
- $\epsilon_o$  - constante da permissividade dielétrica no vácuo  $\approx 8,85416 \cdot 10^{-14}$  F/cm;
- $\epsilon_r$  - permissividade dielétrica relativa;
- $f$  - frequência, Hz;
- $G$  - galvanômetro;
- $\gamma_v$  - condutividade volumétrica,  $\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ ;
- $\gamma_s$  - condutividade superficial,  $\Omega^{-1}$ ;
- $h$  - espessura da amostra, mm ou cm, conforme especificado;
- $i$  - corrente elétrica, A;

- 
- I - corrente elétrica resultante, A;
- $I_a$  - componente ativa da corrente elétrica resultante, A;
- $I_a'$  - componente ativa pura da corrente resultante, A;
- $I_{adda}$  - corrente adicional da componente ativa da corrente resultante, A;
- $I_{addc}$  - corrente adicional da componente capacitiva da corrente resultante, A;
- $I_c$  - componente capacitiva da corrente elétrica resultante, A;
- $I_c'$  - componente capacitiva pura da corrente capacitiva, A;
- $I_s$  - corrente de condutância superficial, A;
- $I_v$  - corrente de condutância volumétrica, A;
- J - densidade de corrente, A/cm<sup>2</sup>;
- N - número de dipolos por centímetro cúbico;
- p - momento de dipolo elétrico, coulomb-cm;
- P - densidade de polarização, V/cm;
- p' - perímetro de uma área, cm;
- $\pi$  - constante pi  $\approx 3,14$ ;
- $R_d$  - rigidez dielétrica, kV/mm;
- $R_p$  - resistência em paralelo,  $\Omega$ ;
- $R_{sm}$  - resistência superficial medida,  $\Omega$ ;
- $R_{vm}$  - resistência volumétrica medida,  $\Omega$ ;
- $\rho_s$  - resistividade superficial,  $\Omega$ ;
- $\rho_v$  - resistividade volumétrica,  $\Omega \cdot \text{cm}$ ;
- S - área, cm<sup>2</sup>;
- $\text{tang } \delta = D$  - fator de dissipação dielétrica, %;
- T - temperatura, °C;
- $U_b$  - tensão de ruptura, kV;

$U_r$  - umidade relativa do ar, %;

$V$  - potencial elétrico, V;

$V'$  - voltímetro;

$\omega$  - velocidade angular, rad/s;

$W$  - perdas dielétricas, W;

$\chi_e$  - susceptibilidade elétrica; e

$X_p$  - reatância em paralelo,  $\Omega$ .

## RESUMO

O desenvolvimento de novos produtos e novas tecnologias tem se tornado um fator predominante no contexto da competitividade, onde se observa uma constante busca pela melhoria da qualidade e baixo custo.

Trabalhos recentes mostram o desenvolvimento de novos materiais dielétricos, baseados em resinas poliuretanas derivadas do óleo da *mamona (ricinus communis)*. Hoje, suas principais aplicações encontram-se nas áreas médicas.

Pesquisadores brasileiros podem sintetizar tais materiais, assim, este trabalho visa caracterizá-los quanto à suas propriedades elétricas. Um grande número de ensaios foram realizados, obtendo-se resultados que sugerem perspectivas promissoras para sua utilização como isolantes sólidos.

A metodologia de preparo das amostras das resinas adequadas aos ensaios é também apresentada.

**SUMMARY.**

The development of new products and new technologies have become a predominant factor for competitiveness, in which it is observed a constant search for the quality improvement and low cost.

Recent works show the development of new dielectric materials based on poliurethane resins derived from castor oil (*ricinus communis*). Today, the main applications of such resins are found in the medical areas.

Brazilian researchers can synthesize those materials, thus, this work aims at characterizing the materials according to their electric properties. A number of tests were executed, and the obtained results suggest promising perspectives for their use as solid insulating.

The methodology for preparing the adequate resin samples for the tests is also presented.

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO.

Os materiais em Engenharia Elétrica podem ser divididos em quatro grandes grupos: condutores, semicondutores, magnéticos e isolantes (ou dielétricos).

Este trabalho baseia-se na análise e estudo de dois tipos de resinas derivadas do óleo de mamona, e tem como objetivo obter a caracterização elétrica das mesmas, que se comportam como dielétricos sólidos.

Estas resinas foram desenvolvidas pelo Grupo de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros do Instituto de Química de São Carlos da USP, sob direção do Prof. Dr. Gilberto O. Chierice, conforme PLEPIS (1.992).

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 aplicações dessas resinas com o que este trabalho poderá contribuir.

As duas resinas a serem caracterizadas são classificadas como: Resina A249 + B25015 e Resina A253 + B351.

Antes e durante a realização deste trabalho, avaliaram-se os princípios básicos para selecionar um material isolante com aplicações específicas na Engenharia Elétrica, os quais preenchessem as condições de uso comercial.

Os fatores que foram considerados são:

- 
- custo: valor consideravelmente baixo, devido à produção da matéria-prima, fruto da planta mamona (“*RICINUS COMMUNIS*”), ser de fácil obtenção na agricultura brasileira;
  - facilidade de obtenção: proporcionada pelo IQSC;
  - avaliação sobre a demanda comercial: com boas perspectivas após pesquisas de aplicações práticas;
  - propriedades boas: químicas e mecânicas (citadas durante o texto);
  - propriedades elétricas excelentes: como serão observadas ao longo deste trabalho.

As características elétricas consideradas boas para um dielétrico, são:

- Rigidez dielétrica elevada;
- Resistividade volumétrica e superficial, suficientemente grande;
- Perda dielétrica mínima;
- Condutividades dielétricas (volumétrica e superficial), baixas.

No caso da permissividade dielétrica, os materiais isolantes são usados em geral de dois modos distintos:

- 1) para suportar e isolar componentes de um sistema elétrico e eletrônico e
- 2) para funcionar como dielétrico de um capacitor.

No primeiro caso, o material é geralmente designado para ter um valor de capacitância tão pequeno quanto possível, com propriedades mecânicas, químicas e resistência térmicas aceitáveis. Isto corresponde a um material com valor baixo de permissividade dielétrica.

Para a segunda aplicação, é desejável que o material tenha um valor alto de permissividade, de modo que o capacitor possa ser fisicamente o menor possível.

Valores intermediários de permissividade dielétrica são algumas vezes usados para graduação de pressão em bordas ou final de condutores para minimizar o efeito corona em corrente alternada, segundo ASTM D150 (1.978).

---

No capítulo 2, comentam-se os tipos de resinas em geral, os aspectos históricos da resina poliuretana derivada do óleo de mamona, os aspectos químicos destas resinas e fornecem informações sobre as resinas A249 + B25015 e a A253 + B351, em estudo.

No capítulo 3, são apresentados os métodos para a obtenção dos corpos de prova. A pesquisa foi concentrada na obtenção de corpos de prova adequados, que realmente permitissem conseguir dados sobre as resinas em estudo, bem como realizar ensaios elétricos característicos. Como há pouca informação sobre o material, por meio de métodos e tentativas experimentais melhoraram-se os corpos de prova progressivamente e, finalmente, com ensaios, obtiveram-se resultados precisos e confiáveis.

No capítulo 4, encontram-se os métodos dos ensaios realizados para a determinação da rigidez dielétrica, das resistividades volumétrica e superficial e os cálculos das condutividades elétricas correspondentes.

No capítulo 5, complementa-se a parte experimental, apresentando-se os ensaios para a determinação da permissividade e do fator de dissipação dielétricos. As outras características, como o índice de perdas e a susceptibilidade, são calculadas pelas equações apresentadas.

No capítulo 6, encontram-se os resultados com a caracterização elétrica das duas resinas.

E finalmente, no capítulo 7, são mostradas as dificuldades encontradas, uma discussão dos resultados obtidos e a conclusão final, com possíveis aplicações elétricas.

## CAPÍTULO 2

### Tipos de Resinas e Aplicações.

#### 2.1 Resinas em geral.

Compostos eletroisolantes são líquidos no momento de aplicar que posteriormente se solidificam.

De acordo com as aplicações, os compostos dividem-se em impregnantes e de encapsulamento. Os primeiros aplicam-se em impregnação entre os enrolamentos de máquinas e de aparelhos elétricos, os segundos servem para “preencher” cavidades nos acoplamentos dos cabos, assim como nos aparelhos, instrumentos elétricos e, também, nos capacitores.

Entre as resinas de encapsulamento disponíveis no mercado, as seguintes são de importância técnica especial no campo da engenharia elétrica, como:

- resina epóxi;
- resina de poliéster não- saturado;
- resina poliuretana.

Seguem algumas informações, segundo o catálogo da GLASURIT (1.990), sobre cada resina acima:

**a) Resina epóxi.**

As resinas epóxis tomaram-se conhecidas especialmente pelo tipo bisfenol-A, e até hoje, constitui a base da maioria dos produtos desta espécie disponíveis no mercado.

De acordo com suas composições, resultam em produtos de baixa viscosidade e melhores propriedades de encapsulamento, ainda que tenha que se lidar com uma estabilidade térmica reduzida e um aumento precoce do valor do fator de dissipação dielétrica, sob temperatura elevada.

As resinas epóxis à base de bromo alcançaram alguma importância como resinas auto-extinguíveis e altamente resistentes à chama.

Como exemplo de aplicação, podem-se citar motores elétricos comerciais do tipo conjunto moto-bomba, com impregnação de resina epóxi nos enrolamentos do estator, como auxílio na isolação dos mesmos, que funcionam com água no seu entreferro. Porém, são motores do tipo descartáveis, sem recuperação do estator.

**b) Resina de poliéster não-saturado.**

As resinas à base de poliéster não saturado são produtos de condensação de álcoois polivalentes e ácidos dicarboxílicos dissolvidos no monômero estireno.

Nos últimos anos, os poliesterimidas não saturados tomaram-se particularmente importantes, devido à sua excelente estabilidade térmica.

Eles são usados preferivelmente como resinas de impregnação. E tendo em vista seu preço acessível e algumas propriedades em sua processabilidade, são muito usados para o encapsulamento de pequenos componentes produzidos em grande escala, em instalações de encapsulamento semi ou totalmente automáticas, entre cujas características está a de poderem ser facilmente desmoldados.

### **c) Resinas poliuretanas.**

As resinas poliuretanas são compostas por dois componentes: o pré-polímero com terminação isocianato e o polioliol, comentados a seguir.

Quando curados por poliadição, estes 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; apresentando, assim, alternativas em relação à sua flexibilidade final.

Devido à baixa redução de volume durante a cura e a uma reação exotérmica mínima, os tipos flexíveis de resinas à base de poliuretano podem ser usados facilmente em eletrônica. Também a sua provável boa resistência à intempérie, abre possibilidades para sua aplicação em objetos a serem instalados ao ar livre.

Atualmente, são restritas as áreas de pesquisa sobre esse tipo de resina poliuretana, principalmente sobre a derivada do óleo de mamona. Por isso, mais informações serão fornecidas durante este texto.

## **2.2 Aspectos históricos da resina poliuretana derivada do óleo de mamona.**

Os estudos da utilização do óleo de mamona e derivados iniciaram em 1.947 com BAYER (1.947) na preparação de filmes de poliuretana para recobrimento de superfície.

Em 1.957, segundo SAUNDERS (1.987), Detrick e Barthel propuseram o primeiro trabalho utilizando o óleo de mamona como componente da formulação de Resina PU. Nesses primeiros trabalhos, a aplicação do óleo de mamona na síntese de resinas PU estava restrita à preparação de pré-polímeros e polióis glicólicos.

O avanço maior deu-se na preparação de resinas PU, com o desenvolvimento dos poliéteres derivados de petróleo, quando este tipo de material tornou-se popular, sendo utilizado nos mais diferentes campos de aplicação. A vantagem dos poliéteres frente aos derivados do óleo de mamona estava principalmente no custo, visto que aqueles eram derivados de subprodutos do petróleo. Esta defasagem comercial fez que houvesse um desinteresse pelo desenvolvimento das resinas PU derivadas de óleo de mamona, sendo restrita a aplicações mais nobres.

O fator importante, que proporcionou a retomada dos estudos da química dos óleos vegetais, foi a tendência atual de se buscar produtos derivados da biomassa, por serem biodegradáveis ou recicláveis e principalmente não poluentes.

Como o Brasil é um país de clima tropical, caracterizando-se como um dos grandes produtores de óleos vegetais, em particular do óleo de mamona, o desenvolvimento de tecnologias nesta área é de grande importância nacional.

Em 1.984, o Laboratório de Química Analítica e Tecnologia de Polímeros (LQATP), iniciou, no Departamento de Química da USP de São Carlos, a pesquisa e desenvolvimento dos polióis das poliuretanas. O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver materiais para aplicações em telecomunicação, especialmente, em *Bloqueio de Pressurização de Cabos Telefônicos*, o que permitiu a aquisição de conhecimentos na área de sínteses de intermediários para Resinas PU's. Este projeto fez parte de uma linha de pesquisas desenvolvida junto com a TELEBRÁS (1.984), com a Secretaria da Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo (1.988), Finep (1.990), com a Clímax Indústria e Comércio (1.987) e Projeto PADCT (1.991), e todas elas tiveram como característica principal o desenvolvimento da poliuretana derivada do óleo de mamona.

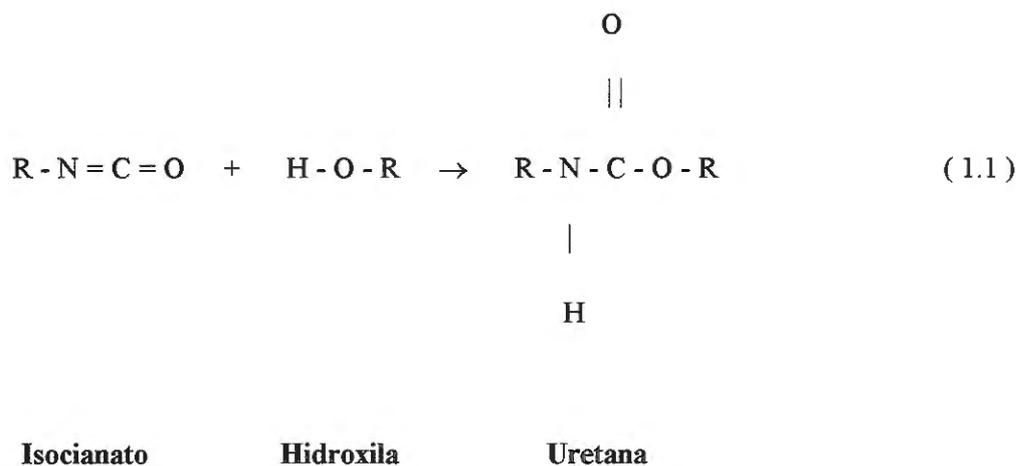
Atualmente, um dos temas que mais vêm se destacando no LQATP é o estudo com poliuretanos derivados do óleo de mamona para aplicação na área médica. E, futuramente, a

partir da caracterização elétrica, que é o objetivo deste trabalho muitos outros poderão ser desenvolvidos para a aplicação na área de engenharia elétrica.

## 2.3 Considerações Gerais sobre a química das poliuretanas.

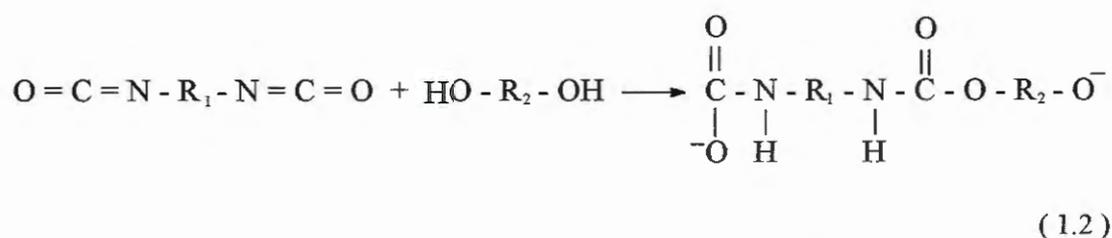
### 2.3.1 Poliuretanos

É conhecido como uretano (ou uretana), o produto da reação química entre um grupo isocianato e um grupo hidroxila.



Esta reação que, foi descoberta em 1849 por WURTZ (1.949), só teve aplicação comercial na década de 40, um século após, quando BAYER desenvolveu na Alemanha os primeiros polímeros poliuretanos.

A polimerização dos poliuretanos ocorre quando reagimos um composto com dois ou mais grupos isocianato em sua estrutura com um poliálcool, ou seja, um álcool polifuncional.



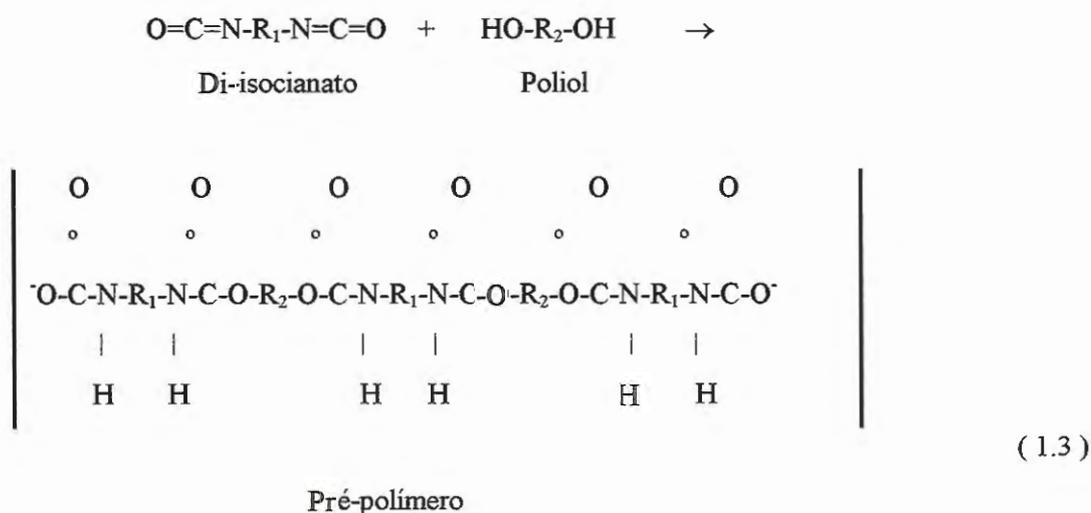
**Di-isocianato**

**Poliol**

**Poliuretano**

### 2.3.2 Pré-Polímero

Devido à alta reatividade dos compostos que contêm grupos isocianatos, geralmente é feita uma pré-polimerização com um polioliol, aumentando sua massa molecular e deixando uma porcentagem de isocianato livre para reagir com o polioliol final.

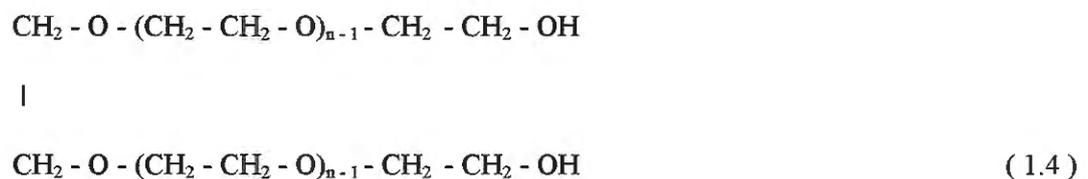


Os compostos contendo grupos isocianatos são encontrados em duas classes distintas: os aromáticos, dos quais os mais utilizados são o difenilmetano di-isocianato (MDI) e o tolueno di-isocianato (TDI), e os alifáticos, sendo mais utilizado o hexametileno di-isocianato (HDI) e o isofurona di-isocianato (IPDI), conforme EHRlich (1.959). O pré-polímero

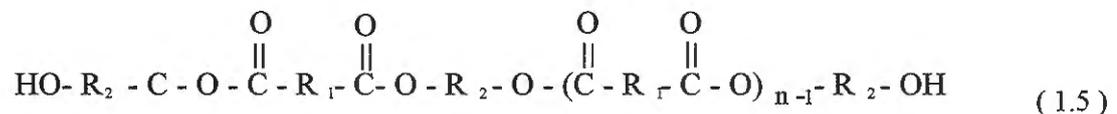
estudado neste trabalho foi sintetizado a partir do MDI e de um poliol derivado do óleo de mamona.

### 2.3.3 Poliol

Os polióis são encontrados na forma de poliéteres ou poliésteres, com diferentes funcionalidades e massas molares.

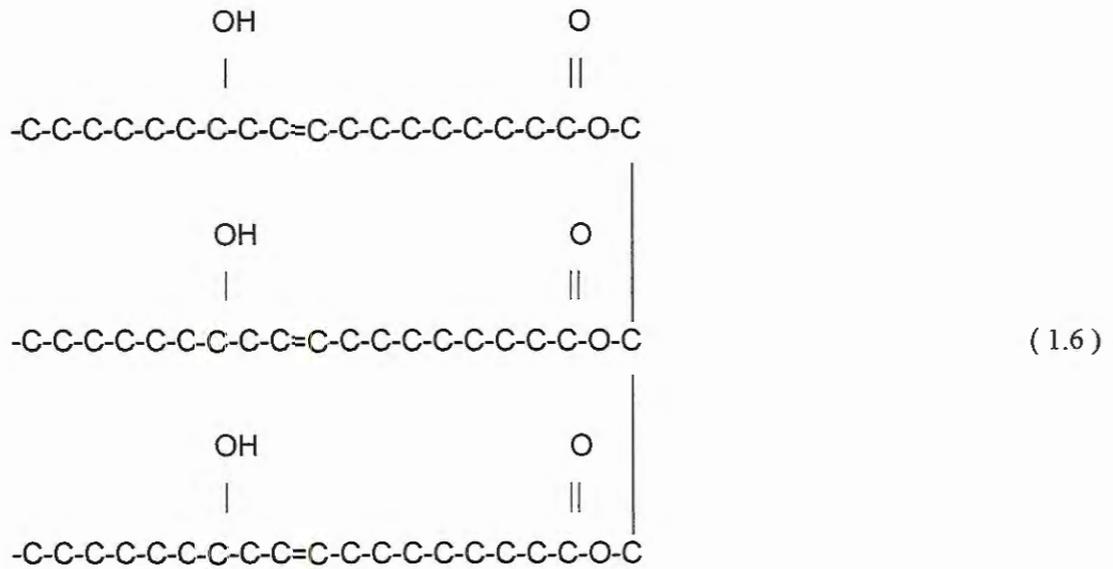


#### Poliol poliéter



#### Poliol poliéster

O óleo de mamona, devido à sua composição (composto de 89% do triglicéride do ácido ricinoleico) é considerado um poliol poliéster natural, trifuncional, como podemos verificar em *Castor Oil and its Derivatives* (1.980).



