

RUPTURA ELÉTRICA EM RESINA EPOXY

EDSON GUEDES DA COSTA

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DO CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

ORIENTADOR: S. R. NAIDU

- CAMPINA GRANDE -

ESTADO DA PARAIBA - BRASIL

JULHO - 1981



C837r Costa, Edson Guedes da.
Ruptura elétrica em resina epoxy / Edson Guedes da
Costa. - Campina Grande, 1981.
76 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -
Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e
Tecnologia, 1981.
"Orientação: Prof. S. R. Naidu".
Referências.

1. Materiais Isolantes Sólidos. 2. Resina Epoxy -
Ruptura. 3. Engenharia Elétrica - Dissertação. I. Naidu, S.
R. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande
(PB). III. Título

CDU 621.315.611(043)

AO MEU SAUDOSO E INESQUECÍVEL PAI (IN MEMORIAM).
A MINHA QUERIDA MÃE, PELA SUA DEDICAÇÃO EXTRE
MOSA.

A MINHA ESPOSA, PELO SEU ESTÍMULO INTENSIVO.
A MINHA FILHA, PEQUENO SER QUE NA SUA INOCÊN-
CIA ENCONTREI FORÇAS PARA TAL ÊXITO.

FINALMENTE, A TODOS OS MEUS IRMÃOS.

A G R A D E C I M E N T O S

QUERO EXPRESSAR OS MEUS AGRADECIMENTOS A TODOS QUE, DIRETA OU INDIRETAMENTE, CONTRIBUÍRAM PARA A EFETIVAÇÃO DESSE TRABALHO.

ESPECIALMENTE AO PROF. S. R. NAIDU, ORIENTADOR DESSE; E, A TODOS OS PROFESSORES E FUNCIONÁRIOS DO LABORATÓRIO DE ALTA TENSÃO DESSE CENTRO.

AO CIDA, PELA DOAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NESSE EXPERIMENTO.

AO CNPq, PELO FINANCIAMENTO DO PROJETO Nº 222.0162/75, QUE ME PERMITIU A REALIZAÇÃO DESSE TRABALHO.

RESUMO

Ramificação elétrica é o processo de ruptura elétrica que ocorre em isolantes sólidos. As ramificações podem crescer sob o efeito de descargas parciais no material isolante. No estudo da ruptura elétrica em resina epoxy foi usada a configuração pino-plano. A tensão aplicada em cada amostra foi entre 30 e 40 KV eficazes. O raio de curvatura do eletrodo (pino) era aproximadamente de 50 μ m. O tempo para ruptura variou entre 3 e 600 minutos. Nessas condições, confirmou-se o campo elétrico crítico. O campo elétrico crítico é de 3×10^8 V/m.

ABSTRACT

The electrical breakdown of epoxy resin castings in divergent electric fields has been studied. A pin-plane electrode geometry has been used with the radius of curvature of the pin extremity being approximately 50 μ m. Measured breakdown voltages have been in the 30 - 40 KV r.m.s. range, and times to breakdown between 3 to 600 minutes. The critical electric field for breakdown has been calculated to be 3×10^8 V/m.

Í N D I C E

	INTRODUÇÃO.....	01
	CAPÍTULO I - RUPTURA ELÉTRICA DE RESINA EPOXY - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	03
1.1.	- PROPRIEDADES GERAIS DA RESINA EPOXY.....	03
	1.1.1. - Natureza Química da Resina Epoxy.....	03
	1.1.2. - Propriedades Físicas.....	04
	1.1.3. - Propriedades Elétricas.....	05
	1.1.4. - Aplicações da Resina Epoxy.....	06
1.2.	- MECANISMO DA DETERIORAÇÃO ELÉTRICA.....	07
	1.2.1. - Formação e Crescimento de Cavidades.....	07
1.3.	- EFEITOS DO ESFORÇO MECÂNICO NA INICIAÇÃO DE RAMOS.....	10
1.4.	- MEDIÇÃO ÓPTICA E PROCESSO DE GERAÇÃO DA ÁREA DESCOLORIDA.....	11
1.5.	- ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DAS RAMIFICAÇÕES ELÉTRICAS USANDO MÉTODOS ELÉTRICOS E ÓPTICOS.....	14
	CAPÍTULO II - PROCESSOS DE RUPTURA EM RESINA EPOXY.....	23
2.1.	- Tipos de Ramificação.....	23
2.2.	- Ramificações Eletroquímicas ou Aquosas.....	24

2.3.	- Ramificações Elétricas.....	26
2.3.1.	- Formação e Crescimento de Cavidades.....	27
2.3.2.	- Iniciação dos Ramos Elétricos.....	30
2.3.3.	- Propagação de Ramos Elétricos.....	32
2.3.4.	- Processo de Indução e de Ramificação.....	33
	CAPÍTULO III - ARRANJO EXPERIMENTAL.....	41
3.1.	- PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS COM ARALDITE B(RE- SINA BISFENOL).....	41
3.1.1.	- Comportamento da Resina.....	42
3.1.2.	- A Fusão e a Fundição.....	42
3.1.3.	- Cura e Reozimento.....	43
3.1.4.	- Os Moldes.....	43
3.1.5.	- Pinos.....	44
3.1.6.	- Eletrodos.....	44
3.2.	- ARRANJO EXPERIMENTAL.....	45
3.3.	- CALIBRAÇÃO DO INSTRUMENTO NO CIRCUITO DE ENSAIO COMPLETO.....	46
3.4.	- REDUÇÃO DAS PERTURBAÇÕES.....	47
3.5.	- PRINCÍPIOS BÁSICOS USADOS PARA DETECÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS.....	48
	CAPÍTULO IV -RUPTURA ELÉTRICA DE RESINA EPOXY - UM ESTUDO EXPERIMENTAL.....	59
4.1.	- PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS.....	59

4.2.	-	RESULTADOS.....	62
4.3.	-	DISCUSSÃO.....	63
4.4.	-	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS....	66
		REFERÊNCIAS.....	73

INTRODUÇÃO

As resinas epoxy são plásticos termofixos obtidos pela polimerização de uma resina epoxy base com um agente endurecedor. O uso da resina epoxy em equipamentos elétricos teve início há quase 40 anos atrás.

A resina epoxy é um dos mais satisfatórios polímeros em uso na isolação elétrica dos equipamentos de potência. Suas mais importantes propriedades são: ser isentas de produtos voláteis durante o processo de cura, pequena contração na polimerização, boa adesão aos metais, alta rigidez mecânica. A aplicação das resinas epoxy têm-se expandido gradativamente com o estudo da tecnologia e o aperfeiçoamento das suas propriedades elétricas e mecânicas.

A alta rigidez à ruptura é a mais importante característica explorada nos projetos de sistema usando o epoxy como isolante. Entretanto, o seu valor é bastante difícil de prever considerando que a rigidez dielétrica do material é função de um número muito grande de condições experimentais mal definidas, sendo as mais importantes o tempo de aplicação do esforço elétrico e a diferença nas propriedades da resina epoxy de amostra para amostra.

No estudo da ruptura elétrica da resina epoxy foi usada a configuração pino-plano. A tensão aplicada em cada amostra ficou entre 30 e 40KV eficazes. Os resultados experimentais obtidos com a configuração pino-plano ainda são bastante escassos. O estudo da ruptura elétrica em resina epoxy vem sendo in-

tensificado nos últimos anos e, existem poucas medições sobre essa ruptura.

O objetivo desse trabalho é medir o campo elétrico crítico da ruptura, com a configuração pino-plano (ponta-plano) em resina epoxy usando tensões alternadas de 60Hz. Entretanto, várias observações foram feitas quando dos ensaios. Os ensaios sempre foram acompanhados de observações visuais, e medições dos níveis de descargas parciais.

1.

RUPTURA ELÉTRICA DE RESINA EPOXY -
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

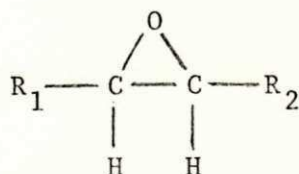
As resinas epoxy são bastante conhecidas por terem excelentes propriedades elétricas e mecânicas quando comparadas com alguns outros materiais isolantes. As resinas epoxy têm sido usadas como isolantes em chaveadores, cabos, buchas, transformadores e vários disjuntores. As resinas epoxy já são usadas para isolação de tensão tão alta quanto 500 ou 600 KV. e em futuro próximo, as resinas epoxy moldadas poderão ser utilizadas em equipamentos e sistemas de ultra alta tensão.

Neste capítulo serão relatadas brevemente as propriedades da resina epoxy, sua natureza química, como também, mostraremos sucintamente o mecanismo da deterioração elétrica, a análise da propagação das ramificações elétricas usando métodos elétricos e ópticos, bem como, a medição óptica e o processo de geração de área descolorida, em resumo, é feita uma revisão bibliográfica do comportamento da resina epoxy.

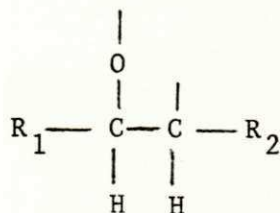
1.1. PROPRIEDADES GERAIS DA RESINA EPOXY

1.1.1. NATUREZA QUÍMICA DA RESINA EPOXY

As resinas epoxy têm uma característica química comum, o grupo funcional epoxy constituído de átomos de carbono-oxigênio-carbono na molécula não polimerizada.



Este anel pode ser aberto por uma reação química, possibilitando a ligação de duas moléculas adjuntas.



Esta reação é catalizada por vários compostos orgânicos de natureza ácida ou básica (chamados endurecedores). Os endurecedores geralmente se combinam com as duas ligações químicas livres produzidas pela abertura do anel. Às vezes, é adicionado um composto acelerador usualmente em uma proporção muito pequena a fim de acelerar a reação. R_1 e R_2 são radicais, constituídos por hidrocarbonetos com diferentes composições químicas.

1.1.2. PROPRIEDADES FÍSICAS

Algumas propriedades das resinas epoxy são dadas na Tabela I(1). Com o adicionamento de impurezas as propriedades físicas poderão variar. Agora a densidade da resina dependerá da densidade da impureza e da percentagem incorporada. O coeficiente de dilatação térmica é reduzido pela impureza possibilitando igualar ao coeficiente do cobre, alumínio ou aço, para várias faixas de temperaturas. A equiparação do coeficiente de dilatação térmica aos dos condutores internos embebidos, pode ser muito importante nas aplicações elétricas para evitar força de quebra ou separa-

ção entre a resina e o metal, a qual poderia levar a descargas parciais. As resinas epoxy podem ser reforçadas com impurezas fibrosas, tais como vidro, para suportar uma tensão mecânica muito alta. As resinas epoxy geralmente têm boa resistência a solventes químicos e água, à exceção das resinas flexibilizadas, as quais podem ser usadas como isolante de cabos ou fios. Estas resinas se apresentam com bastante flexibilidade na temperatura ambiente.

1.1.3. PROPRIEDADES ELÉTRICAS

A constante dielétrica e a tangente de perdas das resinas epoxy variam largamente. As resinas curadas com amino-alifáticos têm maior tangente de perdas, constante dielétrica e condutividade do que as resinas curadas com amino-aromáticos. As melhores propriedades dielétricas são obtidas nas resinas curadas com anidridos aromáticos. À 60HZ, a variação da tangente de perda dielétrica com a temperatura é mostrada na Fig. 1.1. Consiste, geralmente de um pico de baixa temperatura seguido por um plano ou uma secção ligeiramente crescente. Nas temperaturas altas há um amolecimento da resina. O pico na temperatura baixa, o qual não é sempre observado em todas as resinas, é atribuído aos pequenos grupos polares na molécula sólida tridimensional. Eles podem, às vezes, rodar ou oscilar como uma carga independentemente da estrutura total.

1.1.4.

APLICAÇÕES DA RESINA EPOXY

A aplicação das resinas epoxy têm-se expandido gradativamente com o estudo da tecnologia a fim de aperfeiçoar as propriedades elétricas e mecânicas, processando técnicas desenvolvidas.

As resinas epoxy têm propriedades químicas e resistência a água superiores as resinas poliéster. A impregnação a vácuo de pequenos poros é mais difícil, entretanto, quando a viscosidade é alta. É estimado que a maioria dos grandes geradores de tensão e motores em todo mundo são agora impregnados com alguma forma de resina epoxy. A impregnação de máquinas rotativas com epoxy líquido polimerizado seguido pela cura "in situs" é uma das aplicações importantes.

Um recente avanço é a aplicação da resina epoxy sólida não curada como um pó. Este é subseqüentemente misturada e curada em películas grossas que são usadas em barramentos e outras coberturas de condutores pontiagudos. As resinas epoxy usadas à intempérie eram sujeitas a quebra ou marcas. Mas após longos estudos de laboratórios e testes em serviço, a melhor resina epoxy tem mostrado uma boa performance em aplicação ao meio ambiente.

1.2. MECANISMO DA DETERIORAÇÃO ELÉTRICA

1.2.1. FORMAÇÃO E CRESCIMENTO DE CAVIDADES

O mecanismo da deterioração dielétrica devido a descargas internas tem sido objetivo de várias pesquisas. A localização e o número de descargas em cavidades de dimensões diferentes são estudadas com auxílio de eletrofotografias por Mason(2 e 3).

Olyphant tem relatado os seus resultados experimentais em ruptura por ramificações em resina epoxy(4). A espécie de deterioração generalizada da ponta de agulha tem sido conhecida como ruptura por ramificações. Este fenômeno vem sendo estudado em polietileno, acrílico e resinas epoxy por quase três décadas e os vários mecanismos de iniciação de ramos têm sido sugeridos(5) como segue:

- a) Descargas parciais em pequenas cavidades localizadas em áreas de grande concentração de campo elétrico.
- b) Elétrons de grande energia por emissão de campo elétrico no local de maior concentração do campo elétrico.
- c) Quebrar por fadiga mecânica causada pelos ciclos de forças compressivas de Maxwell.
- d) Ruptura por avalanche de elétrons.