#### Molécula do Triglicéride do Ácido Ricinoleico

O que difere o ácido ricinoleico da grande maioria dos ácidos graxos presentes na natureza é a presença, em sua estrutura molecular, do grupo hidroxila no 12º carbono. Esta particularidade é que faz do triglicéride do ácido ricinoleico um poliol natural trifuncional. A partir do ácido ricinoleico, podem-se obter também ésteres com diferentes funcionalidades e massa molecular, por meio de reações de esterificação com glicóis.

O poliol utilizado neste estudo é um poliéster derivado do ácido ricinoleico.

#### 2.4 Resina A249 + B25015 e Resina A253 + B351.

Dependendo do material de partida empregado, os produtos da reação podem ter propriedades físicas altamente diferentes, embora quimicamente sejam bastante semelhantes. Logo, diante da variedade de resinas poliuretanas obtidas, foram escolhidas as seguintes resinas para a caracterização elétrica:

- Resina A249 + B25015, proporção 1:1, com tempo de cura de aproximadamente vinte e quatro horas, em temperatura ambiente;

---

- Resina A253 + B351, proporção 1: 1.75, com tempo de cura de aproximadamente vinte e quatro horas.

As resinas poliuretanas possuem características físicas que se destacam por combinarem resistência mecânica alta (tensão de ruptura) com elevado grau de estiramento antes da ruptura (porcentagem de alongamento). Esta resina, derivada do óleo de mamona, é um polímero cuja dureza varia de 40 a  $\pm 70$  Shore D (amostras rígidas) de acordo com a Norma ASTM D2240-75, a qual define a dureza de materiais poliméricos como resistência à penetração local aplicada.

E finalmente, segundo análises químicas feitas por ARAÚJO (1.993), estas resinas podem suportar temperaturas de 80 a 200 °C, sem alterar suas características químicas.

# CAPÍTULO 3

## Obtenção do Corpo de Prova.

### 3.1 Introdução

A obtenção do corpo de prova deste tipo de resina poliuretana para a realização de ensaios elétricos defrontou-se com um sério problema, ocasionado pelo aparecimento das bolhas de ar, que interferiram muito nos resultados finais.

Para solucionar este problema, foram realizados vários métodos diferentes de confecção dos corpos de prova. São eles:

- Primeiro: extensor de filme regulável (reprovado);
- Segundo: extensor de filme fixo (reprovado);
- Terceiro: sistema por centrifugação (reprovado);
- Quarto: sistema de preenchimento em forma retangular (reprovado); e
- Quinto: sistema de tarugo e torneamento de fatias de amostras (aprovado).

O funcionamento de cada método citado acima e suas justificativas e implicações são apresentados a seguir.

### **3.2 Confeção de filme de resina poliuretana, por meio de um extensor de filme regulável.**

A princípio, o método mais prático para a confecção de filme de resina poliuretana era pela utilização de um equipamento chamado de extensor de filme, só que de espessura regulável.

O processo de produção consistia na colocação da resina sobre um vidro limpo, que era “empurrada” pelo extensor ao longo do vidro para formar o filme. O vidro era comum, liso e de dimensões de 15 x 30 cm e de 4 mm de espessura.

Este método não deu certo pelos seguintes motivos:

- quando passava o extensor de filme, parte da resina retornava, o que impedia uniformidade na espessura do corpo de prova;
- a regulagem da espessura colocada no extensor nem sempre resultava na espessura desejada (de aproximadamente 1/10 mm);
- nesse processo de “empurrar” a resina, no final, a quantidade de bolhas de ar e poros era grande.

**Observação:** Foi escolhido filme de resina com uma espessura pequena, devido ao nível de tensão utilizado no laboratório para o ensaio, que era em torno de 15 kV.

### **3.3 Confeção de filme de resina poliuretana, por meio de um extensor de filme fixo.**

Diante das dificuldades do método anterior, decidiu-se construir um extensor de filme com regulagem fixa, no valor de espessura desejável. Na figura 1, encontra-se uma foto do extensor construído.

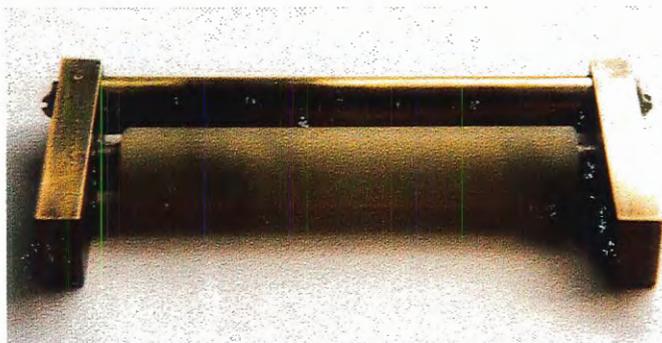


Figura 1: Extensor de filme de resina com espessura de ajuste fixo.

Vantagens desse método:

- homogeneidade melhor na espessura do corpo de prova;
- espessura em torno de 1/10 mm, como desejado;
- este extensor tinha características próprias para este tipo de resina. Por exemplo, ao invés da parte de aço retangular que “empurrava” a resina, utilizou-se um material que não tivesse aderência com a resina, o P.V.C. e de forma cilíndrica, o que facilitava o deslizamento da mesma.

Desvantagem:

- permanência da mesma quantidade de bolhas e poros no filme de resina.

### **3.4 Confeção de filme de resina poliuretana, por meio do sistema por centrifugação.**

Com a intenção de espalhar a resina sobre o vidro, de modo a obter uma folha de resina, uniforme e sem o problema da quantidade de bolhas, optou-se por construir um outro equipamento, que produziria o filme por um sistema de centrifugação. Na figura 2, temos uma fotografia do equipamento.



Figura 02: Equipamento para confecção de filme, pelo sistema de centrifugação.

Esse equipamento possui uma peça circular onde se coloca o vidro (também circular), por onde se derrama vagarosamente a resina. É acionado por um motor de indução monofásico com 1.700 r.p.m.

Vantagens desse método:

- o filme continua com a espessura homogênea e fina;
- a quantidade de bolhas foi diminuída por causa da centrifugação.

A espessura do filme era estimada pelo controle visual. Quanto maior o tempo de centrifugação mais fino ficava o filme de resina, e vice-versa. Com a prática do operador, conseguiam-se filmes com espessuras próximas.

Teve-se o cuidado, neste método, de não deixar que o vidro onde era despejada a resina vibrasse, para não tirar a homogeneidade da espessura, prendendo-o com uma ventosa. Como também, para aperfeiçoamento deste método, foi montada uma bancada própria, que se encontra na foto da figura 3 a seguir.



Figura 03: Bancada para a confecção de filme de resina poliuretana derivada do óleo de mamona.

Os componentes da bancada estão listados a seguir:

- 1 - local de limpeza dos vidros;
- 2 - suporte para os vidros;
- 3 - balança analítica;
- 4 - estufa;
- 5 - bomba a vácuo;
- 6 - copo para mistura dos compostos;
- 7 - sistema centrífugo;
- 8 - suporte para armazenagem do filme de resina, para o processo de cura;
- 9 - vasilha para retirada do filme;
- 10 - bastidores (como suporte).

Este método foi reprovado, pois na forma de filme a quantidade de bolhas e suas dimensões, ainda que menores que nos métodos anteriores, afetavam fortemente as medidas elétricas.

Por esse último método, conseguiu-se obter um corpo de prova sem bolhas visíveis, denominadas macroscópicas, mas não as bolhas microscópicas, mostradas nas figuras 4 e 5.



Figura 02: Equipamento para confecção de filme, pelo sistema de centrifugação.

Esse equipamento possui uma peça circular onde se coloca o vidro (também circular), por onde se derrama vagorosamente a resina. É acionado por um motor de indução monofásico com 1.700 r.p.m.

Vantagens desse método:

- o filme continua com a espessura homogênea e fina;
- a quantidade de bolhas foi diminuída por causa da centrifugação.

A espessura do filme era estimada pelo controle visual. Quanto maior o tempo de centrifugação mais fino ficava o filme de resina, e vice-versa. Com a prática do operador, conseguiam-se filmes com espessuras próximas.

Teve-se o cuidado, neste método, de não deixar que o vidro onde era despejada a resina vibrasse, para não tirar a homogeneidade da espessura, prendendo-o com uma ventosa. Como também, para aperfeiçoamento deste método, foi montada uma bancada própria, que se encontra na foto da figura 3 a seguir.



Figura 03: Bancada para a confecção de filme de resina poliuretana derivada do óleo de mamona.

Os componentes da bancada estão listados a seguir:

- 1 - local de limpeza dos vidros;
- 2 - suporte para os vidros;
- 3 - balança analítica;
- 4 - estufa;
- 5 - bomba a vácuo;
- 6 - copo para mistura dos compostos;
- 7 - sistema centrífugo;
- 8 - suporte para armazenagem do filme de resina, para o processo de cura;
- 9 - vasilha para retirada do filme;
- 10 - bastidores (como suporte).

Este método foi reprovado, pois na forma de filme a quantidade de bolhas e suas dimensões, ainda que menores que nos métodos anteriores, afetavam fortemente as medidas elétricas.

Por esse último método, conseguiu-se obter um corpo de prova sem bolhas visíveis, denominadas macroscópicas, mas não as bolhas microscópicas, mostradas nas figuras 4 e 5.



Figura 02: Equipamento para confecção de filme, pelo sistema de centrifugação.

Esse equipamento possui uma peça circular onde se coloca o vidro (também circular), por onde se derrama vagarosamente a resina. É acionado por um motor de indução monofásico com 1.700 r.p.m.

Vantagens desse método:

- o filme continua com a espessura homogênea e fina;
- a quantidade de bolhas foi diminuída por causa da centrifugação.

A espessura do filme era estimada pelo controle visual. Quanto maior o tempo de centrifugação mais fino ficava o filme de resina, e vice-versa. Com a prática do operador, conseguiam-se filmes com espessuras próximas.

Teve-se o cuidado, neste método, de não deixar que o vidro onde era despejada a resina vibrasse, para não tirar a homogeneidade da espessura, prendendo-o com uma ventosa. Como também, para aperfeiçoamento deste método, foi montada uma bancada própria, que se encontra na foto da figura 3 a seguir.



Figura 03: Bancada para a confecção de filme de resina poliuretana derivada do óleo de mamona.

Os componentes da bancada estão listados a seguir:

- 1 - local de limpeza dos vidros;
- 2 - suporte para os vidros;
- 3 - balança analítica;
- 4 - estufa;
- 5 - bomba a vácuo;
- 6 - copo para mistura dos compostos;
- 7 - sistema centrífugo;
- 8 - suporte para armazenagem do filme de resina, para o processo de cura;
- 9 - vasilha para retirada do filme;
- 10 - bastidores (como suporte).

Este método foi reprovado, pois na forma de filme a quantidade de bolhas e suas dimensões, ainda que menores que nos métodos anteriores, afetavam fortemente as medidas elétricas.

Por esse último método, conseguiu-se obter um corpo de prova sem bolhas visíveis, denominadas macroscópicas, mas não as bolhas microscópicas, mostradas nas figuras 4 e 5.

Com o auxílio de tinta vermelha, nas figuras 6 e 7, as bolhas são apresentadas através dos espaços vazios (na cor amarela).

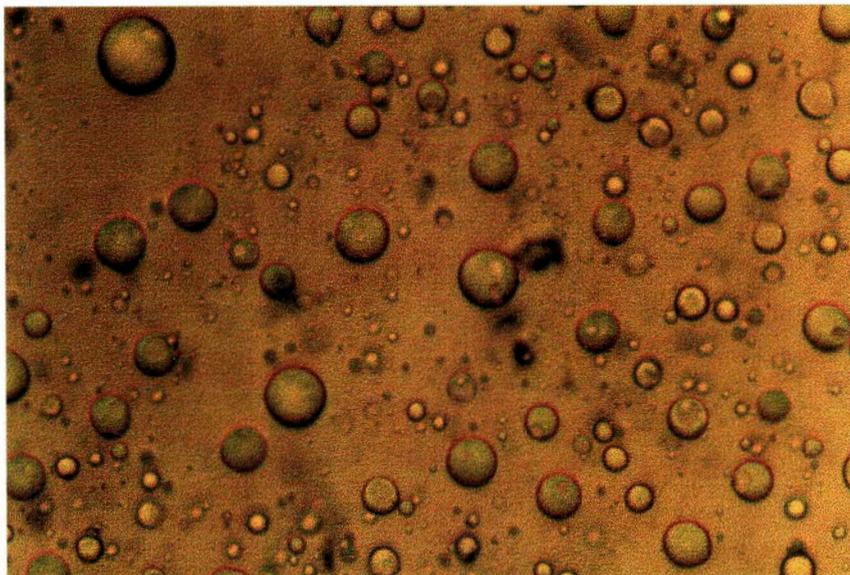


Figura 04: Fotomicrografia do filme da Resina A253+B351 (aumento 25 vezes).

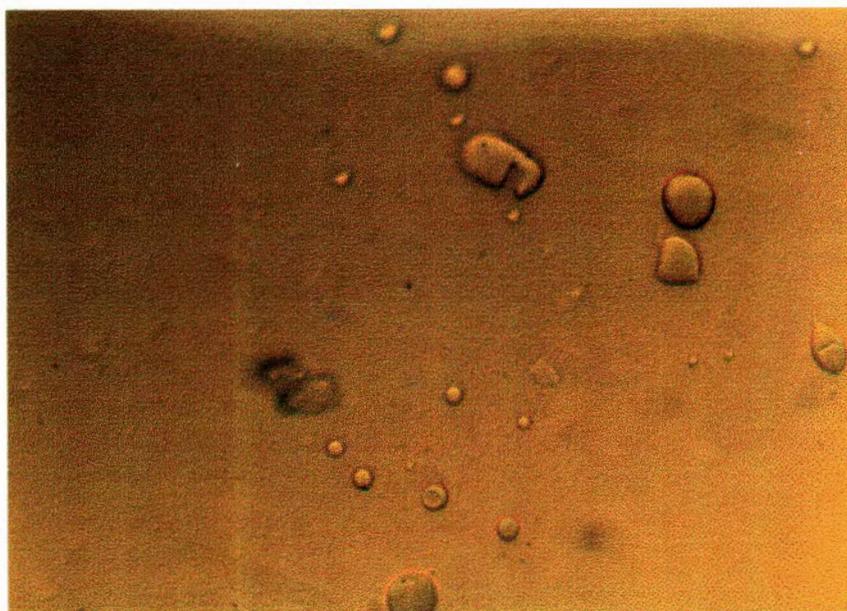


Figura 05: Fotomicrografia do filme da Resina A249+B25015 (aumento 25 vezes).

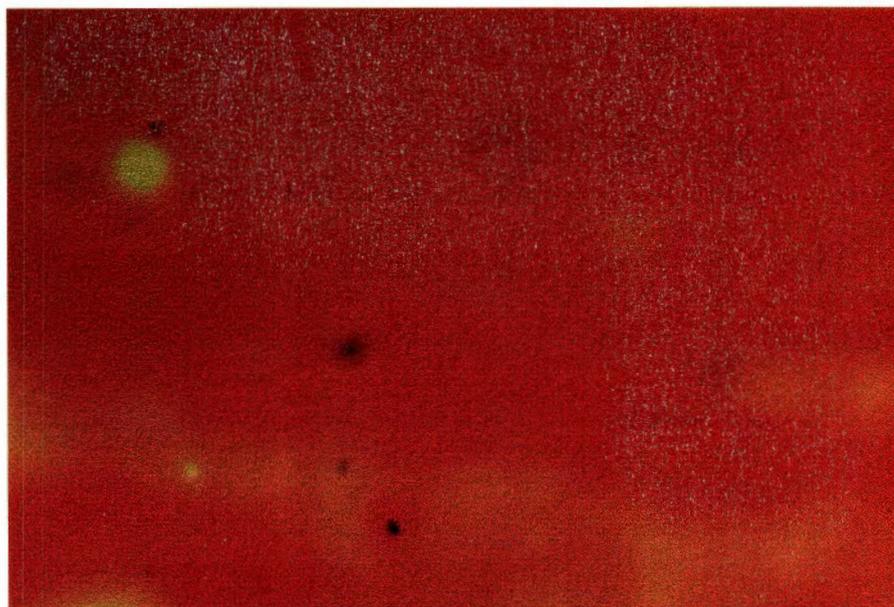


Figura 06: Fotomicrografia do filme pintado da Resina A249+B25015 (aumento 25 vezes).

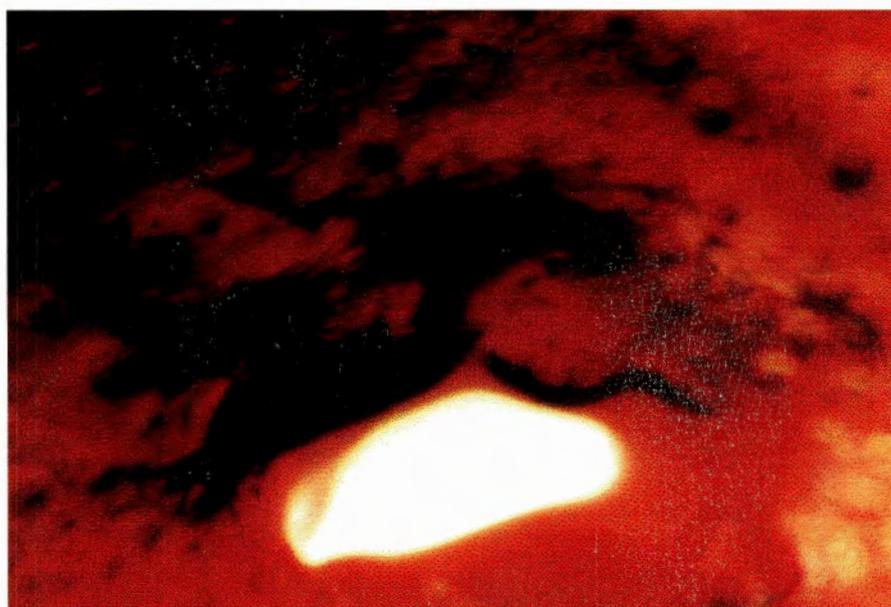


Figura 07: Fotomicrografia do filme pintado da Resina A253+B351 (aumento 25 vezes), após o ensaio de rigidez dielétrica.

Na figura 07, escolheu-se a fotomicrografia do filme após o ensaio de rigidez dielétrica para se verificar as dimensões das bolhas em relação à ruptura ocasionada pelo ensaio. A parte escura é a carbonização decorrente do arco elétrico.

### **3.5 Confeção do corpo de prova, por meio de forma retangular.**

Como outra alternativa, optou-se pela confecção do corpo de prova de espessura maior (aproximadamente 1,0 mm) através de formas de material de acrílico, que é um material de pouca aderência à resina.

Este método foi reprovado por resultar em uma quantidade maior de bolhas em relação aos métodos anteriores, em função de a superfície do material, na forma, apresentar maior contato com o ar.

### **3.6 Confeção do corpo de prova, por meio de tarugo de resina.**

Diante do fato de o corpo de prova apresentar problemas em contato maior com o ar, durante o tempo de cura da resina, foi escolhido o método de confeccionar um tarugo de resina.

Os tarugos foram feitos com diâmetro de 9,5 a 10,0 cm de diâmetro e deles foram retiradas fatias de 1,0 e de 2,0 mm de espessura, aproximadamente.

Durante o tempo de cura da resina, como a quantidade de material era maior, o calor desprendido era maior e as bolhas subiam para a superfície.

Depois do tempo de cura total, o tarugo de resina era fatiado em corpos de prova de espessuras desejadas, com o auxílio de um torno mecânico, deixando as espessuras uniformes, com pequenas variações.

O torneamento das fatias de amostras foi realizado com refrigeração a água e com todos cuidados necessários, para não haver alteração de propriedades químicas e físicas do material, pela ação do calor advindo do atrito da ferramenta.

Os corpos de prova não continham bolhas macroscópicas e as microscópicas, que são característica própria do material, não influenciaram nos resultados dos ensaios elétricos, porque suas dimensões eram pequenas em relação à espessura.

Tendo em vista que, com essas amostras, se obteve uma constância nos resultados, este método foi **aprovado** e adotado como o melhor e mais correto, para a caracterização elétrica destes tipos de resinas.

### **3.6.1 Complementação sobre o método de confecção do corpo de prova.**

Para se confeccionar o corpo de prova de resina, devem-se tomar certos cuidados em relação aos componentes e à forma de fazer o tarugo.

Antes de iniciar o processo, deve-se verificar a qualidade da matéria-prima dos componentes: polioli e pré-polímero.

Esta análise consiste na colocação separada dos componentes numa câmara a vácuo e na observação da quantidade de bolhas existentes.

Mesmo eles não sendo materiais considerados higroscópicos, o polioli não tem tanto problema de envelhecimento como o pré-polímero. Isto quer dizer que o pré-polímero se polimeriza sozinho em contato com o ar e, com o passar do tempo, a quantidade de umidade é tão grande que fica inviável a sua utilização.

Para reconhecer a quantidade excessiva de bolhas de ar e/ou umidade, usa-se como referência um pouco de material novo, produzido recentemente (quase sem umidade), fazendo-se verificações periódicas.