Dakin et al(6) observaram dois períodos de tempo bem distintos para a deterioração: O primeiro, onde o nível de descargas parciais é baixo e relativamente estável, é a iniciação da formação de ramos, o segundo período no qual o nível das descargas parciais crescem no tempo é a propagação dos ramos, conforme figura 1.4.0 ataque de muitas descargas grandes corresponde ao

tempo no qual a formação de um canal ou ramo é iniciado. O tempo de iniciação decresce com o aumento do campo elétrico. Os seus resultados indicam que o tempo de propagação não depende do campo desenvolvido pela agulha, ou do valor original do nível da descarga parcial. Isto é provável segundo Dakin devido ao fato, de que uma descarga no canal, determina o campo na sua extremidade. Laurent e Mayoux concordam com esta hipótese(7), afirmando que o tempo de propagação depende do tipo de ramificação e não da tensão aplicada ou eletrodo usado.

No estudo da formação de cavidades e da ruptura elétrica em resina epoxy Shibuya e outros(8), usaram a configuração ponta plano com raios de curvatura dos eletrodos de tungstênio e aço variando entre $0,2\mu\text{m}$ e $40\mu\text{m}$, porém o de tungstênio forneceu melhor resultado. No seu estudo ele mostra que cavidades podem ser formadas na interface eletrodo-dielétrico, livre de cavidades sem a necessidade de descargas parciais ocorrerem com um mecanismo de formação da cavidade, como mostrado anteriormente.

Tensão aplicada e raio de curvatura da ponta do pino são os mais decisivos fatores que afetam a formação da cavidade. Baseados nos resultados experimentais, o processo de deterioração e ruptura nas resinas epoxy são sumarizados nas figs. 1.2 e 1.3(8). O fenômeno pode ser obviamente separado no seguinte:

- 1) Não deterioração. O resultado experimental sugere que um campo elétrico de 3×10^8 V/m na ponta do pino é o campo elétrico crítico. A deterioração não aparece nas amostras livres de cavidades se o campo elétrico máximo aplicado é menor do que o campo crítico. Cavidades, se já estão presentes na amostra só são ino-

civas se:

$$E_{\text{máx.}} \delta = 300 \text{ volts}$$

sendo $E_{\text{máx}}$ = Valor pico do campo elétrico máximo

δ = tamanho de cavidade

2) A ramificação direta e a ruptura em menos de 10 segundos de tensão aplicada (Processo A, da fig.3). Ruptura intrínseca é o mecanismo possível.

3) Formação de cavidades seguidas por ramificação.

Quando o campo elétrico máximo aplicado é maior do que 3×10^8 V/m sendo este aplicado por um tempo t horas. Um certo período de tempo é necessário para a formação de cavidade. Na figura 2.5, o máximo campo aparente e o tempo de formação foram plotados, então foi possível observar a seguinte relação experimental:

$$(E_{\text{máx}})^4 t = 8 \times 10^{37} \cdot \{ V^4 m^{-4} h \}$$

há uma gradual degradação do dielétrico devido ao bombardeamento por elétrons de grande energia. Este bombardeamento leva à formação de uma cavidade, o surgimento da ramificação; o crescimento das cavidades é provavelmente devido a um ou uma combinação dos seguintes mecanismos de deterioração:

- a) Descarga parcial na cavidade
- b) Avalanche de elétrons dentro da cavidade
- c) Bombardeamento por elétrons acelerados na cavidade

A ruptura parcial em ramos, segundo Olyphant(4), é geralmente assumida como uma extensão condutora do eletrodo. Entretanto, investigações têm mostrado que nos primeiros estágios, os ramos em acrílico e resina epoxy são finos tubos não condutores.

Nos ramos parciais dentro do material com a resistência variando de baixa a excelente, é encontrado que, a magnitude dos pulsos de descargas devem ser menor do que 1pC. Mas, somente quando os ramos já estão em estágio avançado ou uma grande cavidade é encontrada ao redor da ponta do eletrodo, agora sim, descargas esporádicas entre 1 e 100pC podem ser observadas.

1.3. EFEITOS DO ESFORÇO MECÂNICO NA INICIAÇÃO
DE RAMOS

No seu trabalho, Nakanishi(5) e outros observam o fenômeno da preruptura em resinas epoxy sem impurezas. Usaram uma configuração de eletrodos ponta-plano e também um fotomultiplicador de alto ganho, para investigar os possíveis mecanismos de iniciação de ramos. O efeito do esforço mecânico foi investigado por amostras preparadas com várias composições químicas e processos de moldagem e resfriamento. Um cuidadoso controle de contração foi necessário para produzir moldes sem quebras ou outras faltas.

Eles realizaram inspeção microscópica das amostras, e observaram que aquelas com tensão de iniciação de ramos superior a 25 KV, apresentavam pequenas áreas descoloridas ao redor do pino de agulha, entretanto tal fenômeno não acontecia com outras amostras, estas apresentavam tensão de iniciação de ramos menor do que 15 KV. Estas áreas descoloridas consistem de finas listras circundando a ponta da agulha e o seu diâmetro aumenta com a tensão aplicada.

Os seus resultados confirmam que o esforço mecânico influ

encia a iniciação de ramos, e defende o mecanismo que um grande esforço mecânico produz micro-quebras. As micro-quebras são provavelmente cheias com ar, na pressão atmosférica. É muito mais provável que as descargas parciais ocorrerão nas micro-quebras sob um alto campo elétrico do que no volume de epoxy. Ramos iniciam facilmente das micro-quebras nas quais descargas ocorrem repetidamente. O mecanismo de iniciação de ramos em baixa tensão pode ser explicado pela existência de micro-quebras perto do pino da agulha.

1.4. MEDIÇÃO ÓPTICA E PROCESSO DE GERAÇÃO
DA ÁREA DESCOLORIDA

Em amostras de baixo esforço mecânico, uma pequena área descolorida foi sempre observada no pino da agulha. Uma medição óptica foi realizada para investigar o processo de geração destas áreas descoloridas. Recentemente, uma medição precisa de corrente tem revelado que o rápido aumento na intensidade de luz corresponde a um aumento da corrente emitida da ponta da agulha. Os resultados de Nakanishi revelam que a emissão de luz ocorre durante o carregamento e descarregamento do dielétrico, e uma pequena porção da emissão foi observada no pico da onda em tensão alternada. Mas, a luz foi detetada em tensões maiores do que 10 KV para o araldite CT200. Na amostra, usando eletrodos de agulha com raio de curvatura em torno de 30 μ m, não foi detetado luz até que a tensão superasse a 30 KV. Esse resultado indica que a emissão de luz ocorreu nas vizinhanças do pino da agulha.

É largamente aceito que o espectro da luminescência no volume dos sólidos dielétricos são diferentes daqueles devido as descargas parciais em dielétricos gasosos. Pela medição do espectro de emissão da luminescência, pode ser revelado se a luz é emitida do volume de epoxy ou da interface entre o eletrodo e o epoxy. O espectro de emissão da cavidade artificial assemelha-se ao espectro de emissão da descarga no ar. O espectro de emissão da luz emitida da amostra sem cavidades difere daquele da amostra com cavidade artificial. Se a micro-descarga ocorresse na interface, o espectro de emissão teria duplicado o espectro de emissão das descargas na cavidade artificial. Mas é revelado que a luz emitida da ponta da agulha de uma amostra sem cavidades e não é devido a micro-descargas na interface como sugerido por Dakin e outros.

Os resultados experimentais de Nakanishi indicam que a eletroluminescência ocorre sob o alto campo elétrico no volume do epoxy. Supõe-se que os portadores de cargas livres os quais contribuem para a eletroluminescência são originados da emissão de campo ou da ionização por impacto. Se agulha é positiva, elétrons podem ser extraídos dos "traps" no volume. Sendo a agulha negativa, elétrons serão injetados facilmente do eletrodo sob ação do campo elétrico no qual efeitos de eletroluminescência podem ocorrer. Estes elétrons injetados serão capturados nos "traps" através de transições ópticas e térmicas. Os elétrons capturados construirão uma camada de carga espacial e reduzem o campo elétrico em torno da ponta da agulha. Sendo a injeção de elétrons reprimida por uma camada de carga espacial negativa,

uma pequena quantidade de emissão de luz seria observada no pico da onda de tensão alternada como mencionado anteriormente.

Quando a tensão da agulha se aproxima de zero, a direção do campo elétrico variará com a existência de cargas espaciais negativas. Entretanto, quando a tensão torna-se positiva, o campo elétrico será aumentado pela existência de cargas espaciais negativas, e então aqueles elétrons capturados nos "traps" serão extraídos. Alguns elétrons extraídos dos "traps" contribuirão para a eletroluminescência no volume do epoxy. Após a extração dos elétrons, cargas positivas serão deixadas ao redor da ponta da agulha, as quais formarão uma camada de cargas espaciais positivas. O fenômeno mencionado acima será repetido em cada ciclo durante a aplicação da tensão, e foi explicado por Nakanishi.

A pequena área descolorida deve ser produzida pelo efeito dos elétrons de grande energia, os quais contribuem para eletroluminescência. Elétrons acelerados sob altos campos elétricos induzirão uma avalanche de elétrons, com isto, gerarão a luz pulsante, Nakanishi e sua equipe, seccionaram as amostras e observaram com auxílio de um microscópio de 100x. A área descolorida foi detetada toda vez que a luz pulsante era observada.

Se a tensão é aplicada à amostra por um longo tempo, a área na qual ocorre a luminescência guiará a formação de cavidades e finalmente gerará ramos.

1.5. ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DAS RAMIFICAÇÕES ELÉ-
TRICAS USANDO MÉTODOS ELÉTRICOS E ÓPTICOS

A luz foi detetada de um sistema de eletrodos ponta-plano sob temperatura do nitrogênio líquido (77°K) durante a fase de iniciação de ramos (9). A emissão de luz foi atribuída à relaxação de cargas injetadas no material por emissão de campo, e não devido a descargas parciais em microcavidades. Shibuya et al também mediram a luz gerada e pulsos elétricos durante a iniciação de ramos em resinas epoxy (10). Usando um fotomultiplicador e um intensificador de luz, dois tipos de emissão de luz foram registrados. A emissão de baixo nível ocorreu na ponta da agulha com cavidades não perceptíveis. Uma segunda, de luz mais intensa, devido as descargas parciais foi detetada em uma cavidade na ponta da agulha. Borishade et al (11) mediram a característica de descargas parciais e ruptura em gases confinados, em tubos dielétricos de dimensões comparáveis àquelas dos canais dos ramos, com poucos milímetros de comprimento e poucos micrômetros de diâmetro.

O recente estudo realizado por Laurent (7) foi baseado na seguinte hipótese: a propagação dos ramos é aumentada pela presença de descargas elétricas em microcanais. As detetações destas descargas podem ser feitas: ou por observação do fenômeno luminoso, o qual foi acompanhado, ou pelo registro dos pulsos de corrente associados. A atividade luminosa nos ramos é principalmente concentrada perto do fim destes e se move gradualmente em direção do eletrodo aterrado. Deve ser enfatizado que há uma

similaridade entre os ramos e a degradação da amostra contendo uma cavidade cilíndrica sujeita a descargas parciais.

Os ramos iniciais são formados pela ação de descargas parciais entre a ponta da agulha e o final destes ramos. Algumas das descargas transferidas por descargas parciais podem ser capturadas pelas paredes do canal, porém criando uma carga espacial a qual se opõe ao campo original causando descarga. Este fenômeno também foi observado por Borishade et al.

O campo elétrico combinado com a onda térmica produzida pela descarga são responsáveis pela ruptura intrínseca do material e também pela propagação dos ramos. A propagação dos ramos é independente do eletrodo e depende somente da energia da descarga. Mason estimou que o volume de politene erodido por cada descarga de 10pC seria em torno de 10^{-15} cm^3 . Garton não concorda com Mason. Seus cálculos mostram que a possibilidade da erosão térmica no esforço da iniciação de descarga é desprezível. Ele atribui a causa provável da erosão ao bombardeamento por partículas.

Em cavidades, Mason e Laurent observaram que descargas parciais concentram-se ao redor da periferia da cavidade cilíndrica. O aumento da condutividade das paredes causa a localização das descargas em pontos específicos, e nestes pontos os ramos se desenvolvem guiando a ruptura. Esse fenômeno também se repete em ramificações experimentais com a localização das descargas no fim de certos ramos e o crescimento de canais finos para completar a ligação entre os eletrodos.

Laurent afirma que não sendo a tensão suficientemente grande para sustentar as descargas através do comprimento total

dos ramos, então estas descargas não podem encontrar a ponta dos ramos devido: ao pequeno diâmetro dos canais, e carga espacial depositada nas paredes e a pressão do gás dentro do canal. Logo, os ramos não podem crescer em tamanho, passando a crescer os seus diâmetros.

A extinção das descargas pode ser explicada da seguinte maneira: a decomposição do dielétrico produz normalmente gás (hidrocarbonetos não-saturados) e produtos condutores, os quais curto-circuitam parcialmente as cavidades em certas partes dos ramos pelo decréscimo da resistividade das paredes. Os períodos de extinção são freqüentes em gradientes de baixa tensão como foi observado por Dakin et al(6). Eles atribuíram esta extinção ao aumento na pressão dos gases decompostos confinados nos canais. Um aumento na pressão do gás não pode explicar completamente os fatos experimentais também notados por Densley(12). Durante a fase final da propagação dos ramos, muitos dos canais finos encontram o eletrodo aterrado, os quais deveriam causar uma redução na pressão dentro dos ramos para a pressão atmosférica, isto se já existia uma alta pressão. Sob estas condições, as descargas iniciaram outra vez, mas isto não foi observado.

Laurent(7) e Densley(12) afirmam que não há uma completa extinção das descargas, estas desaparecem dentro do ramo principal, mas outras descargas estão localizadas em canais finos. Confirmando assim a hipótese da extinção parcial pela redução da resistividade superficial das paredes.