Dependendo da quantidade de umidade, podem-se recuperar estes componentes, colocando-os separadamente numa estufa com temperatura de 100 °C, durante uma hora, para que parte da umidade se evapore.

No próximo passo, os componentes são misturados com cuidado durante três minutos aproximadamente, e com pouca agitação, procurando-se introduzir na mistura o mínimo de ar possível.

Em seguida, a mistura é colocada na câmara a vácuo para extrair bolhas de ar, durante aproximadamente cinco minutos.

A resina é colocada numa forma de plástico rígido, que suporte temperatura acima de 30 °C. Pode ser também de material de acrílico ou P.V.C.. Esta forma deve ser bem lavada com água e detergente.

Pode-se usar uma pequena quantidade de vaselina, como desmoldante. Porém, o modo mais prático é utilizar formas descartáveis.

Deixa-se a resina atingir seu tempo de cura em ambiente com condições normais de temperatura e de umidade, e livre de impurezas.

Os tarugos foram obtidos com aproximadamente 13 cm de altura e 11 cm de diâmetro; tais medidas permitiram a obtenção de amostras circulares de 10 cm de diâmetro, no tomo mecânico existente no Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos / USP.

**Nota:** para remover-se pequenas porções do material (antes da cura total) que aderiram aos objetos usados durante o processo, utilizou-se água quente e acetona.

## CAPÍTULO 4

### Ensaios Elétricos para a Determinação das Características Elétricas: Rigidez Dielétrica, Resistividade e Condutividade Elétrica

#### 4.1 Introdução geral.

Chegou-se a uma padronização do método de preparação dos corpos de prova através de várias tentativas, que apresentaram evolução positiva na qualidade das amostras e nos resultados dos ensaios.

Nos primeiros ensaios de rigidez dielétrica, que foram realizados com amostras da resina na forma de filmes, obtiveram-se resultados com variações não aceitáveis em Engenharia. Tais variações apresentavam-se com valores superiores a 15 % acima da média, chegando, numa mesma amostra, a 100 % de diferença. O motivo mais provável desta anomalia foi a existência excessiva de bolhas de ar nas amostras.

Com a evolução, após ser bem definido o tipo de corpo de prova, solucionou-se o problema.

Os procedimentos dos ensaios elétricos foram de acordo com as seguintes normas técnicas da A.B.N.T.:

- NBR 5405 (Abr./1.983): Determinação da rigidez dielétrica sob frequência industrial;
- NBR 5403 (Set./1.983): Determinação da resistividade volumétrica e superficial;
- NBR 5245 (Mar./1.982): Determinação da permissividade e do fator de dissipação dielétrica.

No ANEXO A, encontra-se um resumo das citadas normas técnicas, apresentadas na forma de tabelas, que possibilitem a visualização e comparação das exigências de cada uma em relação às características elétricas, que devam ser determinadas de modo prático.

São evidenciados os seguintes tópicos:

- fatores que influenciam os ensaios;
- condicionamento das amostras;
- tensão aplicada nos ensaios;
- métodos de medição;
- precisão correspondente;
- tipos de eletrodos;
- tipos de materiais dos eletrodos;
- dimensões dos corpos de prova;
- método de ensaio;
- análise e cálculo dos resultados;
- e finalmente, a apresentação do relatório do ensaio realizado.

A relação dos instrumentos utilizados nos ensaios elétricos estão especificados no ANEXO B.

Para se fazer comparação entre as características elétricas de diversos tipos de materiais, estes têm que ser ensaiados nas mesmas condições e com os mesmos procedimentos. Com esta finalidade, foram utilizadas as normas técnicas como referência na metodologia dos ensaios.

Normas técnicas internacionais como ASTM, BS, DIN, também foram analisadas como complementação das normas da ABNT.

Entretanto, estas normas técnicas foram acompanhadas sob certos critérios para a avaliação dos métodos e não simplesmente seguidas.

## 4.2 Rigidez dielétrica.

A rigidez dielétrica caracteriza a capacidade do dielétrico de opor resistência à sua própria destruição diante da aplicação de tensão elétrica, indicando, assim, qual o nível de tensão que o material suporta numa determinada espessura.

Como complementação, temos a seguinte definição segundo a norma NBR 5405 (1.983):

- “Rigidez Dielétrica de um material isolante é a relação entre a tensão aplicada entre dois eletrodos, sob a qual ocorre perfuração do isolante em condições de ensaio especificadas, e a distância entre os mesmos. A tensão do ensaio é definida como seu valor de pico dividida por raiz quadrada de dois”.

O ensaio elétrico realizado para determinar a rigidez dielétrica foi do tipo de “tempo curto”, onde se aumentou a tensão elétrica aplicada a partir do zero, com taxa uniforme entre 10 e 20 segundos, em média.

Após ter-se verificado a inviabilidade de se utilizar o filme de resina, como corpo de prova, devido às características físico-químicas do material e optado por corpos de prova de espessura maior, em torno de 1 mm, foi necessário realizar o ensaio numa cuba com óleo isolante de transformador, para ser possível a determinação da tensão de ruptura do corpo de prova.

A dificuldade de se realizar o ensaio no ar em lugar do óleo isolante foi devida à passagem de corrente elétrica por fora da amostra de 1,0 mm na forma de arco elétrico, provocando, assim, um curto circuito entre o eletrodo superior e o inferior.

Uma outra alternativa para se realizar o ensaio diretamente no ar foi reprovada em função da inviabilidade de custo de confecção do corpo de prova. Para dificultar a passagem da corrente elétrica em torno da amostra, foi confeccionado um corpo de prova conforme as figuras 8a e 8b, abaixo.

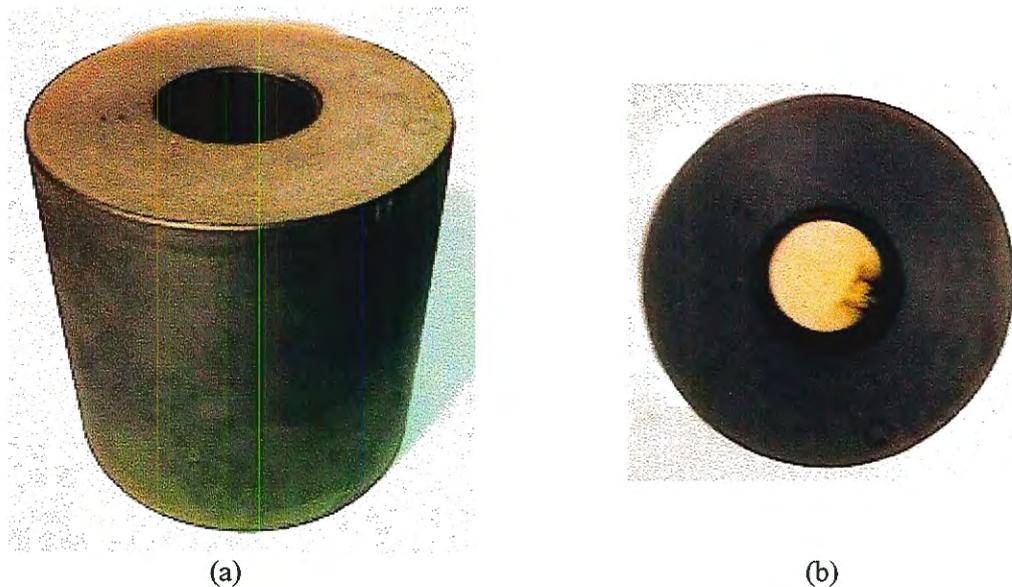


Figura 8a: Corpo de prova (reprovado): (a) vista em perspectiva; (b) vista em planta.

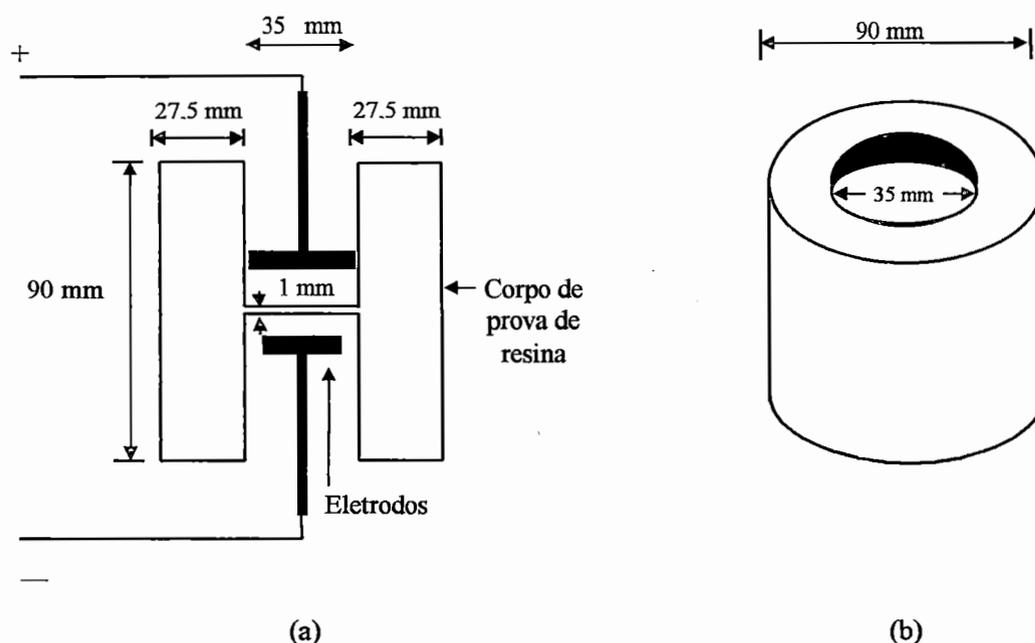


Figura 8b: Detalhe do corpo de prova (reprovado):(a) Corte transversal; (b) Configuração.

Embora o ensaio de rigidez dielétrica tenha dado certo com este tipo de corpo de prova, optou-se pelos corpos de prova circulares de 1,0 mm de espessura pela facilidade de obtenção dos mesmos e pelo fato de os resultados dos ensaios realizados no óleo isolante serem semelhantes aos realizados diretamente no ar.

O esquema da montagem para a medição encontra-se na figura 09.

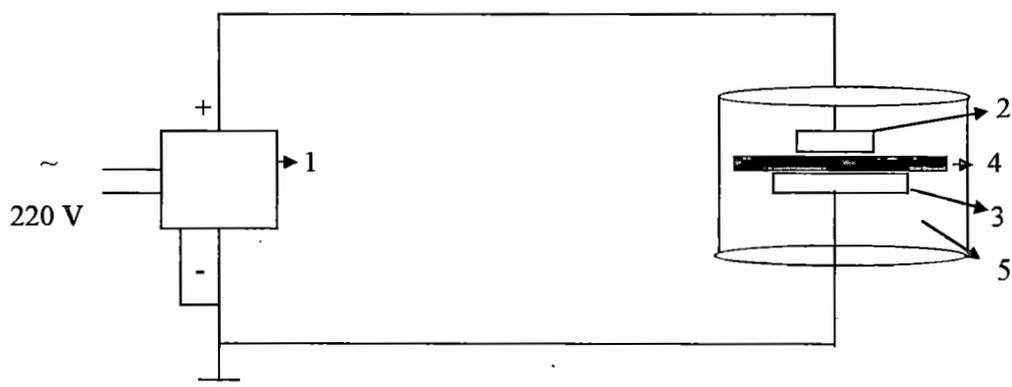


Figura 09: Esquema da montagem para a medição da rigidez dielétrica.

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.

Com a aplicação da tensão elétrica, com uma taxa uniforme, num intervalo de tempo estipulado, mediu-se o nível de tensão quando ocorre a ruptura do dielétrico, conhecido como tensão de ruptura ou tensão de “breakdown”. Com este valor, podemos calcular a rigidez dielétrica do material, segundo a equação abaixo:

$$R_d = U_b / h \quad (4.1)$$

Onde:  $R_d$  = rigidez dielétrica;

$U_b$  = tensão de ruptura; e

$h$  = espessura da amostra.

As condições do meio ambiente durante este ensaio foram:

-  $T = 22,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

-  $U_r = 54 \%$  e

Para este ensaio, o condicionamento das 20 amostras utilizadas foi feito durante três horas, nessas condições de temperatura e umidade relativa.

Este tempo de condicionamento das amostras foi idêntico para todos os ensaios elétricos realizados. Como o material não é higroscópico, já que possui capacidade de absorção de água menor que 1 %, este tempo foi considerado suficiente para que as amostras se condicionassem às condições ambientais do ensaio.

### 4.3 Resistividades volumétrica e superficial.

#### 4.3.1 Resistividade.

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.

E segundo a norma NBR 5403 (1.983), temos as seguintes definições:

- “Resistividade Volumétrica é o quociente entre o campo elétrico em corrente contínua e a densidade de corrente normal de equilíbrio através do material isolante. Na prática isto é tomado como a resistência volumétrica reduzida para a de um cubo de volume unitário”; e

- “Resistividade Superficial é o quociente entre o campo elétrico em corrente contínua, e a densidade linear da corrente na camada superficial do material isolante. Na prática é tida como a resistência superficial reduzida para a de uma área quadrada. A dimensão do quadrado é irrelevante”.

O esquema de medição das resistividades volumétrica e superficial é apresentado na figura 10.

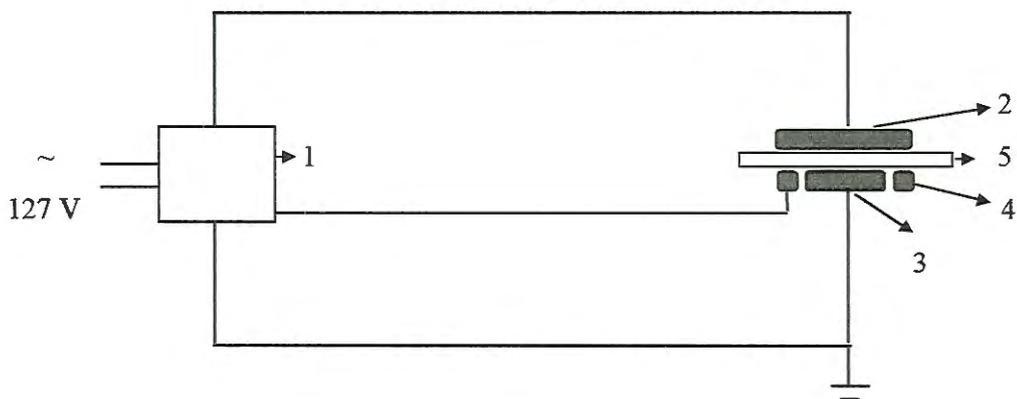


Figura 10: Esquema da montagem para a medição de resistividade volumétrica e superficial.

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.

O condicionamento das amostras neste ensaio foi feito durante três horas, nas condições de temperatura e umidade relativa, abaixo:

-  $T = 22,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

-  $U_r = 54\%$ ; e

A utilização correta do medidor de resistência alta, baseou-se na seguinte padronização de tempos:

- 50 segundos de tempo de carregamento (“charge”);
- 1 minuto de tempo de eletrificação e leitura.

Essa padronização de tempo de eletrificação é muito importante para se poder fazer comparações entre as resistividades volumétrica e superficial de outros materiais comerciais, os quais têm que ter especificado o mesmo tempo de eletrificação da amostra.

Com os valores de resistências volumétrica e superficial obtidas nas leituras, calcula-se as resistividades correspondentes, segundo as equações:

$$\rho_v = 19,6 \cdot \frac{R_{vm}}{h} \quad (4.2)$$

$$\rho_s = 18,8 \cdot R_{sm} \quad (4.3)$$

Onde:  $\rho_v$  = resistividade volumétrica [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ];

$R_{vm}$  = resistência volumétrica medida [ $\Omega$ ];

$h$  = espessura [ $\text{cm}$ ];

$\rho_s$  = resistividade superficial [ $\Omega$ ];

$R_{sm}$  = resistência superficial medida [ $\Omega$ ]; e

19,6 e 18,8 = constantes características das dimensões de projeto dos eletrodos da célula de medir resistividade.

#### 4.3.2 Esquema para a medição das resistências volumétrica e superficial.

A resistência elétrica de um modo geral pode ser caracterizada como resistência elétrica volumétrica ou superficial.

Numa configuração de eletrodos circulares, com anel de blindagem, pode-se caracterizar a primeira como sendo proporcional ao comprimento do material em análise e inversamente proporcional à área da seção transversal do mesmo. Enquanto que a segunda é proporcional ao perímetro da superfície da amostra e inversamente proporcional ao comprimento do “air gap”(espaço delgado de ar) da configuração dos eletrodos. Dependendo ambas também da característica própria do material, conhecida como resistividade.

A resistividade do material é dada pela relação entre a intensidade do campo elétrico e a densidade de corrente elétrica. Sendo:

$$\rho = \mathbf{E} / \mathbf{J} \quad (4.4)$$

Onde:  $\rho$  = resistividade do material;

$E$  = campo elétrico e

$J$  = densidade de corrente elétrica.

Para explicar melhor a origem das equações 4.2 e 4.3 apresentadas, têm-se os esclarecimentos a seguir:

1) A equação geral para determinar a resistividade volumétrica é:

$$\rho_v = \frac{R_v \cdot S}{h} \quad [\Omega.m] \quad (4.5)$$

Sendo:  $R_v$  a resistência total da amostra, tendo esta uma espessura  $h$  dada em metros, e o eletrodo central uma superfície de  $S$  em (metro)<sup>2</sup>, conforme a figura 11.

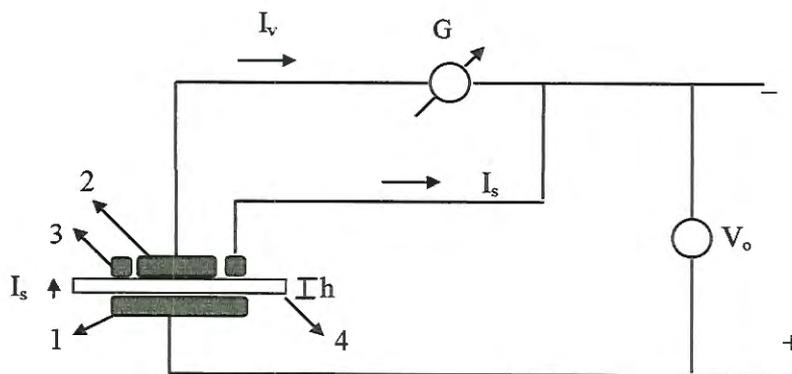


Figura 11: Esquema principal da montagem para medir resistividade volumétrica.

Sendo: 1 - eletrodo inferior;

2 - eletrodo central;

3 - eletrodo de guarda;

4 - corpo de prova;

G = galvanômetro;

$V_o$  = voltímetro;

$I_s$  = corrente de condutância superficial e

$I_v$  = corrente de condutância volumétrica

O valor inverso da resistividade volumétrica é a condutividade volumétrica, a qual define a capacidade de condução de corrente elétrica que um material apresenta num determinado volume. É calculada segundo a equação 4.6.

$$\gamma_v = 1/\rho_v \quad [\Omega^{-1} \cdot m^{-1}] \quad (4.6)$$

Onde:  $\gamma_v$  = condutividade volumétrica; e

$\rho_v$  = resistividade volumétrica.

**2) A equação geral para determinar a resistividade superficial é:**

$$\rho_s = R_s \cdot p/g \quad (4.7)$$

$$p = 2 \cdot \pi \cdot g / (\ln d_2/d_1), \text{ para um perímetro circular} \quad (4.8)$$

Substituindo a equação 4.8 na equação 4.7, temos:

$$\rho_s = R_s \cdot 2 \cdot \pi / (\ln d_2/d_1) = R_s \cdot \pi (d_2 + d_1) / (d_2 - d_1) \quad (4.9)$$

Sendo:  $R_s$  = resistência superficial  $[\Omega]$  da amostra inserida entre os eletrodos 1 e 2, da figura 12;

$d_1$  = diâmetro do eletrodo central, da Figura 13; e

$d_2$  = diâmetro interior do eletrodo de guarda, da Figura 13.

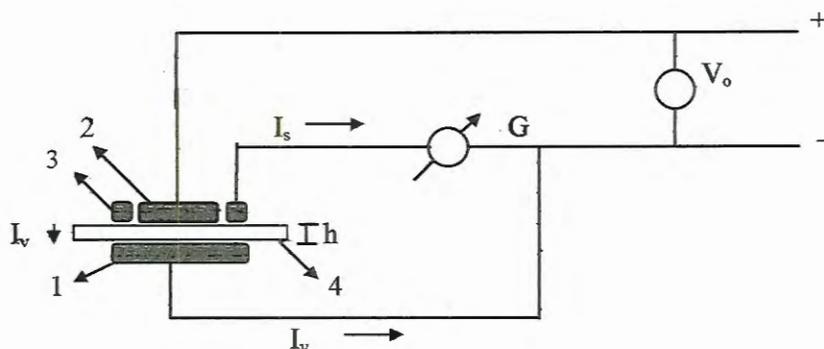


Figura 12: Esquema principal da montagem para medir resistividade superficial.

- Onde: 1 - eletrodo inferior;  
 2 - eletrodo central;  
 3 - eletrodo de guarda;  
 4 - corpo de prova;  
 G = galvanômetro;  
 $V_o$  = voltímetro;  
 $I_s$  = corrente de condutância superficial e  
 $I_v$  = corrente de condutância volumétrica

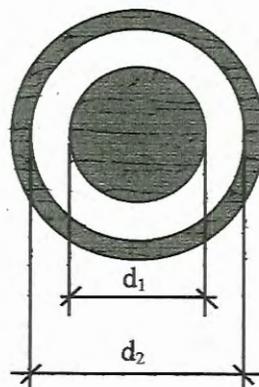


Figura 13: Disposição concêntrica dos eletrodos em uma amostra ao medir  $\rho_s$ .

O valor inverso da resistividade superficial é a condutividade superficial, a qual define a capacidade que o material possui de conduzir corrente elétrica sobre sua superfície. É calculado segundo a equação 4.10.

$$\gamma_s = 1/\rho_s \quad [\Omega^{-1}] \quad (4.10)$$

Onde:  $\gamma_s$  = condutividade superficial; e  
 $\rho_s$  = resistividade superficial.