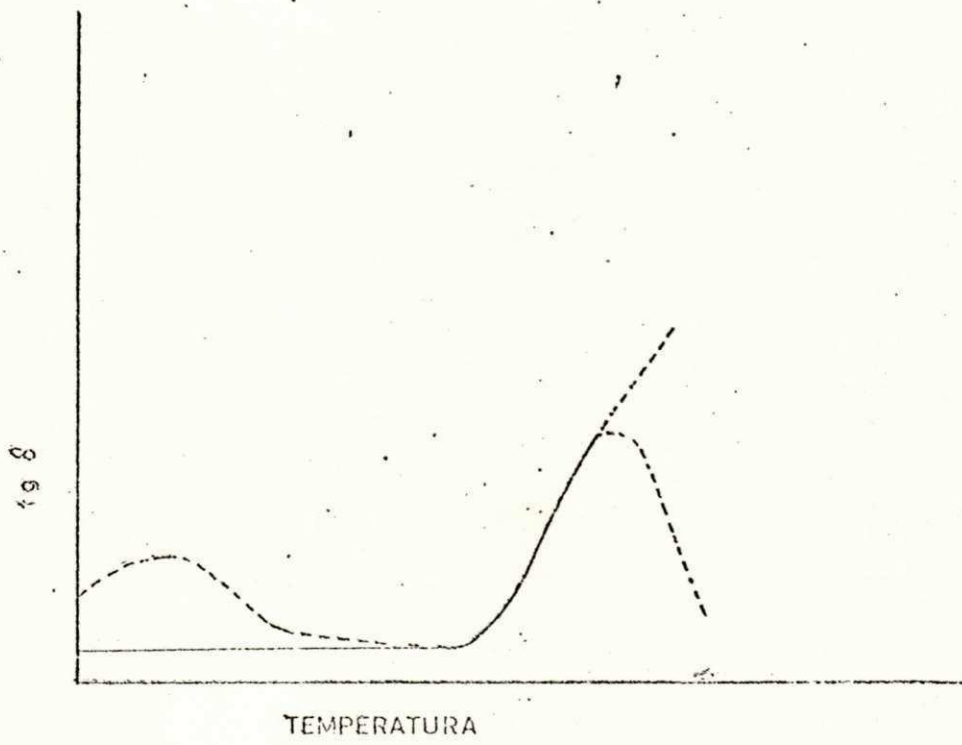


FIGURA.11- VARIAÇÃO TÍPICA DA $tg \delta$ DA RESINA EPOXY COM A TEMPERATURA

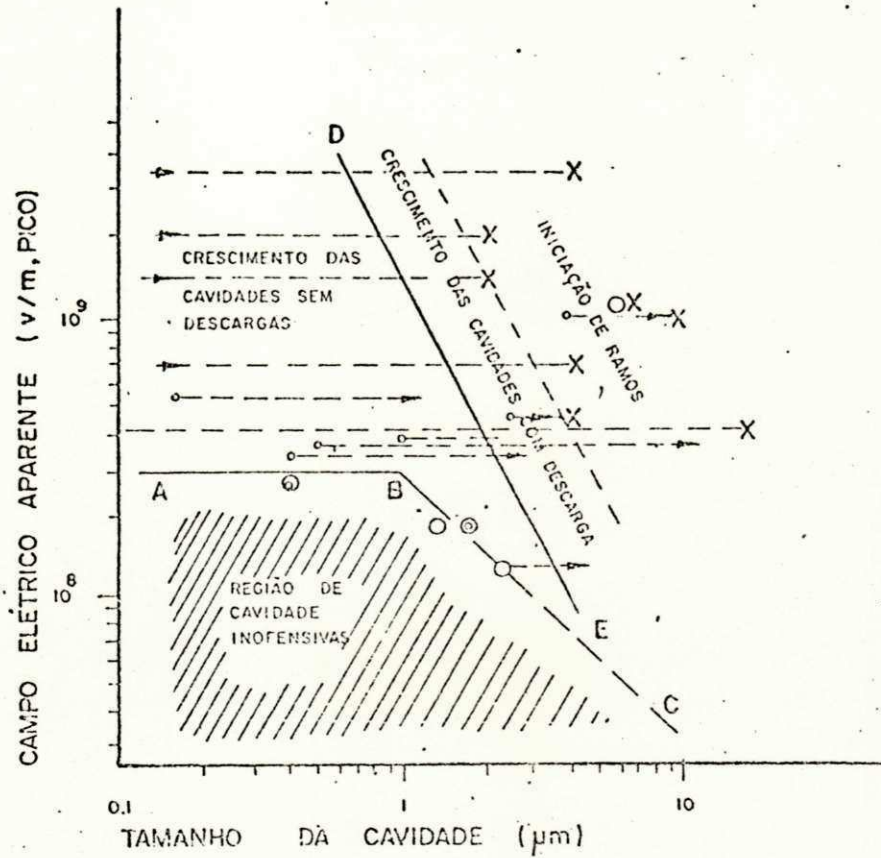


FIGURA 1.2 - O EFEITO DO CAMPO ELÉTRICO APARENTE E DO TAMANHO DA CAVIDADE NO CRESCIMENTO DA CAVIDADE: O SÃO AS CONDIÇÕES INICIAIS, X SÃO AS CONDIÇÕES FINAIS DA CAVIDADE QUANDO INICIADA A RAMIFICAÇÃO, ⊙ SÃO AS CONDIÇÕES NAS QUAIS O CRESCIMENTO NÃO FOI OBSERVADO.

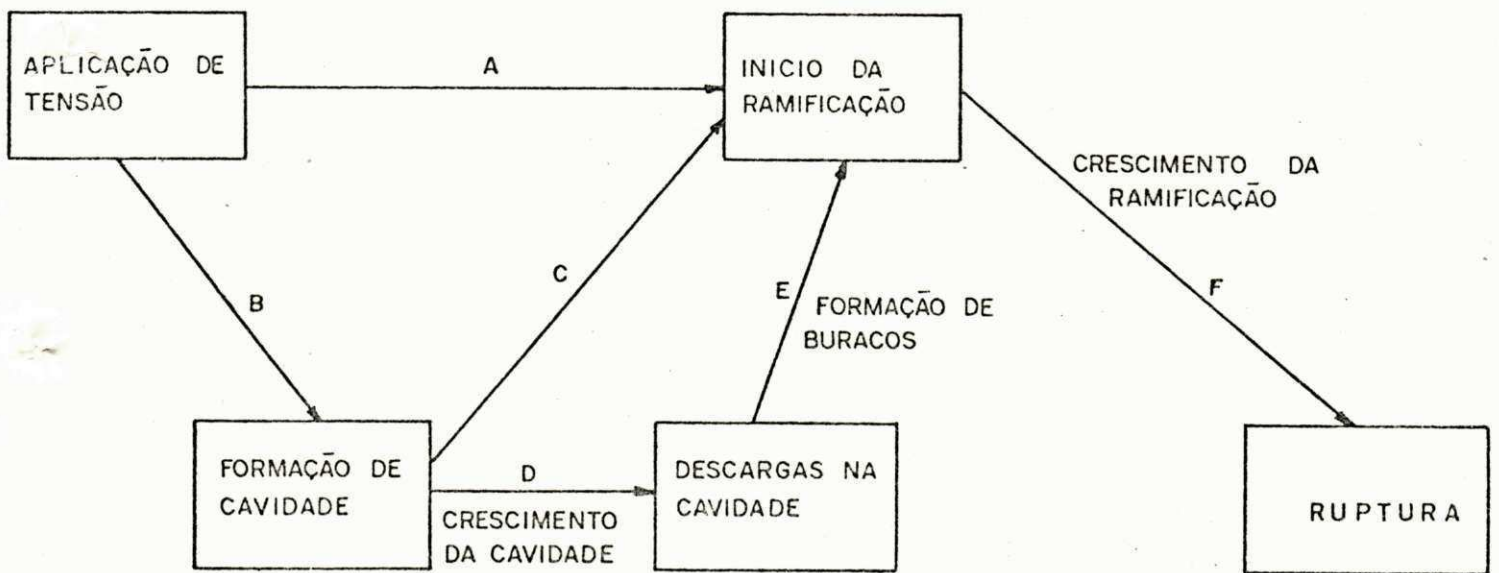


Fig. 1.3 - PROCESSO DE DETERIORIZAÇÃO E RUPTURA EM RESINA EPOXY.

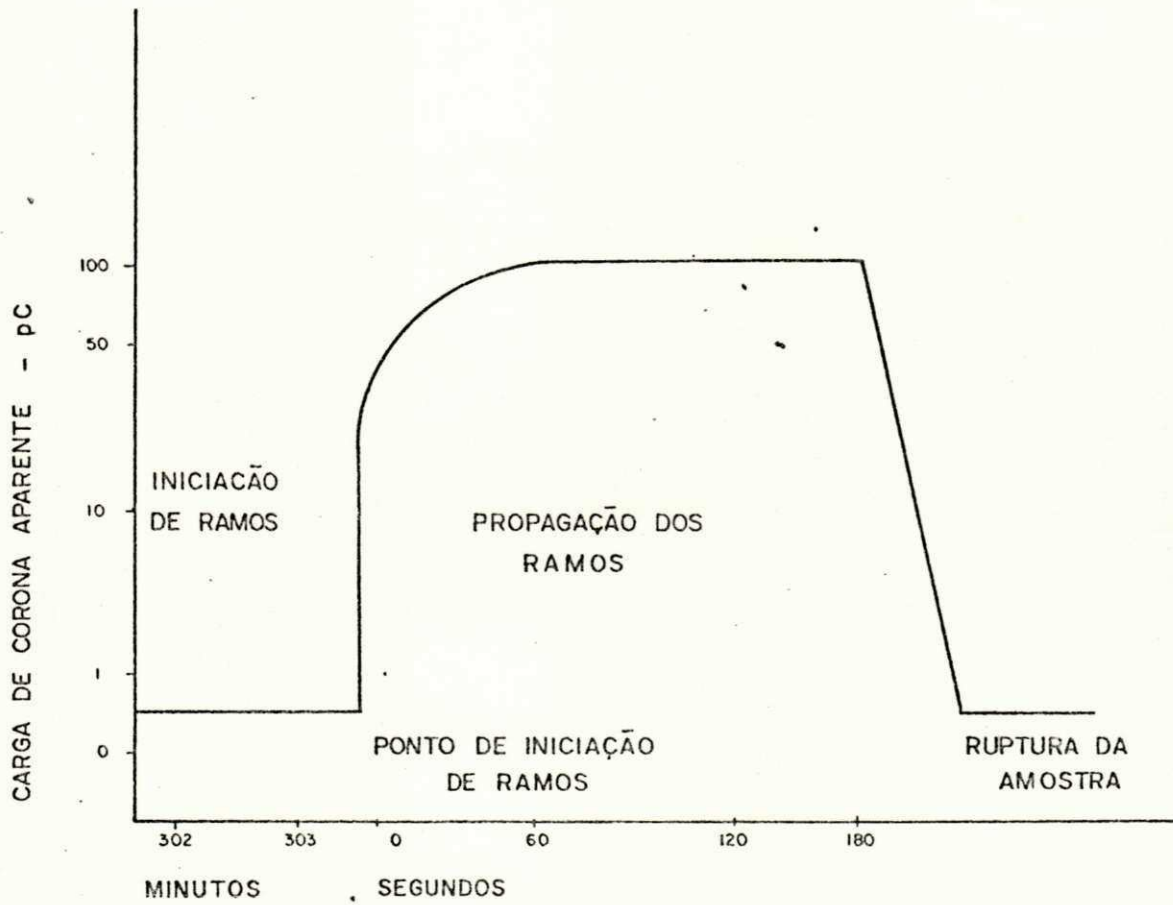


FIGURA 1. 4- REGISTRADOR TÍPICO DE CARGA DE CORONA APARENTE DURANTE A PROPAGAÇÃO DE RAMOS ELÉTRICOS A RUPTURA.

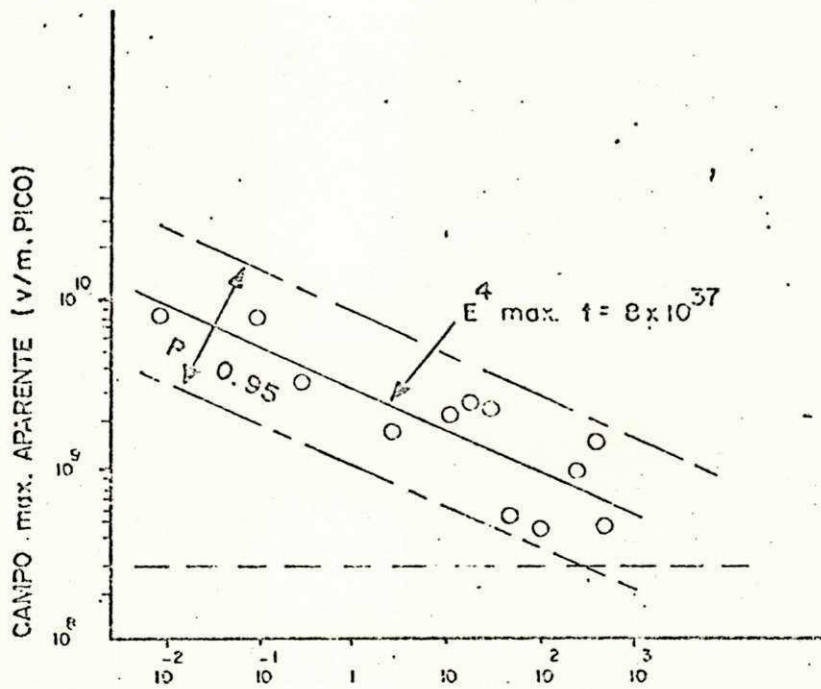


Fig. 1.5 - RELAÇÃO ENTRE O CAMPO APARENTE NO PINO DA AGULHA E O TEMPO REQUERIDO PARA A FORMAÇÃO DE UMA CAVIDADE PERCEPTÍVEL.

TABELA 1.1

PROPRIEDADES FÍSICA DA RESINA EPOXY

	PURA		COM SÍLICA	
DENSIDADE g/cm^3	1,11	- 1,40	1,6	- 2,0
COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA $\times 10^{-5}$ (cm/cm/°c)	4	- 10	1,2	- 4,0
CONDUTIVIDADE TÉRMICA (10^{-4} cal/sec/cm ² /°c/cm)	4,0	- 5,0	10	- 20
TENSÃO MECÂNICA (PSI)	4000	- 13000	7	- 13000
ELONGAÇÃO %	3,6	- 6,0	1,0	- 3,0
COMPRESSÃO MECÂNICA (PSI)	15	- 25000	15	- 35000
TEMPERATURA DE DISTORÇÃO °c (INCREMENTO) (FORÇA INTERNA - 254 PSI)	25	290		

2.