### 4.3.3 Técnica de guarnição.

As posições dos eletrodos são escolhidas de modo que contenham um eletrodo de guarda (também conhecido como anel de blindagem ou sistema de três eletrodos), com a finalidade de evitar erros na medição como:

- a) correntes parasitas de tensões externas, as quais são normalmente desconhecidas em valor e, freqüentemente, esporádicas;
- b) paralelismo indesejável entre a resistência do corpo de prova e as dos resistores de referência, ou do dispositivo de medição de corrente, devido ao isolamento possuir valores de resistências desconhecidos e instáveis.

Quando as ligações são realizadas de maneira correta, todas as correntes parasitas indesejáveis são desviadas para o dispositivo de guarda, fora do circuito de medição.

Além disso, a resistência de isolamento entre cada um dos terminais de medição e o dispositivo de guarda, fica em paralelo com um elemento do circuito de resistência bem mais baixa. Com isso, a resistência do corpo de prova constitui um único caminho direto entre os terminais de medição, como também elimina o efeito da capacitância de borda.

Diante de todas as vantagens citadas acima, justifica-se a utilização deste sistema de configuração de eletrodos.

## CAPÍTULO 5

### **Ensaios Elétricos para a Determinação das Características Elétricas: Permissividade, Fator de Dissipação, Índice de Perdas, Fator de Qualidade e Susceptibilidade Elétrica.**

#### **5.1 Ensaio elétrico.**

A permissividade dielétrica está associada à polarização elétrica do material, caracterizando a taxa de alteração da capacitância e do campo elétrico entre dois condutores devido à introdução de um dielétrico, de acordo com PURCEL (1.970). Enquanto que o fator de dissipação de perdas dielétricas determina as perdas de potência em um dielétrico submetido a uma tensão alternada. Já o índice de perdas indica a porcentagem de dissipação característica de cada dielétrico.

Na norma NBR 5245 (1.982), temos as seguintes definições:

- “Permissividade relativa é a razão da capacitância  $C_m$  de um capacitor em que o espaço entre e em torno dos eletrodos está inteiro e exclusivamente repleto do material isolante em questão e a capacitância  $C_o$  com eletrodos de mesma configuração no vácuo”;
- “Fator de Dissipação Dielétrica é o resultado da tangente do ângulo de perda  $\delta$ , o qual é o ângulo de complemento do ângulo de defasagem entre a tensão aplicada e a corrente resultante, quando o dielétrico do capacitor consiste exclusivamente de material dielétrico”;
- “Índice de perdas é igual ao produto do fator de dissipação pela permissividade dielétrica”.

A susceptibilidade elétrica é o fator de proporcionalidade entre a densidade de polarização e o campo elétrico macroscópico num material, sendo, portanto, uma propriedade intrínseca do material.

O ensaio de permissividade dielétrica foi realizado por dois sistemas de medição, constituindo dois instrumentos diferentes:

1º ) através de uma ponte RLC, marca Hewlett Packard e com uma célula de eletrodos, mostrada na Figura 14, projetada e construída para este fim, de acordo com o corpo de prova. O nível de tensão aplicada foi de 1,5 volts, característico da ponte RLC (ANEXO B).



Figura 14: Célula de eletrodos para a medição da permissividade e do fator de dissipação dielétrico.

2º ) através de uma ponte LC, marca TETTEX e com uma célula de eletrodo, da mesma marca que a ponte LC. Foi aplicada tensão alta de 2,0 kV, característica deste sistema (ANEXO B).

As dimensões das amostras eram de 10 cm de diâmetro e 2,0 mm de espessura. Num total de dez amostras de cada resina.

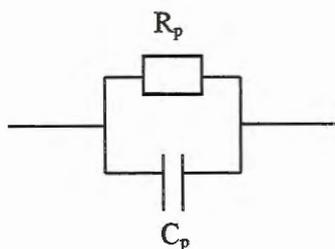
Houve condicionamento das amostras durante uma hora no meio ambiente, nas C.N.P.T.U.:

1º ) ensaio:  $T = 19,5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $U_r = 68 \%$ ;

2º) ensaio:  $T = 20,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $U_r = 68 \%$ .

Em ambos os ensaios, as amostras foram limpas com flanela seca e foi confirmada a uniformidade em suas superfícies, para que não houvesse erros nas medições.

Foi considerado o circuito equivalente em paralelo, como na figura 15, abaixo.



Onde:  $R_p$  = resistência em paralelo [ $\Omega$ ]; e

$C_p$  = capacitância em paralelo [pF].

Figura 15: Circuito equivalente do capacitor com perdas.

A permissividade dielétrica relativa é usualmente determinada pela medição da capacitância  $C_m$  e a capacitância  $C_o$  de um arranjo de eletrodos no ar.

Se a medida for feita sem um anel de guarda, a capacitância medida  $C_m$  conterà uma componente devido ao efeito de borda e uma componente  $C_t$  derivada do campo de dispersão (ou perda).

A correção da capacitância medida  $C_m$  é:

$$C_m = C_m' - C_b - C_t \quad (5.1)$$

Onde:  $C_m'$  = capacitância medida sem correção;

$C_b$  = capacitância de borda;

$C_t$  = capacitância de dispersão.

A capacitância  $C_o$  do arranjo de eletrodos no ar (ou também conhecida como capacitância relativa no vácuo) pode ser determinada por medição, como também calculada. Se  $C_o$  for medida, a mesma correção acima deve ser aplicada, fornecendo o valor da capacitância  $C_o$  corrigida da seguinte forma:

$$C_o = C_o' - C_{bo} - C_{to} \quad (5.2)$$

Onde:  $C_o$  = capacitância do arranjo de eletrodos no ar, sem correção;

$C_{bo}$  = capacitância de borda do arranjo de eletrodos no ar;

$C_{to}$  = capacitância de dispersão do arranjo de eletrodos no ar.

Utilizando o arranjo de eletrodos com anel de blindagem devidamente aterrados, anulamos conseqüentemente as capacitâncias de bordas e as capacitâncias de dispersões. E a permissividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) é determinada pela equação:

$$\epsilon_r = C_m / C_o \quad (5.3)$$

Caso se opte pelo cálculo da capacitância do arranjo no ar, conforme a ASTM D 150 (1.978), este é efetuado pela seguinte equação:

$$C_o = \epsilon_o \cdot A/h \quad (5.4)$$

$$A = (\pi/4) \cdot (d_1 + g)^2 \quad (5.5)$$

Onde:  $\epsilon_o$  = permissividade dielétrica no vácuo  $\approx 8,85416 \cdot 10^{-14}$  F/cm;

A = área dos eletrodo - gap (circular);

$d_1$  = diâmetro do eletrodo central;

g = "air gap" do arranjo de eletrodo; e

h = espessura da amostra.

A susceptibilidade elétrica ( $\chi_e$ ) é calculada através da equação:

$$\chi_e = P / E = (\epsilon_r - 1) / 4 \pi \quad (5.6)$$

Sendo: P = densidade de polarização;

E = campo elétrico no interior do capacitor

$\epsilon_r$  = permissividade dielétrica relativa.

O fator de dissipação dielétrico ( $\tan \delta$ ) é calculado pela equação abaixo, de acordo com a ASTM D150 (1.978).

$$\text{tang } \delta = D = 1 / (\omega \cdot C_p \cdot R_p) \quad (5.7)$$

$$1 / (\omega \cdot C_p \cdot R_p) = \omega \cdot C_s \cdot R_s \quad (5.8)$$

Onde:  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$  [radianos por segundo];

$f$  = frequência da tensão aplicada [Hz];

$C_p$  = capacitância em paralelo [pF]

$C_s$  = capacitância em série [pF];

$R_p$  = resistência em paralelo [ $\Omega$ ]

$R_s$  = resistência em série [ $\Omega$ ];

Os valores de perdas dielétricas são os mesmos para circuitos equivalentes em paralelo ou em série.

Com base no valor do fator de dissipação dielétrica, podemos calcular o índice de perdas dielétricas ( $\epsilon''$ ) e o fator de qualidade dielétrico (Q) seguindo as equações respectivamente:

$$\epsilon'' = \epsilon_r \cdot \text{tang } \delta \quad (5.9)$$

$$Q = 1 / D \quad (5.10)$$

Para verificar o comportamento da resina em estudo com sua estrutura característica, foi realizado um terceiro ensaio neste assunto, anotando-se a variação da capacitância em função da frequência, para poder classificar sua estrutura como polar, como iremos analisar posteriormente.

Conforme NIKLIN (1.977) e TAREEV (1.979), o material possui estrutura polar quando as suas moléculas, que são polares, respondem a um campo elétrico procurando alinhar-se paralelamente a ele. Neste caso, a permissividade dielétrica varia com a frequência. Enquanto que a estrutura não polar não possui este alinhamento e a permissividade dielétrica é constante, ou seja, não varia com a frequência.

## 5.2 Diagrama fasorial das correntes em um dielétrico.

Uma das características importantes sob o ponto de vista deste trabalho é a baixa condutividade do dielétrico, a qual implica uma condução baixa de corrente elétrica.

A corrente elétrica de capacitância de acordo com NIKLIN (1.977) é calculada segundo a equação 5.11.

$$I_c = \omega \cdot C \cdot V \quad [\text{A}] \quad (5.11)$$

Onde:  $I_c$  = corrente de capacitância [A];

$\omega$  = frequência angular, [radianos / segundo];

$C$  = capacitância do capacitor [F];

$V$  = tensão aplicada no capacitor [V].

Quando a tensão é aplicada, a corrente carrega o capacitor com o passar do tempo.

A carga carregada é dada por  $Q$ , onde:

$$Q = C \cdot V \quad [\text{coulombs}] \quad (5.12)$$

A energia armazenada é  $E$ , dada por:

$$E = C \cdot V^2 / 2 \quad [\text{W} \cdot \text{seg}] \quad (5.13)$$

Uma parte da energia é dissipada em forma de calor no capacitor. Essas perdas são denominadas de perdas dielétricas ou fator de dissipação dielétrica, como no item anterior.

A corrente que produz a condutividade do dielétrico é conhecida como corrente parasita (ou de perda). Apresenta duas componentes:

- 1)  $I_v$  (corrente de perda volumétrica): que passa através do volume do dielétrico; e
- 2)  $I_s$  (corrente de perda superficial): que passa pela superfície do dielétrico.

De acordo com estas características, temos as correspondentes resistividades e condutividades volumétrica e superficial, como analisadas anteriormente.

Para se analisar melhor estas correntes de perdas, observemos o diagrama fasorial das correntes de um dielétrico abaixo:

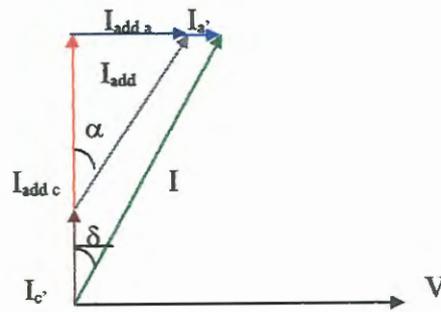


Figura 16: Diagrama fasorial das correntes em um dielétrico.

- Onde:  $I$  = corrente elétrica resultante;  
 $V$  = Tensão elétrica;  
 $I_{add}$  = corrente adicional;  
 $I_{add\ c}$  = corrente adicional capacitiva;  
 $I_{add\ a}$  = corrente adicional ativa;  
 $I_c$  = componente capacitiva da corrente resultante;  
 $I_a$  = componente ativa da corrente resultante;  
 $\delta$  = complemento do ângulo entre os fasores tensão e corrente;  
 $\alpha$  = ângulo de atraso da corrente capacitiva.

Este diagrama fasorial das correntes de um dielétrico pode ser melhor entendido a partir da análise do circuito equivalente de um dielétrico apresentado na figura 14, anteriormente.

Como podemos observar no diagrama acima, a corrente parasita resultante ( $I$ ) possui duas componentes:

- componente capacitiva ( $I_c$ ); e
- componente ativa ( $I_a$ ).

No dielétrico ocorre o efeito de uma polarização adicional, conforme descreve NIKLIN (1.977), a qual aumenta a energia dissipada como o calor no dielétrico, fazendo com que a corrente elétrica resultante aumente com a participação das seguintes correntes:

- corrente adicional da componente capacitiva ( $I_{add\ c}$ );
- corrente adicional da componente ativa ( $I_{add\ a}$ ).

Resumindo temos:

$$I = I_c + I_a \tag{5.14}$$

$$I_c = I_c + I_{addc} \quad (5.15)$$

$$I_a = I_a + I_{adda} \quad (5.16)$$

$$I_{add} = I_{addc} + I_{adda} \quad (5.17)$$

Onde:  $I_{add}$  = corrente adicional total;

$I_c$  = componente capacitiva pura da corrente elétrica resultante;

$I_a$  = componente ativa pura da corrente elétrica resultante.

A partir da análise do diagrama fasorial das correntes de perdas, a perda de potência dielétrica é dada por:

$$P = (I_a + I_{adda}) \cdot V = \text{tang } \delta (I_c + I_{addc}) \cdot V \quad [\text{W}] \quad (5.18)$$

Substituindo a equação 5.11 na equação 18, temos:

$$P = \omega (C + C_{add}) \cdot V^2 \cdot \text{tang } \delta = \omega \cdot C \cdot V^2 \cdot \text{tang } \delta \quad [\text{W}] \quad (5.19)$$

$$\text{tang } \delta = P / \omega \cdot C \cdot V^2 \quad (5.20)$$

Sendo:  $\omega$  = frequência angular, [radianos / segundo];

$V$  = tensão aplicada [V];

$C$  = capacitância [F], referente à  $I_c$  e  $I_{addc}$ .

$\text{tang } \delta$  = fator de perdas.

Na equação 5.20, podemos observar que quanto maior o nível de tensão, menor é o fator de dissipação dielétrica e, conseqüentemente, menor o índice de perda e maior fator de qualidade.

Portanto, podemos analisar que num sistema de isolamento, o fator de dissipação dielétrico tem uma importância fundamental porque fornece a quantidade de energia dissipada como calor, num determinado tempo, o que pode comprometer a vida útil do dielétrico.

# CAPÍTULO 6

## Resultados

### 6.1 Divisão dos resultados.

Os resultados foram divididos em duas partes:

- Resultados A: referentes às características da Resina A 249 + B 25015;
- Resultados B: referentes às características da Resina A253 + B351.

Como essas duas resinas possuem características semelhantes, os corpos de prova foram confeccionados do mesmo modo, no mesmo dia, com as mesmas dimensões, como também, ensaiados com os mesmos procedimentos, na mesma data e, portanto, nas mesmas condições de pressão, temperatura e umidade do ar.

Nas tabelas das características elétricas a seguir, são apresentados os valores médios e os desvios médios quadráticos, conhecidos como "RMS".

### 6.2 Resultados da Resina A249 + B25015.

#### 6.2.1 Espessuras das amostras.

Foram utilizados 10 corpos de prova, com diâmetro de aproximadamente 10 cm.

Os valores utilizados das espessuras foram obtidos da média aritmética de quatro pontos do corpo de prova, como segue nas Tabelas 01 e 02.

Tabela 01: Média aritmética das espessuras dos corpos de prova da Resina A249 + B25015, de aproximadamente 1,0 mm.

Nº da amostra	Espessura (em 4 pontos) [mm]	Média aritmética [mm]
1	0,96 - 0,96 - 0,97 - 0,97	0,965
2	0,96 - 0,96 - 0,97 - 0,97	0,965
3	0,94 - 0,94 - 0,95 - 0,95	0,945
4	0,96 - 0,97 - 0,97 - 0,98	0,970
5	0,93 - 0,94 - 0,92 - 0,94	0,933
6	0,99 - 0,99 - 1,02 - 1,03	1,008
7	0,95 - 0,93 - 0,94 - 0,94	0,940
8	1,07 - 1,01 - 1,02 - 1,00	1,025
9	0,98 - 0,98 - 0,98 - 0,98	0,980
10	0,95 - 0,98 - 0,94 - 0,95	0,955

Tabela 02: Média aritmética das espessuras dos corpos de prova da Resina A249 + B25015, de aproximadamente 2,0 mm.

Nº da amostra	Espessura (em 4 pontos) [mm]	Média aritmética [mm]
1	1,94 - 1,94 - 1,94 - 1,94	1,940
2	1,97 - 1,97 - 1,97 - 1,97	1,970
3	2,04 - 2,04 - 2,04 - 2,04	2,040
4	1,91 - 1,90 - 1,91 - 1,91	1,908
5	2,03 - 1,92 - 1,93 - 1,99	1,968
6	2,02 - 2,03 - 2,03 - 2,02	2,025
7	2,00 - 2,00 - 2,01 - 2,01	2,005
8	2,04 - 2,03 - 2,04 - 2,04	2,038
9	1,96 - 1,96 - 1,96 - 1,96	1,960
10	1,93 - 1,93 - 1,92 - 1,92	1,925

Como podemos verificar, há uma considerável uniformidade nas espessuras dos corpos de prova, que é importante para a caracterização real do material.

**Observação:** Estas medidas foram realizadas com um paquímetro digital, aferido recentemente no I.P.T.- São Paulo (Anexo B).

### 6.2.2. Característica: Rigidez dielétrica.

Os resultados de rigidez dielétrica da Resina A249 + B25015, encontram-se na Tabela 03.

Tabela 03: Resultados dos valores de rigidez dielétrica da Resina A249 + B25015.

Nº da amostra	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [kV]	Rigidez Dielétrica [kV/mm]
1	0,965	28,0	29,016
2	0,965	24,0	24,870
3	0,945	30,0	31,746
4	0,970	28,0	28,866
5	0,933	27,0	28,939
6	1,008	28,5	28,274
7	0,940	27,0	28,723
8	1,025	30,0	29,268
9	0,980	30,0	30,612
10	0,955	27,0	28,272
<b>Média</b>	<b>0,969</b>	<b>27,95</b>	<b>28,859</b>
<b>Desvio</b>	<b>0,0278</b>	<b>1,767</b>	<b>1,6799</b>

### 6.2.3 Características: Resistividade e condutividade, volumétrica e superficial.

Na Tabela 04, temos os resultados dos ensaios com os valores de resistividade volumétrica e superficial.

Tabela 04: Resultados dos valores da resistividade volumétrica e superficial da Resina A249 + B25015.

Nº da amostra	Espessura [cm]	Rv .10 exp. 13 [ohms]	Rs .10 exp. 14 [ohms]	Resistividade Vol. .10exp. 15 [ohms.cm]	Resistividade Sup. .10exp. 15 [ohms]
1	0,0965	2,2	0,80	4,468	1,50
2	0,0965	2,2	0,75	4,468	1,41
3	0,0945	2,0	0,65	4,148	1,22
4	0,0970	2,0	0,65	4,041	1,22
5	0,0933	2,0	0,63	4,202	1,18
6	0,1008	2,1	0,70	4,085	1,32
7	0,0940	2,1	0,75	4,379	1,41
8	0,1025	2,0	0,75	3,824	1,41
9	0,0980	2,0	0,80	4,000	1,50
10	0,0955	2,2	0,95	4,515	1,79
<b>Média</b>	<b>0,0969</b>	<b>2,08</b>	<b>0,743</b>	<b>4,213</b>	<b>1,397</b>
<b>Desvio</b>	<b>0,0028</b>	<b>0,087</b>	<b>0,262</b>	<b>0,4422</b>	<b>0,170</b>

Os resultados de condutividade volumétrica e superficial determinados encontram-se na Tabela 05.

Tabela 05: Resultados dos valores de condutividade volumétrica e superficial da Resina A249 + B25015.

Nº da amostra	Condutividade Volumétrica .10 exp. -16 [ohms.cm] <sup>-1</sup>	Condutividade Superficial .10 exp.-16 [ohms] <sup>-1</sup>
1	2,24	6,65
2	2,24	7,09
3	2,41	8,18
4	2,47	8,18
5	2,38	8,44
6	2,45	7,60
7	2,28	7,09
8	2,61	7,09
9	2,50	6,65
10	2,21	5,60
<b>Média</b>	<b>2,38</b>	<b>7,26</b>
<b>Desvio</b>	<b>0,33</b>	<b>0,825</b>

#### 6.2.4. Características: Permissividade dielétrica, fator de dissipação, índice de perdas, fator de qualidade e susceptibilidade elétrica.

Os valores de permissividade dielétrica, fator de dissipação e índice de perdas dielétricas, realizados sob uma tensão aplicada de 1,5 volts, 60 Hz, encontram-se na tabela 06.

Tabela 06: Resultados dos valores da permissividade, do fator de dissipação e índice de perdas dielétricas da Resina A249+B25015 com tensão aplicada de 1,5V a 60 Hz.

Nº da amostra	h [cm]	C [pF] a 60 Hz	Fator de Dissipação [%]	Permissividade Dielétrica	Índice de Perda [%]
1	0,1940	26,5	1,7	2,8	4,8
2	0,1970	23,3	1,9	2,5	4,8
3	0,2040	25,6	1,8	2,9	5,2
4	0,1908	27,3	1,7	2,9	4,9
5	0,1968	27,4	1,5	3,0	4,5
6	0,2025	26,5	1,6	3,0	4,7
7	0,2005	22,2	2,6	2,5	6,4
8	0,2038	25,4	1,5	2,9	4,3
9	0,1960	26,5	1,6	2,9	4,6
10	0,1925	28,1	1,4	3,0	4,2
<b>Média</b>	<b>0,1978</b>	<b>25,9</b>	<b>1,73</b>	<b>2,8</b>	<b>4,84</b>
<b>Desvio</b>	<b>0,0450</b>	<b>1,76</b>	<b>0,323</b>	<b>0,36</b>	<b>0,627</b>

Na tabela 07, temos os resultados das características acima, com tensão aplicada de 2,0 kV à frequência de 60 Hz.

Tabela 07: Resultados dos valores da permissividade, do fator de dissipação e índice de perdas dielétricas da Resina A249+B25015 com tensão aplicada de 2,0 kV a 60 Hz.