PROCESSOS DE RUPTURA EM RESINA EPOXY

No estudo de propriedades elétricas dos isolantes, geralmente se usa a configuração ponta-plano, conseguindo-se assim, campos elétricos altamente divergentes. Esses campos facilitam o estudo do isolante pela redução de sua vida útil.

O processo de falhas em isolantes sólidos homogêneos, difere fundamentalmente dos processos em isolantes líquidos, gases e vácuo. Com o tempo, as falhas transitórias para isolantes líquidos, gasosos e vácuo tendem a se regenerar, logo esses materiais não têm memória dos eventos passados. Em isolantes sólidos entretanto, todas as falhas no dielétrico são armazenadas e podem eventualmente contribuir para a ruptura final.

Nesse capítulo, descreveremos os mecanismos da ramificação elétrica, focalizando a discussão dos processos: formação e crescimento de cavidades; iniciação e propagação de ramos elétricos, e o processo de indução e o de ramificação elétrica em resina epoxy.

2.1.

TIPOS DE RAMIFICAÇÃO

Ramificação é o fenômeno da préruptura elétrica o qual pode, em certas condições, guiar a ruptura do isolante entre dois eletrodos definindo assim, o fim da vida da isolação sólida. Dá-se esse nome ao tipo de danificação que progride através da secção do dielétrico sob ação de um campo elétrico.

A ramificação pode ocorrer e progredir vagarosamente por

descargas parciais periódicas e lentamente na presença de mistura sem nenhuma descarga parcial, ou ainda pode ocorrer rapidamente como resultado de um impulso de tensão. Entretanto, ramificações têm sido geralmente associadas com correntes alternadas ou tensões impulsivas. Recentemente têm sido observadas ramificações com altos campos produzidos em tensão contínua, associadas a condições experimentais molhadas, isto é, amostras imersas em solução aquosa. A ramificação pode ou não ser seguida de uma ruptura elétrica completa na secção do dielétrico, onde ela ocorre. Em dielétricos sólidos orgânicos a ramificação é o mais provável mecanismo de falhas elétricas, o qual não ocorre catastróficamente, parece ser o resultado de um processo mais duradouro(13).

Dois tipos de ramificações em isolantes sólidos são conhecidas: as ramificações eletroquímicas e ramificações elétricas.

2.2

RAMIFICAÇÕES ELETROQUÍMICAS OU AQUOSAS

Existem dois diferentes tipos de ramificações eletroquímicas(6): A ramificação eletroquímica iniciando e crescendo na superfície dos condutores internos e externos e, a ramificação eletroquímica iniciando e crescendo em impurezas e cavidades, as quais estão localizadas na camada isolante.

Esses tipos de ramificações crescem na presença de água e apresentam características básicas, tais como: são iniciadas e crescem na presença de ambos, campo elétrico e água; apresen

tam a sua razão de crescimento com o tempo bastante lenta comparada com a ramificação elétrica; o campo elétrico necessário à iniciação da ramificação eletroquímica é menor do que o necessário à ramificação elétrica; a ramificação eletroquímica inicia e cresce com impurezas, cavidades e projeções das camadas semicondutoras internas e externas dos cabos; a iniciação e o crescimento dessas ramificações são pouco afetadas pela temperatura; com esse tipo de ramificação não é possível detetar descargas parciais; e as ramificações aquosas são compostas de microcavidades cheias com água. Há autores que classificam as ramificações aquosas separadamente das ramificações eletroquímicas(15).

Existe uma grande variedade de fatores que afetam a iniciação e o crescimento de ramificação aquosa. Esses fatores sucintamente explicados são:

Tempo de aplicação da tensão. Os resultados(16) indicam que o número e o comprimento das ramificações aquosas aumentam com um maior tempo de aplicação da tensão. O crescimento da ramificação eletroquímica com o tempo de aplicação pode ser visto na fig. 2.1. para vários tipos de soluções.

Tensão aplicada e freqüência. O crescimento das ramificações eletroquímicas é acelerado pelo aumento da tensão aplicada (16) como está indicado na fig. 2.2. A freqüência também influencia o crescimento das ramificações aquosas(6 e 16). Um aumento na freqüência corresponde a um acréscimo na razão de crescimento das ramificações aquosas(16), como mostrado na fig.2.3.

Temperatura - Alguns resultados de estudos em ramificações eletroquímicas indicam que o aumento na temperatura não influencia o crescimento dessas ramificações. Porém, outros resulta

dos indicam a dependência do crescimento com o aumento da temperatura(16).

Materiais - As ramificações aquosas podem ser também encontradas em materiais polímeros, tais como: cloreto de polivinil(PVC), polipropileno e resina epoxy(16). As características básicas das ramificações em tais materiais, ainda não foram determinadas.

Eletrodos - Quando o eletrodo em ramificações aquosas é feito de outros materiais(não metais), tais como: papel carbono, algodão semi-condutor, papel kraft, papel celofane, estas ramificações podem facilmente ser iniciadas em temperatura ambiente. Entretanto, a ramificação aquosa não é iniciada quando um polietileno semi-condutor é usado como eletrodo(16).

Esforço mecânico do material - Um esforço mecânico é exercido na isolação de cabos por várias razões como seguem: Processo de fabricação, instalação de cabos, em serviço e durante a aplicação de tensão para cabos imersos em água. O crescimento de ramificações eletroquímicas em isolações com esforço de tensão é maior do que aqueles sem esse esforço, como mostrado na fig. 2.4. A ramificação eletroquímica cresce perpendicularmente a direção da tensão mecânica.

2.3. RAMIFICAÇÕES ELÉTRICAS

No estudo do mecanismo de formação e propagação das ramificações elétricas, as ferramentas típicas usadas são: a observação visual da amostra durante a aplicação de tensão; a medição

dos níveis de descargas parciais; a medição do tempo de aplicação da tensão; o exame microscópico, óptico ou eletrônico da amostra antes e após a aplicação de tensão; a observação da luz emitida durante o ensaio através de um fotomultiplicador de alto ganho (5,7,10); e de uso mais recente um gerador de baixa frequência e ruídos(17).

O fenômeno da ruptura tipo ramificação em sólidos plásticos tem sido estudado nos últimos 30 anos. Essa ruptura é às vezes precedido pelo desenvolvimento de uma figura no isolante a qual assemelha-se um pequeno ramo. A ruptura com ramificações ocorre sob condições convenientes do campo elétrico em todos os plásticos.

A seguir são descritos os mecanismos de desenvolvimento das ramificações elétricas. No estudo, as ramificações elétricas podem ser divididas em três grupos bem distintos: formação e crescimento de cavidades, iniciação dos ramos elétricos e a propagação dos ramos elétricos.

2.3.1. FORMAÇÃO E CRESCIMENTO DE CAVIDADES

Examinando as amostras pode-se separá-las em dois grupos: as amostras que não apresentam defeitos e amostras com defeitos. Esses defeitos podem ser provenientes: de microcavidades provocadas pela diferença entre os coeficientes de dilatação térmica do epoxy e do eletrodo(geralmente um metal)(5), do espaço interatômico que adveio de uma polimerização não bem sucedida e do surgimento de cavidades durante o processo moldagem.