Nº da amostra	h [cm]	C [pF] a 60 Hz	Fator de Dissipação [%]	Permissividade Dielétrica	Índice de Perda [%]
1	0,1940	26,5	1,0	2,8	2,8
2	0,1970	24,8	1,1	2,7	3,0
3	0,2040	25,2	1,1	2,8	3,1
4	0,1908	27,4	1,0	2,9	2,9
5	0,1968	26,2	1,0	2,9	2,9
6	0,2025	25,7	1,1	2,9	3,2
7	0,2005	25,1	1,1	2,8	3,1
8	0,2038	25,4	1,0	2,9	2,9
9	0,1960	26,2	1,0	2,8	2,8
10	0,1925	27,0	1,0	2,9	2,9
<b>Média</b>	<b>0,1978</b>	<b>26,0</b>	<b>1,04</b>	<b>2,84</b>	<b>2,95</b>
<b>Desvio</b>	<b>0,0045</b>	<b>0,81</b>	<b>0,049</b>	<b>0,053</b>	<b>0,119</b>

Os valores de fator de qualidade e susceptibilidade elétrica calculados a partir dos resultados dos ensaios realizados com tensão aplicada de 1,5 volts, 60 Hz, encontram-se na tabela 08.

Tabela 08: Valores do fator de qualidade e da susceptibilidade elétrica da Resina A249 + B25015, com tensão elétrica aplicada de 1,5 V a 60 Hz.

Nº da amostra	h [cm]	Susceptibilidade Elétrica	Fator de Qualidade
1	0,1940	0,15	58,82
2	0,1970	0,12	52,63
3	0,2040	0,15	55,56
4	0,1908	0,15	58,82
5	0,1968	0,16	66,67
6	0,2025	0,16	62,50
7	0,2005	0,12	38,46
8	0,2038	0,15	66,67
9	0,1960	0,15	62,50
10	0,1925	0,16	71,43
<b>Média</b>	<b>0,1978</b>	<b>0,15</b>	<b>59,41</b>
<b>Desvio</b>	<b>0,0450</b>	<b>0,015</b>	<b>8,770</b>

Na tabela 09, temos os resultados das características acima, com tensão aplicada de 2,0 kV à frequência de 60 Hz.

Tabela 09: Valores do fator de qualidade e da susceptibilidade elétrica da Resina A249 + B25015 com tensão elétrica aplicada de 2,0 kV a 60 Hz.

Nº da amostra	h [cm]	Susceptibilidade Elétrica	Fator de Qualidade
1	0,1940	0,15	100,00
2	0,1970	0,14	90,91
3	0,2040	0,15	90,91
4	0,1908	0,15	100,00
5	0,1968	0,15	100,00
6	0,2025	0,15	90,91
7	0,2005	0,14	90,91
8	0,2038	0,15	100,00
9	0,1960	0,15	100,00
10	0,1925	0,15	100,00
<b>Média</b>	<b>0,1978</b>	<b>0,15</b>	<b>96,36</b>
<b>Desvio</b>	<b>0,0045</b>	<b>0,0045</b>	<b>4,453</b>

A variação da permissividade dielétrica e do fator de dissipação com a variação da frequência está apresentada na tabela 10.

Tabela 10: Variação da permissividade e do fator de dissipação dielétrico da Resina A249 + B25015, em função da frequência da tensão aplicada.

f [Hz]	Permissividade Dielétrica	Tang $\delta$ [%]
40	3,0	3,20
50	2,9	1,40
60	2,9	1,30
80	2,9	0,71
100	2,9	0,52
200	2,9	0,50
500	2,9	0,49
1.000	2,9	0,49
10.000	2,8	0,52
100.000	2,8	0,87
500.000	2,8	0,99
1.000.000	2,8	0,99

As curvas características da relação da permissividade dielétrica e do fator de dissipação dielétrica com a frequência são mostradas na Figura 17 e Figura 18, respectivamente.

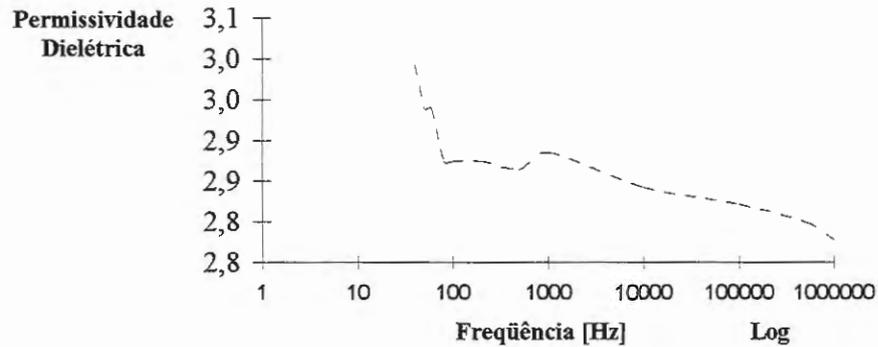


Figura 17: Curva característica da variação da permissividade dielétrica da Resina A249 + B25015, com a frequência da tensão aplicada.

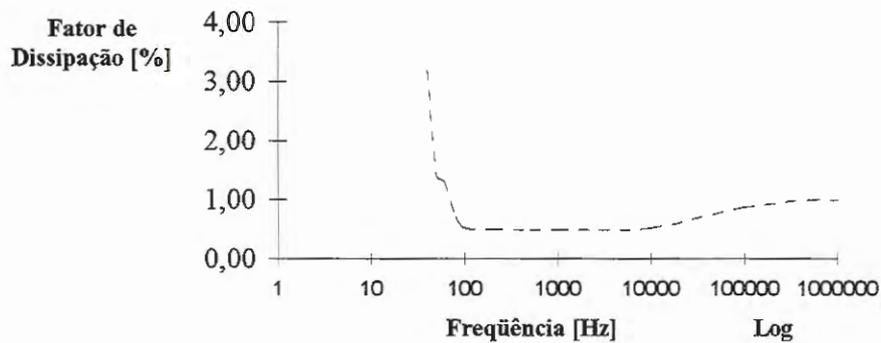


Figura 18: Curva característica da variação do fator de dissipação dielétrica da Resina A249 + B25015, com a frequência da tensão aplicada.

Na Figura 19, é apresentada a variação da capacitância com o fator de dissipação dielétrico.

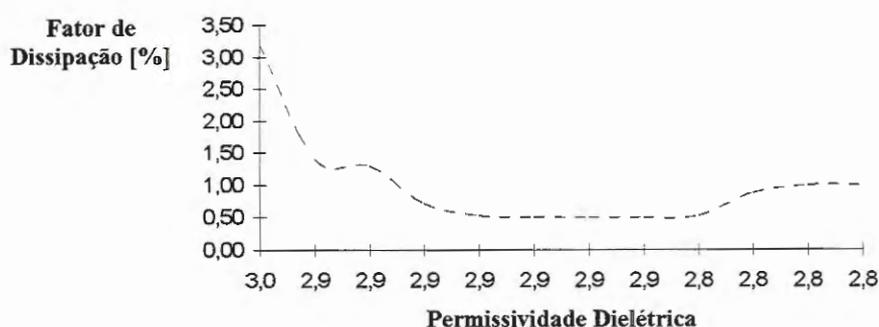


Figura 19: Variação da permissividade dielétrica da Resina A249 + B25015, com o fator de dissipação.

### 6.3 Resultados da Resina A253 + B351.

#### 6.3.1 Espessuras das amostras.

Foram utilizados 10 corpos de prova, com diâmetro de aproximadamente 10 cm.

Repetiu-se o processo de obtenção das espessuras médias. Os valores encontram-se na tabela 11 e 12.

Tabela 11: Média aritmética das espessuras dos corpos de prova da Resina A253 + B351, de aproximadamente 1,0 mm.

Nº da amostra	Espessura (em 4 pontos) [mm]	Média aritmética [mm]
1	1,05 - 1,05 - 1,06 - 1,06	1,055
2	0,94 - 0,94 - 0,94 - 0,94	0,940
3	1,06 - 1,06 - 1,06 - 1,06	1,060
4	1,04 - 1,04 - 1,04 - 1,04	1,040
5	0,99 - 0,99 - 1,00 - 1,00	0,995
6	0,97 - 0,97 - 0,97 - 0,97	0,970
7	1,05 - 1,06 - 1,06 - 1,06	1,058
8	1,06 - 1,06 - 1,06 - 1,06	1,060
9	1,05 - 1,05 - 1,05 - 1,05	1,050
10	0,99 - 0,99 - 0,99 - 0,99	0,990

Tabela 12: Média aritmética das espessuras dos corpos de prova da Resina A253 + B351, de aproximadamente 2,0 mm.

Nº da amostra	Espessura (em 4 pontos) [mm]	Média aritmética [mm]
1	1,72 - 1,72 - 1,73 - 1,73	1,725
2	2,03 - 2,01 - 2,02 - 2,02	2,020
3	2,01 - 2,01 - 2,02 - 2,03	2,018
4	2,05 - 2,06 - 2,07 - 2,06	2,060
5	2,06 - 2,07 - 2,07 - 2,07	2,068
6	1,99 - 2,00 - 2,01 - 1,98	1,995
7	2,07 - 2,07 - 2,07 - 2,07	2,070
8	2,10 - 2,12 - 2,12 - 2,12	2,115
9	2,03 - 2,03 - 2,03 - 2,03	2,030
10	2,07 - 2,07 - 2,07 - 2,07	2,070

Como podemos verificar, há uma considerável uniformidade nas espessuras dos corpos de prova, os quais são importantes para a caracterização real do material.

**Observação:** Estas medidas foram realizadas com um paquímetro digital, aferido recentemente no I.P.T.- São Paulo.

### 6.3.2. Característica: Rigidez dielétrica.

Os resultados de rigidez dielétrica da Resina A253 + B351, encontram-se na Tabela 13.

Tabela 13: Resultados dos valores de rigidez dielétrica da Resina A253+ B351.

Nº da amostra	Espessura [mm]	Tensão de Ruptura [kV]	Rigidez Dielétrica [kV/mm]
1	1,055	33,0	31,280
2	0,940	31,5	33,511
3	1,060	30,0	28,302
4	1,040	29,5	28,365
5	0,995	32,0	32,161
6	0,970	31,0	31,959
7	1,058	34,0	32,136
8	1,060	33,0	31,132
9	1,050	32,5	30,952
10	0,990	32,0	32,323
<b>Média</b>	<b>1,022</b>	<b>31,9</b>	<b>31,212</b>
<b>Desvio</b>	<b>0,0419</b>	<b>1,32</b>	<b>1,5963</b>



### 6.3.3. Características: Resistividade e condutividade, volumétrica e superficial.

Na Tabela 14, temos os resultados dos ensaios com os valores de resistividade volumétricas e superficial.

Tabela 14: Resultados dos valores da resistividade volumétrica e superficial da Resina A253+ B351.

Nº da amostra	Espessura [cm]	Rv .10 exp. 13 [ohms]	Rs .10 exp. 14 [ohms]	Resistividade Vol. .10exp. 15 [ohms.cm]	Resistividade Sup. .10exp. 15 [ohms]
1	0,1055	2,0	0,75	3,72	1,41
2	0,0940	2,1	0,77	4,38	1,45
3	0,1060	2,3	0,90	4,25	1,69
4	0,1040	2,0	0,65	3,77	1,22
5	0,0995	2,1	0,75	4,14	1,41
6	0,0970	2,2	0,75	4,45	1,41
7	0,1058	2,2	0,75	4,08	1,41
8	0,1060	2,5	0,85	4,62	1,60
9	0,1050	2,2	0,75	4,11	1,41
10	0,0990	2,2	0,90	4,36	1,69
<b>Média</b>	<b>0,1022</b>	<b>2,2</b>	<b>0,78</b>	<b>4,19</b>	<b>1,470</b>
<b>Desvio</b>	<b>0,0042</b>	<b>0,14</b>	<b>0,074</b>	<b>0,273</b>	<b>0,1396</b>

Os resultados de condutividade volumétrica e superficial determinados encontram-se na Tabela 15.

Tabela 15: Resultados dos valores de condutividade volumétrica e superficial da Resina A253+ B351.

Nº da amostra	Condutividade Volumétrica .10 exp. -16 [ohms.cm] <sup>-1</sup>	Condutividade Superficial .10 exp.-16 [ohms] <sup>-1</sup>
1	2,69	7,09
2	2,28	6,91
3	2,35	5,91
4	2,65	8,18
5	2,42	7,09
6	2,25	7,09
7	2,45	7,09
8	2,16	6,26
9	2,44	7,09
10	2,30	5,91
<b>Média</b>	<b>2,40</b>	<b>6,86</b>
<b>Desvio</b>	<b>0,161</b>	<b>0,647</b>

#### 6.3.4. Características: Permissividade dielétrica, fator de dissipação, índice de perdas, fator de qualidade e susceptibilidade elétrica.

Os valores de permissividade dielétrica, fator de dissipação e índice de perdas dielétricas, realizados sob uma tensão aplicada de 1,5 volts em 60 Hz, encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16: Valores da permissividade dielétrica, do fator de dissipação e do índice de perdas dielétricas da Resina A253+ B351 com tensão aplicada de 1,5 V a 60 Hz.

Nº da amostra	h [cm]	C [pF] à 60 Hz	Fator de Dissipação [%]	Permissividade Dielétrica	Índice de Perda [%]
1	0,1725	29,8	3,5	2,8	9,9
2	0,2020	28,5	3,4	3,2	10,8
3	0,2018	28,2	3,4	3,1	10,7
4	0,2060	27,8	3,3	3,2	10,4
5	0,2068	27,9	3,9	3,2	12,4
6	0,1995	24,0	3,0	2,6	7,9
7	0,2070	25,4	3,3	2,9	9,6
8	0,2115	27,3	3,5	3,2	11,2
9	0,2030	26,4	3,4	3,0	10,1
10	0,2070	26,4	3,0	3,0	9,1
<b>Média</b>	<b>0,2017</b>	<b>27,2</b>	<b>3,37</b>	<b>3,03</b>	<b>10,22</b>
<b>Desvio</b>	<b>0,0103</b>	<b>1,583</b>	<b>0,420</b>	<b>0,176</b>	<b>1,162</b>

Na Tabela 17, temos os resultados das características acima, só que com tensão aplicada de 2,0 kV a uma frequência de 60 Hz.

Tabela 17: Valores da permissividade dielétrica, do fator de dissipação e do índice de perdas dielétricas da Resina A253+ B351 com tensão aplicada de 2,0 kV a 60 Hz.

Nº da amostra	h [cm]	C [pF] à 60 Hz	Fator de Dissipação [%]	Permissividade Dielétrica	Índice de Perda [%]
1	0,1725	31,1	3,5	3,0	10,4
2	0,2020	26,5	2,7	3,0	8,0
3	0,2018	26,6	2,7	3,0	8,0
4	0,2060	25,9	2,7	2,9	8,0
5	0,2068	26,4	3,0	3,0	9,1
6	0,1995	25,6	2,6	2,8	7,3
7	0,2070	26,1	2,6	3,0	7,8
8	0,2115	26,5	2,7	3,1	8,4
9	0,2030	26,4	2,6	3,0	7,7
10	0,2070	25,9	2,8	3,0	8,3
<b>Média</b>	<b>0,2017</b>	<b>26,7</b>	<b>2,8</b>	<b>3,0</b>	<b>8,30</b>
<b>Desvio</b>	<b>0,0103</b>	<b>1,50</b>	<b>0,26</b>	<b>0,064</b>	<b>0,82</b>

Os valores de susceptibilidade dielétrica e fator de qualidade calculados a partir dos resultados dos ensaios realizados com tensão aplicada de 1,5 volts, 60 Hz, encontram-se na tabela 18.

Tabela 18: Valores do fator de qualidade e susceptibilidade elétrica da Resina A253 + B351 com tensão elétrica aplicada de 1,5 V a 60 Hz.

Nº da amostra	h [cm]	Susceptibilidade Elétrica	Fator de Qualidade
1	0,1725	0,15	28,57
2	0,2020	0,17	29,41
3	0,2018	0,17	29,41
4	0,2060	0,17	30,30
5	0,2068	0,17	25,64
6	0,1995	0,13	33,33
7	0,2070	0,15	30,30
8	0,2115	0,17	28,57
9	0,2030	0,16	29,41
10	0,2070	0,16	33,33
<b>Média</b>	<b>0,2017</b>	<b>0,16</b>	<b>29,83</b>
<b>Desvio</b>	<b>0,01028</b>	<b>0,013</b>	<b>2,149</b>

Na tabela 19, temos os resultados das características acima, com tensão aplicada de 2,0 kV à frequência de 60 Hz.

Tabela 19: Valores do fator de qualidade e susceptibilidade elétrica da Resina A253 + B351 com tensão elétrica aplicada de 2,0 kV a 60 Hz.

Nº da amostra	h [cm]	Susceptibilidade Elétrica	Fator de Qualidade
1	0,1725	0,16	28,57
2	0,2020	0,16	37,04
3	0,2018	0,16	37,04
4	0,2060	0,16	37,04
5	0,2068	0,16	33,33
6	0,1995	0,15	38,46
7	0,2070	0,16	38,46
8	0,2115	0,17	37,04
9	0,2030	0,16	38,46
10	0,2070	0,16	35,71
<b>Média</b>	<b>0,2017</b>	<b>0,16</b>	<b>35,84</b>
<b>Desvio</b>	<b>0,0103</b>	<b>0,0054</b>	<b>2,924</b>

A variação da permissividade dielétrica e do fator de dissipação do dielétrico em função da frequência está apresentada na Tabela 20.

Tabela 20: Valores da permissividade e do fator de dissipação dielétrico da Resina A253+ B351, em função da frequência.

f [Hz]	Permissividade Dielétrica	Tang $\delta$ [%]
40	3,2	4,5
50	3,2	2,9
60	3,2	2,8
80	3,1	2,1
100	3,1	2
200	3,1	1,7
500	3,0	1,4
1.000	3,1	1,3
10.000	3,0	1,1
100.000	2,9	1,3
500.000	2,9	1,4
1.000.000	2,9	1,4

A curva característica da variação da capacitância e do fator de dissipação dielétrico (tang $\delta$ ) com a frequência encontra-se nas Figuras 20 e 21, respectivamente.

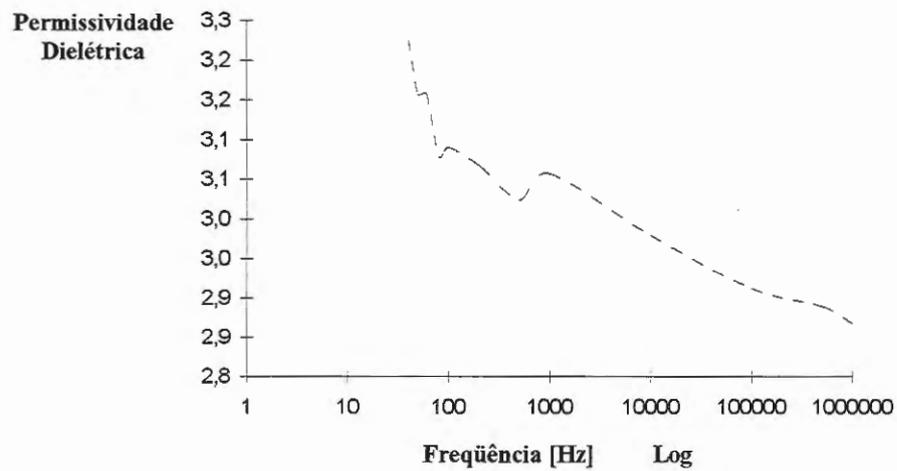


Figura 20: Variação da permissividade dielétrica da Resina A253 + B351, com a frequência da tensão aplicada.

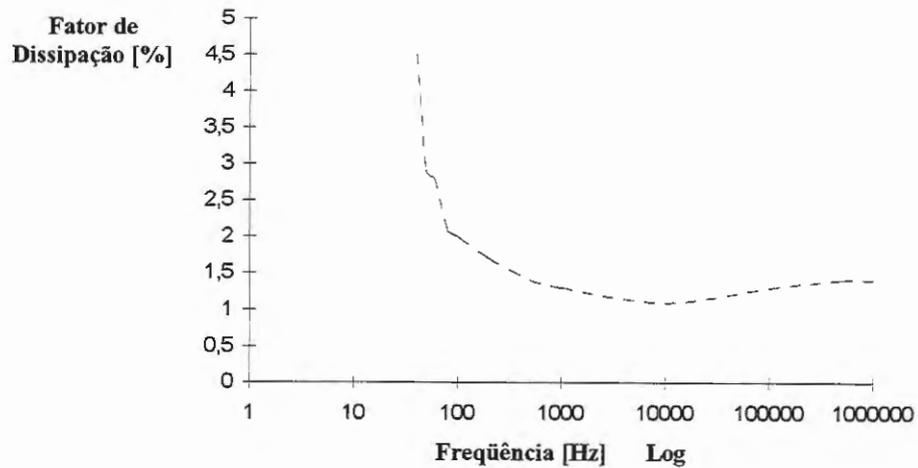


Figura 21: Variação do fator de dissipação dielétrica da Resina A253 + B351, com a frequência da tensão aplicada.

Na Figura 22, é apresentada a curva característica da permissividade em função do fator de dissipação dielétrica.

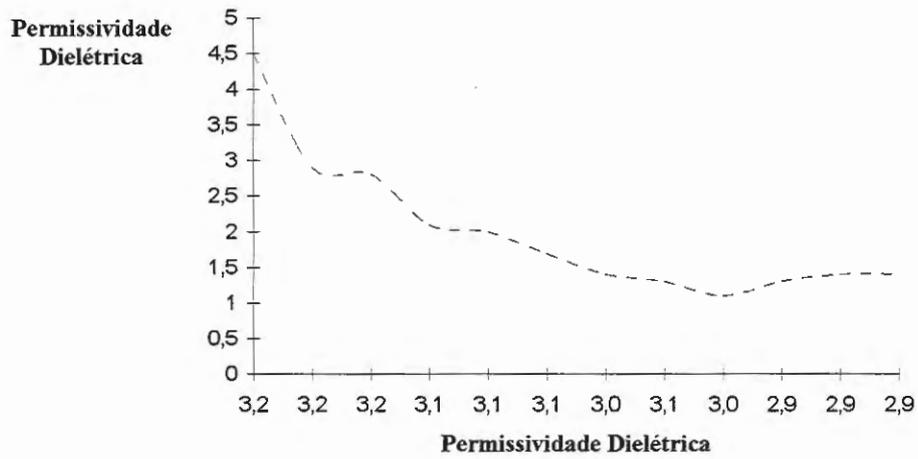


Figura 22: Permissividade dielétrica em função do fator de dissipação dielétrico.

#### 6.4 Resultados finais das Resina: A249 + B25015 e A253 + B351.

O resultado final da caracterização elétrica das resinas encontra-se na Tabela 21.

Tabela 21: Resultado final da caracterização elétrica das Resinas: A249 + B25015 e A253 + B351.

Características Elétricas	Unidade	Resina A249 + B25015	Resina A253 + B351
Rigidez Dielétrica	kV/mm	28,9	31,2
Resistividade Volumétrica ( $\rho_v$ )	$\Omega \cdot \text{cm}$	$4,21 \cdot 10^{15}$	$4,19 \cdot 10^{15}$
Resistividade Superficial ( $\rho_s$ )	$\Omega$	$1,40 \cdot 10^{15}$	$1,47 \cdot 10^{15}$
Condutividade Volumétrica ( $\gamma_v$ )	$\Omega^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$	$2,38 \cdot 10^{-16}$	$2,40 \cdot 10^{-16}$
Condutividade Superficial ( $\gamma_s$ )	$\Omega^{-1}$	$7,26 \cdot 10^{-16}$	$6,86 \cdot 10^{-16}$
Permissividade Dielétrica ( $\epsilon_r$ ) - 1,5 V	-----	2,80	3,03
Permissividade Dielétrica ( $\epsilon_r$ ) - 2,0 kV	-----	2,84	2,97
Susceptibilidade Elétrica ( $\chi_e$ ) - 1,5 V	-----	0,15	0,16
Susceptibilidade Elétrica ( $\chi_e$ ) - 2,0 kV	-----	0,15	0,16
Fator de Dissipação ( $Tg \delta$ ) - 1,5 V	%	1,73	3,37
Fator de Dissipação ( $Tg \delta$ ) - 2,0 kV	%	1,04	2,79
Fator de Qualidade ( $Q$ ) - 1,5 V	-----	59,4	29,8
Fator de Qualidade ( $Q$ ) - 2,0 kV	-----	96,4	35,8
Índice de Perdas ( $\epsilon''$ ) - 1,5 V	%	4,84	10,2
Índice de Perdas ( $\epsilon''$ ) - 2,0 kV	%	2,95	8,29

# CAPÍTULO 7

## Conclusões

### 7.1 Discussão das dificuldades encontradas.

Após um embasamento teórico, este trabalho foi realizado por tentativas experimentais, em função da especificação deste novo dielétrico sólido.

As dificuldades maiores foram em relação à confecção do corpo de prova adequado, que permitisse confiabilidade nos resultados dos ensaios elétricos.

Com o aperfeiçoamento do corpo de prova, foram possíveis as realizações dos ensaios elétricos. A metodologia dos ensaios foi adaptada às características do corpo de prova, como, por exemplo, a determinação da tensão de ruptura com o uso de óleo isolante envolvendo a amostra e a construção da célula de eletrodos, para adaptar à ponte RLC já existente.

As normas técnicas da A.B.N.T. foram úteis como meio de padronização dos ensaios, e embora possuam certas semelhanças com as outras normas internacionais, como a da A.S.T.M, British Standard, Deutsche Industrie Normen, elas poderiam ser mais amplas em certos aspectos. Por exemplo:

- deviam sugerir que o ensaio de rigidez dielétrica com o arranjo dos eletrodos e da amostra se realizasse dentro de um recipiente com óleo isolante, quando a rigidez da amostra fosse alta e não fosse possível realizar no ar por causa do arco elétrico, que provoca curto-circuito entre os eletrodos. A norma técnica internacional, ASTM D149 (1.978), dá essa sugestão, enquanto que a norma técnica brasileira correspondente não especifica;
- enquanto o dimensionamento do “gap” entre os eletrodos da célula de medir permissividade dielétrica está mais detalhado na Norma DIN 53483 (1.970), onde se explica que “o campo elétrico entre os eletrodos é virtualmente homogêneo, quando a largura do “gap” é menor em relação à separação entre os eletrodos (espessura da amostra), quando o anel de guarda é de largura adequada e quando o eletrodo guardado e o anel de guarda têm aproximadamente

o mesmo potencial para a terra”, a NBR 5245 (1.982) comenta apenas que esta distância (“air gap”) “deve ser pequena comparada com a espessura do corpo de prova”.

Conforme o exposto, o trabalho foi realizado metodicamente, com os cuidados especiais que se devem ter num laboratório para caracterização elétrica de dielétricos.

## 7.2 Discussão dos resultados e conclusão final.

Os resultados dos ensaios elétricos são de possível reprodutividade, dentro de uma faixa de valores considerável, devido à variação de um dado corpo de prova em função das condições de ensaio e também em razão da não uniformidade do mesmo material de uma amostra para outra.

Por meio das curvas das figuras 17 e 20, comprovamos que estas resinas apresentam características de estruturas polares e, conseqüentemente, as suas permissividades dielétricas variam com a frequência. As curvas da variação da permissividade dielétrica com a frequência são típicas de materiais com estrutura polar e obtidas de ensaios na temperatura ambiente.

Comparando-se as duas resinas, em questão da aparência, a resina A249 + B25015 é mais transparente e também mais rígida que a resina A253 + B351. O preço de custo da primeira é quase duas vezes maior que o da segunda.

Analisando-se os resultados finais das características elétricas das duas resinas, notam-se poucas diferenças entre elas.

A Resina A253 + B351 possui maior rigidez dielétrica, quase se iguala com os valores da resina A249 + B25015 na resistividade volumétrica e superficial, na condutividade volumétrica e superficial e na permissividade e susceptibilidade elétrica, mas se distancia dos valores do fator de dissipação, do índice de perdas e do fator de qualidade.

O comportamento das resinas em relação à permissividade dielétrica é semelhante tanto nos ensaios realizados em alta tensão (2,0 kV) como nos realizados em baixa tensão (1,5 V). Enquanto que o fator de dissipação e o índice de perdas diminuem com o aumento da tensão e, conseqüentemente, o fator de qualidade aumenta, como já se esperava.

Essas diferenças são importantes ou não, dependendo do tipo de aplicação de cada uma, após a análise das necessidades básicas.

No ANEXO C, temos algumas informações sobre as características de outros materiais existentes comercialmente. Os fabricantes fornecem com maior frequência as propriedades químicas, enquanto dificilmente fornecem as características elétricas.

Para comparar corretamente as características das resinas poliuretanas derivadas do óleo de mamona com os outros produtos, dever-se-iam ter informações completas sobre como foram realizados os ensaios elétricos. Por exemplo: o tipo de eletrodo, as dimensões das amostras, o nível de tensão elétrica aplicado, o meio onde foi ensaiado (ar ou óleo), etc.

Conforme os dados do ANEXO C, as resinas (A249+B25015) em estudo possuem valores maiores de rigidez dielétrica e resistividade volumétrica do que as resinas XP-401 e XP-402 (à base de poliuretana) e do que as resinas epóxis (produto DP 105). Em relação às de Dobeckan, também à base de poliuretana, as resinas em análise possuem menores valores de rigidez dielétrica e resistividades volumétricas com valores semelhantes. Entretanto, embora se conheça a norma técnica segundo a qual foram realizados os ensaios, não é correto comparar as características resultantes, sem saber se os ensaios foram realizados nas mesmas condições.

A comparação de materiais dielétricos, em termos de permissividade dielétrica, depende de sua aplicação.

Outro detalhe importante a se observar é que as resinas comerciais possuem cargas aditivas, enquanto que as resinas poliuretanas em estudo encontram-se nos seus estados puros, sem cargas aditivas. Isto significa que, em estudos futuros, poder-se-ão melhorar ainda mais as condições de serviço e as características destas resinas com o acréscimo de cargas, como se deseja.

Finalmente, como sugestões de pesquisas em sequência, seriam importantes estudos relativos ao comportamento dessas resinas submetidas aos raios ultravioleta e infravermelho, visando aplicações em dispositivos expostos ao sol, como isoladores elétricos, que também deverão ser analisados em relação às características mecânicas e térmicas.

II.1 - Tabela A : Equações, identificações, fatores que influenciam os ensaios, condicionamento e tensão aplicada.

Características elétricas	Resistividade superficial [ $\Omega$ ] e Resistividade volumétrica [ $\Omega.m$ ]	Permeabilidade dielétrica( $\epsilon$ ), Fator de Dissipação ( $tg\delta$ ) e índice de perdas ( $\epsilon''$ )	Rigidez Dielétrica ( $E_r$ ) [kV/mm]
Equações	$\rho_s = R_s \frac{2\pi}{\ln(d_2/d_1)}$ e $\rho_v = R_v \frac{S}{h}$	$\epsilon = C_x \cdot h / \epsilon_0 \cdot S$ ; $P = U^2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot C \cdot tg\delta$ [W] ; $\epsilon'' = \epsilon \cdot tg\delta$	$E_r = U_r / h$
Norma Técnica A.B.N.T.	NBR 5403	NBR 5245	NBR 5405
Fatores que influenciam os ensaios	- amplitude e tempo de aplicação da tensão; - natureza e geometria dos eletrodos; - temperatura; - umidade ambiental e do c.p.; <b>Obs.:</b> para medir $\rho_s$ , o c.p. não deve ser limpo se desejar os resultados nas condições de serviço.	- frequência; - temperatura; - umidade; - campo elétrico(em casos especiais).	- frequência, a forma de onda e o tempo de aplicação da tensão; - espessura e homogeneidade do c.p.; - temperatura, pressão e umidade atmosférica; - agentes de contaminação; - materiais, dimensões e formatos dos eletrodo; - características elétricas e térmicas do meio ambiente.
Condicionamento	Condicionar as amostras nas mesmas C.P.T.U., antes do ensaio. <b>Obs:</b> deve-se medir após um minuto de eletrificação ( $p/$ valor $< 10^{10} \Omega.m$ ), enquanto $p/$ valores superiores, deve-se analisar quanto tempo demora $p/$ ocorrer a estabilização da corrente e identificá-la.	De acordo com o material.	De acordo com o material .
Tensão aplicada	tensões contínuas (V): 100, 250, 500, 1000, 2500, 5000, 10000 e 15000	Menor que 1000 V e freq. entre 15 Hz à 300 MHz ( de preferência à freq. Industrial de 60 Hz)	- Tensão Alternada (CA) - frequência entre 40 e 62 Hz.

## II.2 - Tabela B : Método de medição, precisão e tipo de eletrodo.

Características elétricas	Resistividade superficial [ $\Omega$ ] e Resistividade volumétrica [ $\Omega.m$ ]	Permeabilidade dielétrica( $\epsilon$ ), Fator de Dissipação ( $tg\delta$ ) e índice de perdas ( $\epsilon''$ )	Rigidez Dielétrica ( $E_r$ ) [kV/mm]
Método de medição	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Método Direto : voltímetro-amperímetro (<math>R \cong 10^{11} \Omega</math>)</li> <li>- Método Comparativo :               <ul style="list-style-type: none"> <li>• ponte de Weatstone ou método de amperímetro;</li> <li>• amplificador de C.C. ou eletrômetro.</li> </ul> </li> </ul> <p><b>Obs.:</b> podem ser usados circuitos especiais disponíveis comercialmente</p>	<p>Método / Faixa de freq. Recomendado</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Ponte Schering / até 10 Hz;</li> <li>- Ponte a trafo / 15 Hz-50 MHz;</li> <li>- Malhas T-Paralelo / 50 KHz - 30 MHz;</li> <li>- ressonância / 10 KHz - 260 MHz;</li> <li>- Variância de reatância ou susceptância / 10 KHz - 100 MHz.</li> </ul> <p><b>Obs.:</b> Sem caráter limitativo</p>	<p>Aplicar tensão através do circuito formado por :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- trafo elevador (40mA);</li> <li>- fonte variável;</li> <li>- resistor de proteção;</li> <li>- disjuntor ;</li> <li>- medição de tensão através de um voltímetro e calibrado contra um centelhador de esfera até a tensão necessária.</li> </ul>
Precisão	<p><math>\pm 10\%</math> p/ Resist. <math>&lt; 10^{10}\Omega</math></p> <p><math>\pm 20\%</math> p/ Resist. <math>&gt; 10^{10}\Omega</math></p>	<p>a) 1% p/ espessura do c.p. de 1,5 mm, &gt; 1 % p/ espessura maiores (6 à 12 mm)</p> <p><b>Obs.:</b> a espessura do c.p. tem tolerância de 0,2 %;</p> <p>b) <math>\pm (0,1\% + 0,02 \text{ pF})</math> capac. à freq. baixa;</p> <p><math>\pm (0,5\% + 0,1 \text{ pF})</math> capac. à freq. altas</p> <p>c) <math>\pm (2\% + 0,00005)tg\delta</math> à freq. baixas, <math>\pm (2\% \pm 0,0002) tg\delta</math> à freq. altas</p>	<p>Os valores dos resultados não devem se afastar de 15% da média aritmética de 5 ensaios. Caso contrário, deve-se efetuar mais 5 ensaios e obter a média entre os 10 resultados.</p>
Eletrodo	<p>Do tipo de Guarnição, com medições especificadas.</p> <p>Por ex. : <math>d_1=50\text{mm}</math>, <math>d_2=60\text{mm}</math> e <math>d_3=80\text{mm}</math></p> <p>Veja Fig. 1, 2 e 3.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dimensões especificadas, referentes à tabela 1;</li> <li>- eletrodos circulares;</li> <li>- tubos ou cilíndricos grandes;</li> <li>- tiras ou fitas.</li> </ul> <p><b>Obs.:</b> de preferência com Guarnição</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- cilíndricos p/ chapas e folhas (Fig. 4 e 5);</li> <li>- fita metálica p/tubos rígidos (Fig. 6)</li> <li>- fios metálicos ou hastes p/ tubos flexíveis;</li> <li>- cilíndrico p/ tiras e fitas (Fig.7)</li> <li>- 2 esferas metálicas de 12,5 mm p/ materiais de enchimento;</li> <li>- materiais moldados (esp. de 3mm).</li> </ul>

II.3 - Tabela C : Tipos de materiais de eletrodos e de corpos de prova.

Características elétricas	Resistividade superficial [ $\Omega$ ] e Resistividade volumétrica [ $\Omega.m$ ]	Permeabilidade dielétrica( $\epsilon$ ), Fator de Dissipação ( $tg\delta$ ) e índice de perdas ( $\epsilon''$ )	Rigidez Dielétrica ( $E_r$ ) [kV/mm]
<b>Materiais dos eletrodos</b>	<p>1) geral: qualquer material condutor de fácil aplicação e bom contato.  <b>Obs.:</b> é preferível certificar-se dos ensaios, utilizando 2 tipos de eletrodos com materiais diferentes.</p> <p>2) tinta prata condutora;  3) metal pulverizado;  4) metal evaporado;  5) eletrodo líquido;  6) grafite coloidal;  7) borracha condutora; e  8) folha metálica.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- folha metálica (chumbo ou estanho puro até 100<math>\mu</math>m de espessura);</li> <li>- alumínio de esp. 10 <math>\mu</math>m ou de ouro;</li> <li>- metais vaporizados (prata ou puro);</li> <li>- pulverização metálica (zinco ou cobre);</li> <li>- mercúrio e outros eletrodos;</li> <li>- liga de Wood ou ligas de baixo ponto de fusão (como o cádmio);</li> <li>- tinta de prata de alta condutividade;</li> <li>- eletrodos metálicos aplicados por evaporação em alto vácuo; e</li> <li>- grafite.</li> </ul>	<p>Qualquer metal (ex. cobre).  <b>Obs.:</b> - deve ser limpo e isentos de crateras decorrentes de centelhamentos;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- não deve ter inclinação ou deslocamento entre os eletrodos;</li> <li>- não influenciar na variação de pressão sobre o c.p..</li> </ul>
<b>Corpo de prova</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- qualquer forma que permita o uso de um terceiro eletrodo de guarda.</li> <li>- dimensões de acordo com as dimensões dos eletrodos.</li> </ul> <p><b>Obs.:</b> o corpo de prova deve preencher a superfície especificada.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- preferência : em forma de chapa, embora alguns só podem ser em forma tubular.</li> <li>- diâmetro de 10 cm ou mais, porém finos por causa da limitação da resolução de <math>\approx 1pF</math> nos aparelhos de medidas, existentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- chapas e folhas retangulares de 10 cm de comp. E de largura de (25 <math>\pm</math> 0,2)mm - para espessura de <math>\leq 3</math>mm ou <math>&gt; 3</math> mm (Fig. 4 e5);</li> <li>- tiras e fitas;</li> <li>- tubos flexíveis;</li> <li>- tubos rígidos (25 <math>\pm</math>0,2)mm axial de anel ou segmento de anel de 100 mm de comprimento.</li> <li>- material moldado;</li> <li>- películas (p/ vernizes);</li> <li>- material de enchimento.</li> </ul> <p><b>Obs.:</b> também existem eletrodos usados para ensaios efetuados paralelamente à superfície ou ao longo das lâminas para verificar se o material suporta determinada tensão.</p>

II.4 - Tabela D : Método de ensaio e análise dos resultados.

Características elétricas	Resistividade superficial [ $\Omega$ ] e Resistividade volumétrica [ $\Omega.m$ ]	Permeabilidade dielétrica( $\epsilon$ ), Fator de Dissipação ( $tg\delta$ ) e índice de perdas ( $\epsilon''$ )	Rigidez Dielétrica ( $E_r$ ) [kV/mm]
Ensaio	<p>- curto-circuitar os eletrodos de medição 1 e 3, até que atinja um valor constante e pequeno, comparado com o valor provável da corrente sob eletrificação (ou a corrente de 100 min. de duração);</p> <p>- aplicar a tensão contínua e marcar o tempo;</p> <p>- fazer medição após cada um dos tempos de eletrificação : 1, 2, 5, 10, 50 e 100 min. . Se 2 medições sucessivas apresentarem o mesmo valor, o ensaio pode ser terminado.</p> <p><b>Obs.:</b> os resultados são reproduzíveis dentro de uma faixa de 10 % e são freqüentemente muito divergentes numa gama de valores de 10 para 1, em condições aparentemente idênticas.</p>	<p>- aplicar a tensão na freqüência especificada e fazer medições através dos métodos citados</p>	<p>1) Ensaio de tempo curto:</p> <p>- aumentar a tensão a partir do zero, com taxa uniforme de modo que ocorre perfuração entre 10 e 20 s em média;</p> <p>2) Ensaio de 20 s por degraus (passo a passo):</p> <p>- escolher na coluna da tabela 2, a tensão mais próxima à 40 % da provável tensão de perfuração . Esta tensão escolhida deve ser aumentada no período de 20 s.</p> <p>3) Ensaio de pericia:</p> <p>- aplicar um valor determinado de tensão durante o tempo especificado.</p> <p><b>Obs.:</b> confirmação de perfuração :</p> <p>a) aumento de corrente e diminuição da tensão, fundindo um fusível ou acionando um disjuntor;</p> <p>b) ensaios perpendiculares à superfície do material : exame visual;</p> <p>c) ensaio paralelo : aplicar 2 vezes uma tensão inferior à primeira.</p>
Resultados	$\rho_s = R_s \cdot p/g$ [ $\Omega$ ] Onde : p = perímetro [m] g=distância no eletrodo [m] $\rho_v = R_v \cdot A/h$ [ $\Omega.m$ ] Onde : A = área [m <sup>2</sup> ] h= espessura [m]	$\epsilon = (C_x - C_b) / C_o$ Onde : C <sub>o</sub> e C <sub>b</sub> encontra-se na tabela 3, 4 e 5 $tg \delta \Rightarrow$ tabela 4 e de acordo com o aparelho utilizado $\epsilon'' = \epsilon \cdot tg \delta$	$E_r = U_r / h$ [kV/mm]

II.5 - Tabela E : apresentação do conteúdo do relatório referente ao ensaio.

Características elétricas	Resistividade superficial [ $\Omega$ ] e Resistividade volumétrica [ $\Omega.m$ ]	Permeabilidade dielétrica( $\epsilon$ ), Fator de Dissipação ( $tg\delta$ ) e índice de perdas ( $\epsilon''$ )	Rigidez Dielétrica ( $E_r$ ) [kV/mm]
<b>Relatório</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- descrição e identificação do material;</li> <li>- forma e dimensão do c.p.;</li> <li>- tipos, material e dimensões dos eletrodos;</li> <li>- condicionamento do c.p.;</li> <li>- condições do ensaio;</li> <li>- método de medição;</li> <li>- tensão aplicada;</li> <li>- resistividade volumétrica e superficial.</li> </ul> <p><b>Obs.:</b> anotar o tempo de eletrificação;</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- tipo e designação do material isolante, dimensões, método e data de amostragem;</li> <li>- método e duração do condicionamento dos c.p.;</li> <li>- disposição dos eletrodos e tipo de eletrodo;</li> <li>- aparelhagem utilizada;</li> <li>- temperatura e umidade relativa durante os ensaios e do c.p.;</li> <li>- a tenção aplicada;</li> <li>- a frequência aplicada;</li> <li>- a permissividade relativa <math>\epsilon</math>;</li> <li>- o fator de dissipação dielétrica <math>tg \delta</math>;</li> <li>- a data do ensaio.</li> </ul> <p><b>Obs.:</b> acrescente se necessário o índice de perdas e o ângulo de perdas em relação à temperatura e à frequência.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- a espessura nominal ou espessura média aritmética do c.p..Nos c.p. com cavidades indica-se a espessura nominal do material e a espessura média aritmética da região da cavidade;</li> <li>- natureza e propriedades do meio circundante durante o ensaio;</li> <li>- condicionamento, temperatura e umidade relativa do ambiente;</li> <li>- disposição dos eletrodos;</li> <li>- tensão disruptiva para cada perfuração;</li> <li>- <math>E_r</math> média, em kV/mm e a frequência;</li> <li>- duração do ensaio ( no ensaio de perícia);</li> <li>- método de aplicação da tensão;</li> <li>- no caso de aplicação da tensão em degrau, o valor da tensão inicial aplicada;</li> <li>- indicação do tipo de perfuração (ou danos ocorridos no caso de ensaios de perícia);</li> <li>- o material de suporte no caso de películas de verniz.</li> </ul>

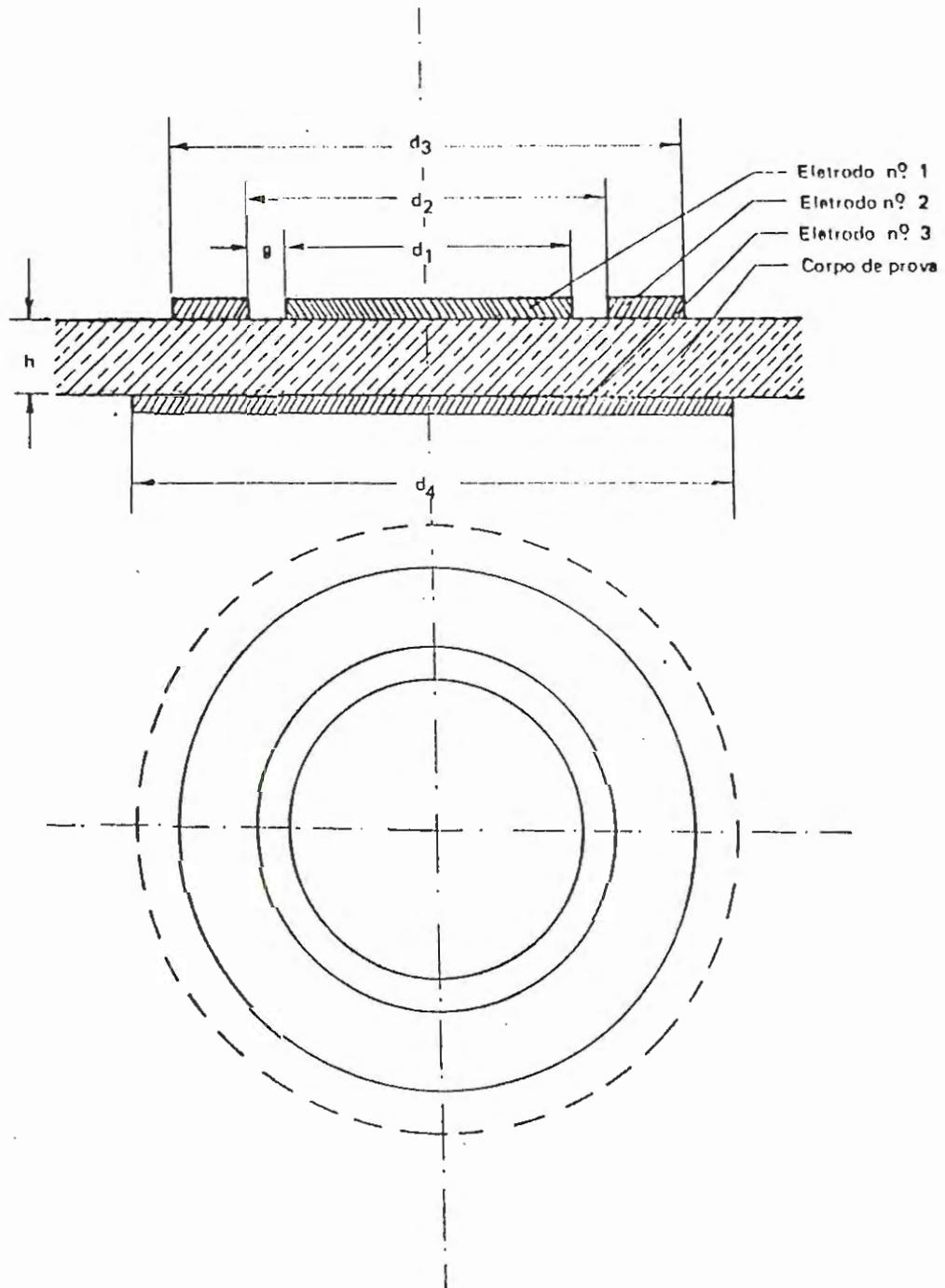


Figura 1 - Exemplo de disposição de eletrodos sobre corpo de prova plano.

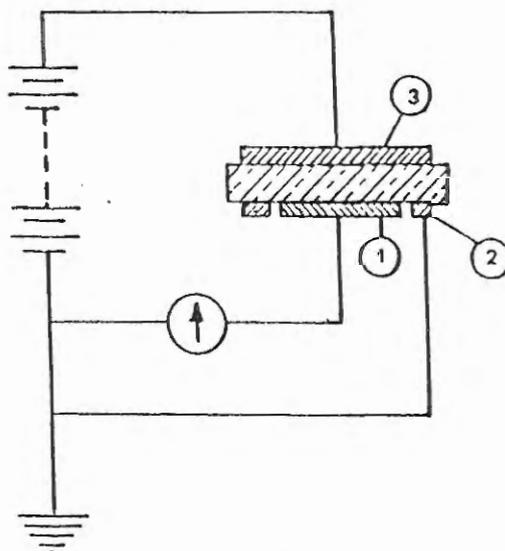


Figura 2a – Ligação básica para eletrodo guarnecido usado para medição da resistência volumétrica.

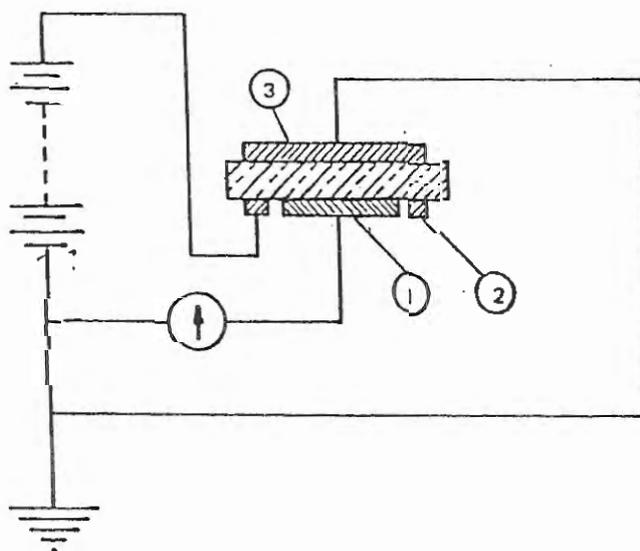


Figura 2b – Ligação básica para eletrodo guarnecido usado para medição da resistência superficial.

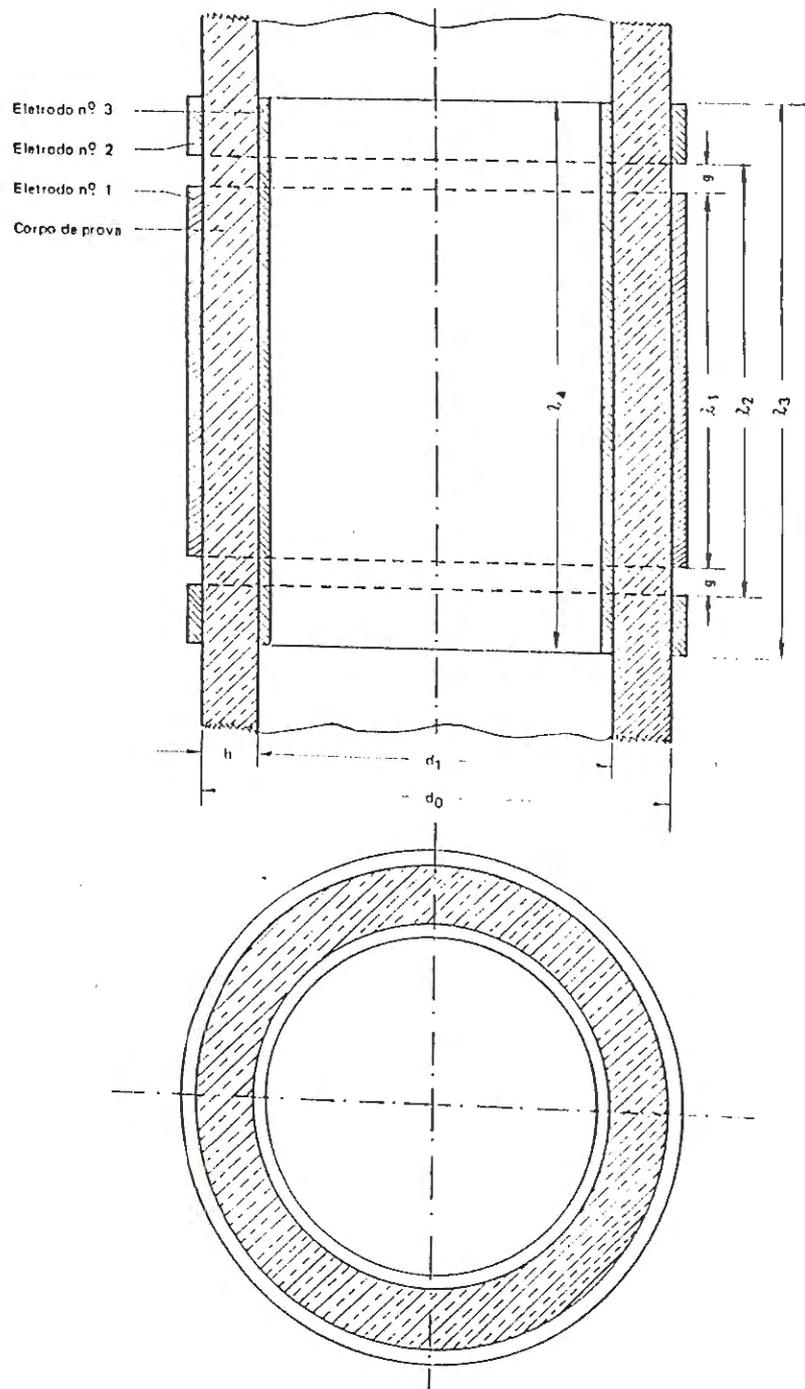


Figura 3 – Exemplo de disposição de eletrodo sobre corpo de prova tubular.

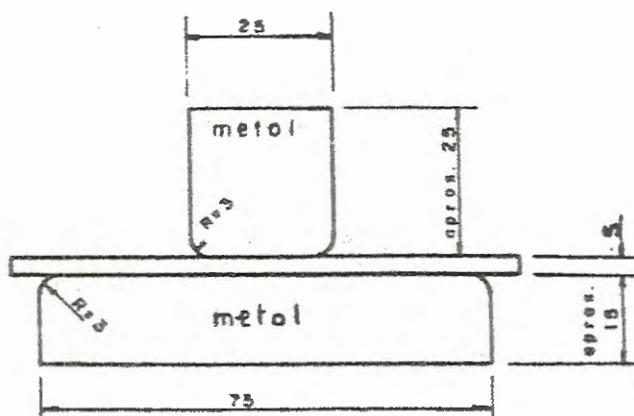


Figura 4 – Arranjo dos eletrodos para ensaios de chapas e folhas para um material não provido de cavidade ( $S \leq 3$  mm)

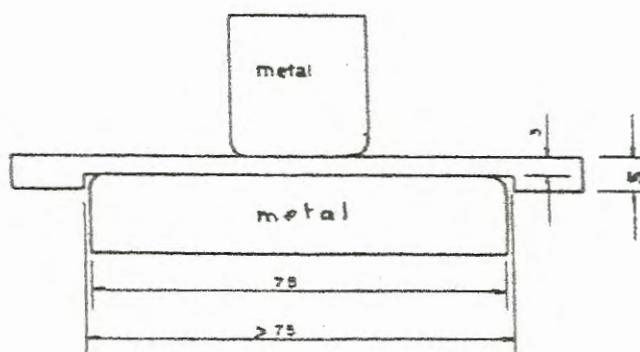


Figura 5 – Arranjo dos eletrodos para ensaios de chapas e folhas para um material de espessura superior a 3 mm, provido de cavidade para dar espessura efetiva de 3 mm.

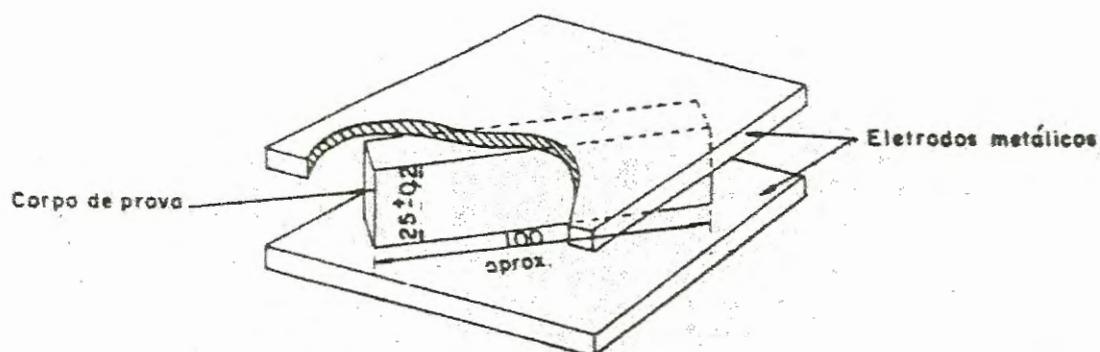
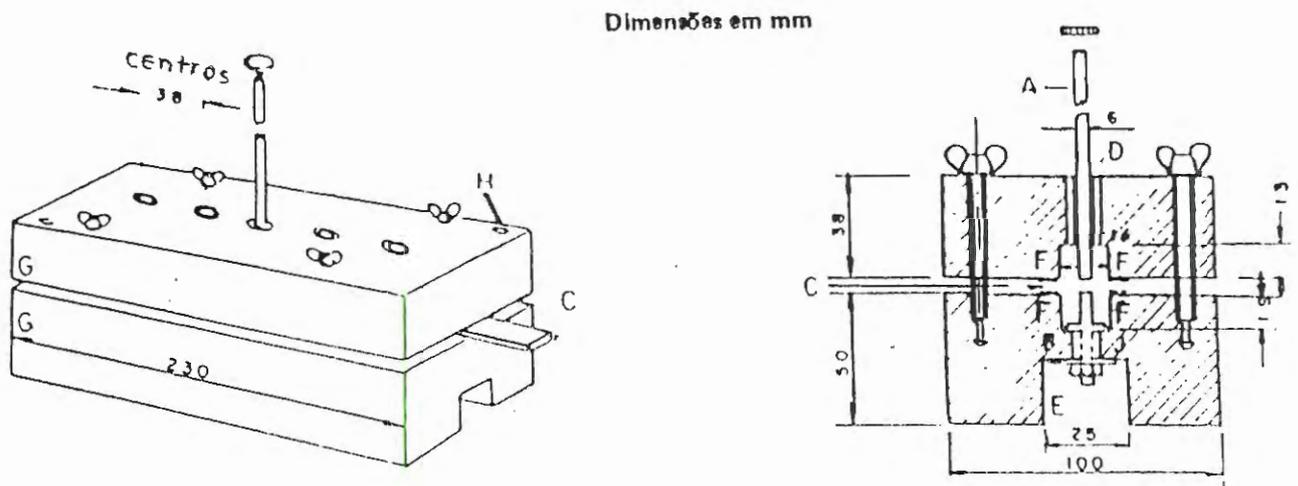


Figura 6 – Arranjo dos eletrodos para ensaio paralelamente à superfície do material e paralelamente às lâminas do material laminado.



a) Disposição geral do aparelho

b) Corte do aparelho passando pelos eletrodos (parte superior ligeiramente elevada)

- A = eletrodo superior ajustado na bucha D
- B = eletrodo inferior
- C = corpo de prova
- D = bucha de latão com diâmetro interno justo, suficiente para a passagem de uma haste de 6 mm
- E = fita de latão de 25 mm de largura, que liga todos os eletrodos inferiores
- F = fitas de tecido envernizado, cobrindo as bordas do corpo de prova
- G = blocos de material isolante apropriado, por exemplo papel laminado impregnado
- H = furo de pino
- J = bucha de latão com rosca inferior

Figura 7 - Exemplo típico de eletrodos para ensaio de fitas.

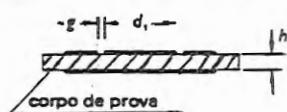
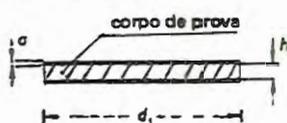
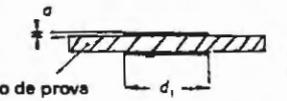
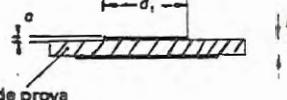
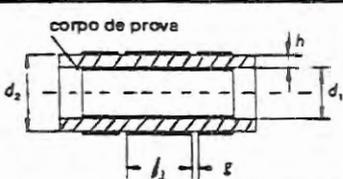
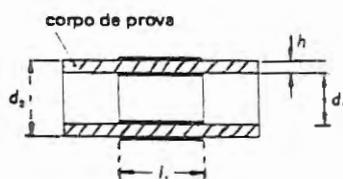
Tabela 1 - Classificação dos eletrodos quanto ao modo de aplicação e quanto ao contato com os corpos de prova.

Quanto ao modo de aplicação		Quanto ao contato com o corpo de prova	
		Com contato total	Sem contato total
Corpo de prova dotados de seus próprios eletrodos (8.1.1)		Corpos de prova contendo eletrodos que são partes construtivas dos mesmos	_____
Corpos de prova não dotados de seus próprios eletrodos (8.1.2)	Eletrodo aplicados ao corpo de prova (5.2.1)	Eletrodos com aderência total ao C.P. aplicados por ocasião dos ensaios (5.3)	_____
	Eletrodos não aplicados ao corpo de prova (5.2.2)	Eletrodos não aderentes ao corpo de prova, mas aplicados aos mesmos por ocasião dos ensaios, com contato total (por exemplo: placas de faces paralelas entre eletrodos paralelos) (aplicados à Tabela 5).	Eletrodos não aderentes ao corpo de prova, mas aplicados aos mesmos por ocasião dos ensaios sem contato total (por exemplo: placas de faces não paralelas entre eletrodos paralelos) aplicados à Tabela <sup>4</sup>

Tabela 2 - Tensões sucessivas a serem aplicadas (em kV eficazes).

0,50	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80	0,85	0,90	0,95	-	-	-	-	-
1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	-	-	-	-	-
2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6	4,8
5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	-	-	-	-	-
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	-	-	-	-	-
20	22	24	26	28	30	32	34	36	38	40	42	44	46	48
50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	-	-	-	-
110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	-	-	-	-	-

Tabela 3 – Cálculo da capacitância no vácuo e correção de borda.

	Capacitância intereletródica direta Capacitância em pF e dimensões em cm	Correções para a capacitância de borda Capacitância em pF e dimensões em cm
<b>1. Eletrodo em forma de disco com anel de blindagem.</b>		
	$C_o = \epsilon_o \cdot \frac{A}{h} = 0,08854 \frac{A}{h}$ <p>onde <math>A = \frac{\pi}{4} (d_1 + g)^2</math></p>	$C_b = 0$
<b>2. Eletrodos em forma de disco sem anel de blindagem</b>		
<p>a) Diâmetro dos eletrodos = diâmetro do corpo de prova</p> 	$C_o = \epsilon_o \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d_1^2}{h}$ $= 0,06954 \frac{d_1^2}{h}$	<p>Quando <math>a \ll h</math></p> $\frac{C_b}{P} = 0,029 - 0,058 \log h$ $P = \pi d_1$
<p>b) Eletrodos iguais mas menores que o corpo de prova</p> 		$\frac{C_b}{P} = 0,019 \epsilon_1 - 0,058 \log h + 0,010$ $P = \pi d_1$ <p>Onde: <math>\epsilon_1</math> é um valor aproximado da permissividade relativa do corpo de prova e <math>a \ll h</math></p>
<p>c) Eletrodos desiguais</p> 		$\frac{C_b}{P} = 0,041 \epsilon_1 - 0,077 \log h + 0,045$ $P = \pi d_1$ <p>Onde: <math>\epsilon_1</math> é um valor aproximado da permissividade relativa do corpo de prova e <math>a \ll h</math></p>
<b>3. Eletrodos cilíndricos com anel de blindagem</b>		
	$C_o = \epsilon_o \cdot \frac{2\pi (l_1 + g)}{\ln d_2/d_1}$ $= 0,2416 \frac{(l_1 + g)}{\log d_2/d_1}$	$C_b = 0$
<b>4. Eletrodos cilíndricos sem anel de blindagem</b>		
	$C_o = \epsilon_o \cdot \frac{2\pi l_1}{\ln d_2/d_1}$ $= 0,2416 \frac{l_1}{\log d_2/d_1}$	<p>Se <math>\frac{h}{h + d_1} &lt; \frac{1}{10}</math>,</p> $\frac{C_b}{2P} = 0,019 \epsilon_1 - 0,058 \log h + 0,010$ $P = \pi (d_1 + h)$ <p>Onde: <math>\epsilon_1</math> é um valor aproximado da permissividade relativa do corpo de prova</p>

Nota: Permissividade relativa do corpo de prova:  $\epsilon_r = \frac{C'_x - C_b}{C_o}$

onde:  $C'_x$  é a capacitância medida entre os eletrodos

Tabela 4 – Cálculo da permissividade relativa e do fator de dissipação – Eletrodos não aplicados aos corpos de prova (A).

Permissividade relativa	Fator de dissipação	Definição dos símbolos
1. Eletrodos micrométricos em ar		
$\epsilon_r = \frac{1}{1 - \frac{\Delta C}{C_1} \cdot \frac{h_0}{h}}$ <p>ou, se <math>h_0</math> for ajustado para um novo valor <math>h'_0</math> tal que <math>\Delta C = 0</math>,</p> $\epsilon_r = \frac{h}{h \cdot (h_0 - h'_0)}$	$\text{tg } \delta_x = \text{tg } \delta_c + M \cdot \epsilon_r \cdot \Delta \text{tg } \delta$	$\Delta C$ = variação de capacitância quando o corpo de prova é inserido (+ quando a capacitância aumenta) $C_1$ = capacitância com o corpo de prova colocado $C_f$ = $\epsilon_f \cdot C_0$ = capacitância somente com fluido $C_0$ = capacitância do vácuo para a área considerada (= $\epsilon_0 \cdot A/h_0$ ) $A$ = área de uma face do corpo de prova em $\text{cm}^2$ (ou área dos eletrodos quando o corpo de prova tem exatamente o mesmo tamanho ou é maior que os eletrodos) $\epsilon_f$ = permissividade relativa do fluido na temperatura de ensaio (= 1,00 para o ar) $\epsilon_0$ = constante elétrica dada em $\text{pF/cm}$ $\Delta \text{tg } \delta$ = aumento no fator de dissipação quando o corpo de prova é inserido $\text{tg } \delta_c$ = fator de dissipação com o corpo de prova colocado $\text{tg } \delta_x$ = fator de dissipação, calculado, do corpo de prova $d_0$ = diâmetro externo do eletrodo interno $d_1$ = diâmetro interno do corpo de prova $d_2$ = diâmetro externo do corpo de prova $d_3$ = diâmetro interno do eletrodo externo $h_0$ = espaçamento entre placas paralelas $h$ = espessura média do corpo de prova $M$ = $h_0/h - 1$ $\log$ = logaritmo na base 10
2. Eletrodos planos - deslocamento de fluídos		
$\epsilon_r = \frac{\epsilon_f}{1 + \text{tg}^2 \delta_x}$ $\left\{ \frac{(C_f + \Delta C) (1 + \text{tg}^2 \delta_c)}{C_f + M [C_f - (C_f + \Delta C) (1 + \text{tg}^2 \delta_c)]} \right\}$	$\text{tg } \delta_x = \text{tg } \delta_c + M \cdot \Delta \text{tg } \delta$ $\left\{ \frac{(C_f + \Delta C) (1 + \text{tg}^2 \delta_c)}{C_f + M [C_f - (C_f + \Delta C) (1 + \text{tg}^2 \delta_c)]} \right\}_f$	Quando o fator de dissipação do corpo de prova é menor que 0,1 devem ser usadas as seguintes equações: $\epsilon_r = \frac{\epsilon_f}{1 - \frac{\Delta C}{\epsilon_f \cdot C_0 + \Delta C} \cdot \frac{h_0}{h}}$ $\text{tg } \delta_x = \text{tg } \delta_c + M \cdot \frac{\epsilon_r}{\epsilon_f} \cdot \Delta \text{tg } \delta$
3. Eletrodos cilíndricos - deslocamento de fluídos (para $\text{tg } \delta_x$ menor que 0,1)		
$\epsilon_r = \frac{\epsilon_f}{1 - \frac{\Delta C}{C_1} \cdot \frac{\log d_3/d_0}{\log d_2/d_1}}$	$\text{tg } \delta_x = \text{tg } \delta_c + \Delta \text{tg } \delta \cdot \frac{\epsilon_r}{\epsilon_f} \left[ \frac{\log d_3/d_0}{\log d_2/d_1} - 1 \right]$	$h_0$ = espaçamento entre placas paralelas $h$ = espessura média do corpo de prova $M$ = $h_0/h - 1$ $\log$ = logaritmo na base 10
4. Eletrodos planos - método de dois fluídos (para $\text{tg } \delta_x$ menor que 0,1)		
$\epsilon_r = \epsilon_{f1} + \frac{\Delta C_1 \cdot C_2 (\epsilon_{f2} - \epsilon_{f1})}{\Delta C_1 \cdot C_2 - \Delta C_2 \cdot C_1}$	$\text{tg } \delta_x = \text{tg } \delta_{c1} + \frac{\epsilon_r C_0 - C_1}{\Delta C_2} \cdot \Delta \text{tg } \delta_2$	Nota: Na equação para o método de dois fluídos os índices 1 e 2 referem-se respectivamente ao primeiro e segundo fluido.

(A) Para eletrodos não aplicados ao corpo de prova mas com contato total com o mesmo, ver tabela 5.

Tabela 5 – Cálculo da capacitância do corpo de prova – Eletrodos micrométricos com contato total entre eletrodo e corpo de prova.

Capacitância do corpo de prova	Observações	Definição dos símbolos
1. Substituição da capacitância do corpo de prova por um capacitor padrão em paralelo		$C_p$ = capacitância paralelo do corpo de prova
$C_p = \Delta C + C_{or}$	O diâmetro do corpo de prova é menor que o diâmetro do eletrodo micrométrico de pelo menos $2r$ . A espessura real $h$ e a área $A$ do corpo de prova devem ser usadas no cálculo da permissividade	$\Delta C$ = aumento na capacitância dos capacitores padrões para restabelecer o equilíbrio após a remoção do corpo de prova
2. Substituição da capacitância do corpo de prova através de redução do espaçamento dos eletrodos micrométricos após a remoção do corpo de prova		$C_r$ = capacitância de calibração dos eletrodos micrométricos com espaçamento $r$ .
$C_p = C_s - C_r + C_{or}$	O diâmetro do corpo de prova é menor que o diâmetro do eletrodo micrométrico de pelo menos $2r$ . A espessura real $h$ e a área $A$ do corpo de prova devem ser usadas no cálculo da permissividade.	$C_s$ = capacitância de calibração dos eletrodos micrométricos com espaçamento $s$ , restabelecendo o equilíbrio após a remoção do corpo de prova.
O cálculo duplo da capacitância em ar pode ser evitado somente com um pequeno erro (0,2% a 0,5% devido a dispersão na borda do eletrodo) quando o corpo de prova tem o mesmo diâmetro dos eletrodos, por		$C_{or}, C_{oh}$ = capacitância do ar para a área entre os eletrodos micrométricos, que estava ocupada pelo corpo de prova, respectivamente com espaçamento $r$ ou $h$ , calculados usando-se a equação "C <sub>o</sub> " apresentada no item 1 da Tabela 2.
3. Substituição da capacitância do corpo de prova por um capacitor padrão em paralelo		$r$ = espessura do corpo de prova e dos eletrodos aplicados.
$C_p = \Delta C + C_{oh}$	Diâmetro do corpo de prova igual ao diâmetro dos eletrodos micrométricos.  Os eletrodos aplicados ao corpo de prova são de espessura zero.	$h$ = espessura do corpo de prova. $\epsilon_r = \frac{C_p}{C_{oh}}$ = permissividade relativa.

## ANEXO B:

### Lista de Instrumentos Utilizados.

*1) Paquímetro digital:*

Mitutoyo Corporation, Made in Japan

Número do código: 500-321

Modelo: CD/6"

Número de série: 7270194

*2) Medidor de rigidez dielétrica:*

AC Dielectric Test Set

Hipotronics

Modelo: 100 BLT

Número de série: BLT - 1094, Tipo: CS14-1091

Escala: 0 - 25 - 50 - 100 kV (Tensão);

1 - 10 - 100 mA (Corrente).

*3) Medidor de resistência alta:*

High Resistance Meter

Hewlett Packard

Modelo 4329 A

Número de série: 2510J10028

Escala: 500 K $\Omega$  a 2x10<sup>16</sup>  $\Omega$  (precisão de 3%);

0,05 pA a 20  $\mu$  A (precisão 5%)

0 a 1000 V (tensão contínua)

**4) Equipamento fotomicrográfico**

Carl Zeiss-Jena, Made in Germany

Modelo: mf- AKS 24 x 36

Escala das lentes: 12,5 x / 0,25  $\infty$  / - A - GF Planachromat Phv  
25 x / 0,50  $\infty$  / 017 - A - GF Planachromat Phv  
40 x / 0,65  $\infty$  / 0,17 - A - GF Planachromat Phv

**5) Medidor de capacitância e fator de dissipação dielétrica:**

TETTEX AG INSTRUMENTS

Modelo: 2818, QB

Número de série: 136756

Tensão: 110 V<sub>AC</sub>, frequência de 60 Hz.

**6) Célula de eletrodos:**

Guard Ring Capacitor

TETTEX AG INSTRUMENTS

Modelo: 2914

Número de série: 135 \* 950

Tensão: 110 V<sub>AC</sub>, frequência de 50-60 Hz.

**7) Medidor de capacitância e fator de dissipação dielétrica:**

Precision LCR Meter

Yokogawa - Hewlett - Packard Ltd.

Modelo: 4284

Número de série: 04284-90000

Frequência: 20 Hz a 1 MHz.

## ANEXO C

### Propriedades elétricas de materiais diversos.

#### I INTRODUÇÃO.

Para efeito de análise das características elétricas de materiais diversos e das resinas em estudos, relacionamos abaixo algumas informações obtidas a partir de catálogos e livros citados como referência.

#### II Características elétricas.

##### II.1 Resina Epóxi (“ Resina-Adesivo Estrutural DP 105”).

A Resina - Adesivo estrutural DP 105 é uma resina epóxi bicomponente com uma proporção de mistura de 1:1 em volume

As características elétricas desta resina são:

Tabela A: Resina - Adesivo estrutural DP 105

Permissividade Dielétrica (1 kHz a 23 °C, ASTM D-150)	9,2
Fator de Dissipação (1 kHz a 23° C, ASTM D-150)	0,22
Rigidez Dielétrica (espessura de 30 mm, ASTM D-149)	465 V/mm
Resistividade Volumétrica (ASTM D- 257)	$1,5 \cdot 10^{10}$ ohm/cm

Referência: Fabricante 3M Scotch, edição de outubro de 1.994.

## II.2 Resinas Líquidas XP-401 e XP-402.

As Resinas XP-401 e XP-402 são compostos à base de poliuretanas. As características elétricas correspondentes são:

Tabela B: Resinas XP-401 e XP-402.

Propriedades	XP - 401	XP - 401
Resistividade Volumétrica (ASTM D-257)	$10^{13}$ ohm.cm	$10^{14}$ ohm.cm
Rigidez Dielétrica (ASTM D-149)	-----	20

Referência: Fabricante 3M do Brasil. Segundo o fabricante, estes valores são típicos, não devendo ser considerados como especificação dos produtos.

## II.3 Resina Dobeckan IF 1642/3.

A resina Dobeckan IF 1642/3 possui a base de hidroxiéster com cargas. As características elétricas desta resina são:

Tabela C: Resina Dobeckan IF 1642/3.

Resistividade Volumétrica (a 23 °C, DIN 16946)	$10^{15}$ ohm.cm
Rigidez Dielétrica	40 kV/mm

Referência: Fabricante Glasurit - Grupo BASF.

## II.4 Nylon Technyl PSA.

O Nylon Technyl PSA é do tipo usado em usinagem mecânica. As características elétricas deste tipo de nylon são:

Tabela D: Nylon Technyl PSA.

Resistividade Volumétrica (a 20 °C, ASTM D-257)	10 <sup>15</sup> ohm.cm
Rigidez Dielétrica (a 20 °C, NFC26-225)	24,5 kV/mm
Permissividade Dielétrica (a 1 kHz, ASTM D-150)	4,2
Fator de Dissipação (a 1 kHz, ASTM D-150)	0,021

Referência: Technyl PSA RHODIA S.A.

OBS.: Estas medidas foram feitas em corpo de prova de 1 mm de espessura.

### III ANÁLISE.

Como podemos observar, muitos produtos comerciais possuem poucas informações sobre suas características elétricas.

Na maioria das vezes, as informações são referentes às propriedades químicas, dificultando, portanto, análises de comparações entre as características elétricas dos materiais.

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1.978). *ASTM D149 - Standard Test Methods for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies*. Philadelphia.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1.978). *ASTM D150-78 - Standard Test Methods for A-C Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulation Materials*. Philadelphia.
- ARAUJO, L. C. R. (1.993). *Caracterização química, térmica e mecânica de poliuretanas elastoméricas baseadas em materiais oleoquímicos*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - IFQSC. Universidade de São Paulo.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1.983). *NBR 5403 - Determinação da Resistividade Volumétrica e Superficial*. Rio de Janeiro, ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1.983). *NBR 5405 - Determinação da Rigidez Dielétrica sob frequência industrial*. Rio de Janeiro, ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1.982). *NBR 5245 - Determinação da Permissividade e do Fator de Dissipação à frequência industrial de áudio e de rádio incluindo ondas métricas*. Rio de Janeiro, ABNT.
- BAYER, O. (1.947). *Angew Chem.*. A 259 - 275.

- BRITISH STANDARD (1.993). *BS 7663: Methods of test for determination of Permittivity and Dissipation Factor of electrical insulating material in sheet or tubular form.*
- Convênio CNPq/PADCT II, Processo 620.228/91-1 (1.991). *Programa de pesquisa e desenvolvimento de biomateriais de colágeno e poliuretanas.*
- DEUTSCHE NORMEN (1.970). *DIN 53483: Determination of Dielectric Properties Testing at Standard Frequencies of 50 Hz, 1 kHz, 1 MHz. Sheet 2. Berlin.*
- GLASURIT DO BRASIL - LTDA (1.990). *Catálogo: Resinas de Encapsulamento de Sistemas Eletroisolantes. Grupo BASF*
- NIKLIN, N. V. (1.977). *Manual del Electricista principiante sobre materiales y artículos electrotécnicos.* Trad. Por Eng. Josefina Muñoz Martínez. Espanha. Editorial Mir.
- PLEPIS, A. M. G.(1.992). *Caracterização térmica e viscoelástica de resinas poliuretanas derivadas de óleo de mamona.* São Carlos. Tese (Doutorado) - IFQSC, Universidade de São Paulo.
- Projeto da Secretaria da Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo. Convênio 729/88 (1.988). *Desenvolvimento de Adesivos poliuretanos para madeiras e metais.*
- Projeto FINEP de Desenvolvimento de Tecnologia Oleoquímica. Convênio 32.87.0738.00 (1.990). *Implantação de Infraestrutura do Laboratório Avançado de Tecnologia Química (LTO).*
- Projeto Indústria e Comércio, Grupo Prosdócimo (1.987). *Desenvolvimento de espumas poliuretanas isentas de CFC.*Laboratório de Química Analítica do IQSC-USP.
- Projeto TELEBRÁS/USP de Tecnologia de Resinas Poliuretanas. Convênio 002/84 (1.984). *Desenvolvimento de Bloqueio de Pressurização de Cabos Telefônicos.*  
Convênio 058/85: *Desenvolvimento de Resinas Geleadas e Mastíc Poliuretanas para Telecomunicações.*

PURCEL, E. M. (1.970). *Curso de Física de Berkeley- Eletricidade e Magnetismo*. Editora Edgard Blücher Ltda, vol. 2.

SAUNDERS, J. H. and FRISCH, K. C. (1.987). *Polyurethanes Chemistry and Technology*. Robert E. Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.

SBP consultants - SBP Chemical Engineering Series (1.980). *CASTOR OIL AND ITS DERIVATIVES*. Nº 62, India.

TAREEV, B. (1.979). *Physics of Dielectric Materials*. Mir Publishers Moscow.

WURTZ, A. (1.849). *Justus Liebigs Ann. Chem.* Vol. 71, p. 326.

**OBRAS CONSULTADAS.**

- ACHAR, J. A.; RODRIGUES, J. (1.996). *Introdução à Estatística para Ciências e Tecnologia*. São Carlos. Publicações USP - São Carlos.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1.994). *ASTM D374M - 94 - Standard Test Methods for Thickness of Solid Electrical Insulation (Metric)*. Philadelphia.
- BARTNIKAS, R. (1.971). *Dielectric losses in solid - liquid insulating systems - Part II*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI- 6, N<sup>o</sup> 1, p. 14.
- CLARK, F. M. (1.962). *Insulating Material for design and Engineering Practice*. New York, Editora John Wiley and Sons.
- DEKKER, A.J. (1.985). *Electrical Engineering Materials*. Prentice - Hall Electrical Engineering Series.
- EHRlich, A., SMITH, M. K., PATTON, T. C.(1.959). *Castor Polyols for Urethane Foams*. The Journal of the American Oil Chemist's Society, 39, 149.
- GOFFAUX, R. (1.978). *On the nature of dielectric loss in high voltage insulation*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-13, N<sup>o</sup> 1, p. 1-8.
- IGNÁCIO, H. (1.995). *Utilização do Cimento Derivado do Polímero da Mamona no Preenchimento de Falha Óssea. Estudo Experimental em Coelhos*. Ribeirão Preto. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo.

- IGNÁCIO, H., MAZZER, N., BARBIERI, C.H. , CHIERICE, G.O.(1.996). *Estudo sobre a Aplicabilidade Médica da Poliuretana Derivada da Mamona*. Resenha Ortopédica, Órgão Oficial da Área de Ortopedia e Traumatologia da Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Nº 6.
- JAIN, G. C. (1.967). *Proprieties of Electrical Engenheering Materials*. New York. Harper International Edition.
- KELEN, A. (1.977). *Ageing of insulating materials and equipament insulation in service and in tests*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-12, Nº 1, p. 55.
- KHARMANDAYAN, P.(1.997). *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 Coelho*s. São Paulo. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Paulo - Escola Paulista de Medicina.
- KORITSKY, YU (1.970). *Electrical Engineering Materials*. Trad. Por Jacob Feinberg. Moscow. Mir Publishers.
- KUFFEL, E. (1.984). *High Voltage Engineering*. Great Britain. Printed by Wheaton & Co. LTD, Exeter.
- KURIYAMA, I.; HAYAKAWA, N; NAKASE, Y.; OGURA, J.; YAGYU, H.; KASAI, K. (1.979). *Effect of dose rate on degradation behavior of insulating polymer materials*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-14, Nº 5, p. 272.
- LAMB, M.A. (1.967). *Electrical Conduction Mechanisms in Thin Insulating Films*. London. General Editor: B.L. Worsnop, B.Sc, PH.D Methuem and Co LTD.
- LEDA, M.; NAGAO, M.; HIKITA, M. (1.994). *High - field conduction and breakdown in Insulating Polymers*. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 1, Nº 5, october.

- LIWSCHITZ, M., GLOCKNER, H. Le (1.962). *Macchine Elettriche. In: \_\_. Parte Prima: L' Isolamento delle Macchine Elettriche.* Milano, Editore Ulrico Hoepli Milano, p.1-76.
- MAMMAOTTY, K.P.; RAMU, T.S. (1.981) *Analysis of Dielectric behavior of castor oil impregnated all paper capacitors.* IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-16, N<sup>o</sup> 5, pp 417-422, October.
- MATTOSO, L.H.C. (1.993). *Síntese, caracterização e processamento de Polianilina e seus derivados. São Carlos. Tese (Doutorado) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia - Universidade Federal de São Carlos.*
- MCMAHON, E.J.; PUNDERSON, J.O. (1.973). *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, N<sup>o</sup> 3, p. 92.
- MONTANARI, G.C.; RAGHUVeer, R. (1.986). *Thermal endurance evaluation of insulating materials: a theoretical and experimental analyses.* IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-21, N<sup>o</sup> 1, p. 69-77.
- OERTEL, G. (1.985). *Polyurethane Handbook.* Hanser. Publisher, Munich, Viena, New York.
- OHARA, G. H., KOJIMA, K.E., ROSSI, J.C et al. (1.995). *Estudo Experimental da Biocompatibilidade do Polímero Poliuretano da Mamona Implantada em Coelhos*". Acta Ortopédica Brasileira. 3 - 2.
- SEANOR, D. A. (1.982). *Electrical Properties of Polymers.* Academic Press, Inc..
- SIEROTA, A.; CALDERWOOD, J.N. (1.988). *Degradation and Breakdown of Solid Dielectric Materials Resulting from Surface Discharges in Air and in Insulating liquids.* IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol 23, N<sup>o</sup> 6, p.993-998

- SIMONI, L. (1.981). *A general approach to the endurance of electrical insulation under temperatura and voltage*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-16, N<sup>o</sup> 4, p.277.
- TANAKA, T.; NAITO, K.; KITAGAWA, J. (1.978). *A basic on outdoor insulators of organic materials*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-13, N<sup>o</sup> 3, p. 184.
- THOMA, P. (1.980). *Dielectric aspects of Prebreakdown phenomena in insulators*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-15, N<sup>o</sup> 1, p. 8.
- TORIYAMA, Y.; OKAMOTO, H.; KANAZASHI, M. (1.971). *Breakdown of insulating materials by surface discharge*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-6, N<sup>o</sup> 3, p. 124.
- UMEMURA, T.; AKIYAMA, K.; KASHIWAZAKI, T (1.982). *Dielectric Behavior of Solid / Liquid Insulation System*. IEEE Transactions on Electrical Insulation, vol. EI-17, N<sup>o</sup> 3, p.276.
- WYATT, ° H.; HUGLES, D. D. (1.974). *Metals, Ceramics and Polymers. Introduction to the structure and properties of engineering materials*. Cambridge University Press.
- WOODS, G. (1.987). *The ICI Polyurethane Book*. John Wiley & Sons and ICI Polyurethanes.
- ZANIN, M. (1.992). *Propriedades elétricas do elastômero EPDM para aplicação em isolação elétrica*. São Carlos. Tese (Doutorado) - Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia - Universidade Federal de São Carlos.
- ZHANG, L.; DING, H. (1.997). *Study on the properties, morfology and applications of castor oil polyurethane-poly (mthyl methacrylate) IPNs*. Journal of Applied Polymer Science, vol. 64, N<sup>o</sup> 7 - May 16, pg 1393-1401. IPNs = Interpenetrating polymer Networks.