Na formação de cavidades em amostras sem defeitos, inicialmente, cavidades não são encontradas ao redor de pino, e após

um período de tempo essas cavidades aparecem e crescem(8.18). O processo é bastante lento em baixa tensão e uma cavidade grande nem sempre é necessária para os ramos iniciarem. No fenômeno descrito acima nenhuma mudança física ou pulso de descargas são observadas, esse é conhecido como período de indução. Um certo período de tempo parece ser necessário para a iniciação da formação da cavidade. Uma sombra fraca pode ser vista na região na qual a cavidade se formará mais tarde(5,8). Se a cavidade aparece, então ela cresce rapidamente para cerca de 1 a 3 μ m de diâmetro. Quando a tensão é aplicada por um tempo suficientemente longo, ramos aparecem, em todos os casos, de uma cavidade que tenha iniciado o seu crescimento.

A tensão aplicada e o raio de curvatura da ponta do pino são os mais decisivos fatores que afetam a formação da cavidade.

Na figura 2.5 observações experimentais são mostradas para vários raios de curvatura e tensão aplicada(8). Sendo concluído o seguinte:

1) Não deterioração, embora a tensão seja aplicada por um período de tempo superior a alguns milhares de horas. O resultado experimental sugere que um campo elétrico 3×10^8 V/m na ponta do pino é o campo elétrico crítico. A deterioração não aparece nas amostras livres de cavidades se o campo máximo aplicado é inferior ao campo crítico.

2) A ramificação direta, é a ruptura em menos de dez segundos de tensão aplicada(processo A, da fig.1.3). Esse processo ocorre porque em um campo muito superior ao valor crítico, os elétrons recebem muito mais energia do que dissipam, esse mecanismo é conhecido como ruptura intrínseca.

3) Formação de cavidades seguidas por ramificações - Quando o campo elétrico máximo aplicado é maior do que 3×10^8 V/m, sendo esse aplicado em tempo t horas dado por:

$$(E_{\text{máx}})^4 \cdot t = 8 \times 10^{37} \text{ V}^4 \text{ m}^{-4} \text{ h} .$$

há uma gradual degradação do dielétrico devido ao bombardeamento por elétrons de grande energia. Esse bombardeamento guia a formação de uma cavidade e o surgimento da ramificação, tal mecanismo será discutido mais tarde com maiores detalhes. Entretanto, como podemos observar o número de pontos na fig. 2.5 é limitado, mas parece existir uma curva distinta separando a região de não deterioração das amostras, como mostra a linha cheia. As regiões da formação de cavidades e de ramificação direta são pouco distintas e parecem se sobrepor. A linha cheia corresponde ao campo elétrico na ponta do pino. No cálculo do campo elétrico(19) não foi considerado a carga espacial, e é calculado por:

$$(E_{\text{máx}}) = \frac{2V}{R \cdot \text{Ln} \left(\frac{4d}{R} \right)} \quad \text{Eq. 2.1a}$$

$$(E_{\text{máx}}) = \frac{2V}{R \cdot \text{Ln} \left(1 + \frac{2d}{R} \right)} \quad \text{Eq. 2.1b}$$

onde: V é a tensão aplicada(valor do pico)

R é o raio de curvatura

d é o gap.

A equação 2.1a fornece o campo elétrico máximo na extremidade do eletrodo, quando esse é parabólico. A equação 2.1b fornece também, o campo elétrico máximo na extremidade do eletrodo, quando este é hiperbólico.

2.3.2 INICIAÇÃO DOS RAMOS ELÉTRICOS

Várias teorias têm sido propostas para explicar o fenômeno que ocorre durante o período de iniciação. Essas teorias dependem da aparência microscópica da interface eletrodo-isolante, isto é, se a cavidade existe ou não, como vimos anteriormente. Ora, se a interface eletrodo-isolante é perfeita, Shibuya et al(10) postularam que:

1) a perfeita interface deve ser alterada para dar origem a microcavidade.

2) Essa microcavidade que aparece agora, aumenta de tamanho até que as descargas parciais sejam iniciadas(definindo assim, o final do período de iniciação).

A microcavidade pode ser criada por vários mecanismos. Um provável processo é o causado por altos campos elétricos gerando a emissão eletrônica do eletrodo para dentro do dielétrico. Esse processo requer um campo elétrico extremamente alto para gerar um número suficiente de elétrons com grande energia. Os elétrons viajam poucos micrômetros dentro do dielétrico e se alojam em "Traps" profundas ou superficiais existentes dentro da estrutura do isolante. ("Traps" são armadilhas existentes dentro do dielétrico, podendo capturar elétrons livres que viajam nas suas proximidades). Entretanto, com tensão alternada, há um

movimento contínuo de elétrons, do eletrodo para o dielétrico e do dielétrico para o eletrodo, dentro do isolante. Quando o campo elétrico é muito intenso alguns desses elétrons terão energia suficiente para romper as ligações químicas, decompondo o isolante em produtos de baixo peso molecular(7).

Outros processos que podem criar a microcavidade são:

1) ruptura intrínseca direta e local no sólido, o qual requer normalmente um campo elétrico maior do que o campo necessário à emissão de elétrons(8), sendo esse processo pouco provável;

2) forças compressivas de Maxwell, as quais com tensão alternada, podem produzir uma quebra por fadiga mecânica(15). Esse mecanismo também não é considerado importante(8,15).

Existindo a cavidade, Shibuya et al postulam que ocorre o bombardeamento eletrônico do eletrodo para a parede oposta da cavidade. Esse bombardeamento requer um campo elétrico menor do que o necessário à emissão eletrônica. O bombardeamento eletrônico ocorre sem o surgimento de descargas parciais devido ao tamanho do gap mínimo requerido pela Lei de Paschen. Esse bombardeamento eventualmente erode a microcavidade, geralmente criando um buraco pontiagudo até que as descargas parciais possam ocorrer.

Ora, se no isolante são encontradas as microcavidades causadas no processo de fabricação, obviamente o primeiro passo da iniciação pode ser omitido(não existe mais a formação da cavidade). Dependendo da dimensão da cavidade e do campo elétrico pode ocorrer ou o bombardeamento eletrônico ou descargas parciais.

ais, o primeiro ainda fazendo parte da iniciação e o segundo já pertencendo ao processo da propagação elétrica. Esse processo é mostrado na fig. 2.6.

2.3.3. PROPAGAÇÃO DE RAMOS ELÉTRICOS

O período de propagação ou crescimento dos ramos elétricos é definido como sendo o tempo entre o início da detetação de descargas parciais até ocorrer a ruptura final do isolamento. É conhecido que descargas parciais, ocorrendo em cavidades erode o isolante sólido decompondo-o em produtos gasosos. Uma descarga parcial causa o fluxo de avalanches de elétrons e de íons, os quais resultam no rápido pulso de corrente dentro do isolante. Entretanto, durante a descargas, átomos e moléculas são excitadas do seu estado normal pelas avalanches de elétrons. Quando os átomos retornam ao estado normal, são emitidas radiações. Se o isolante é transparente, então pulsos de luz são observados. A atividade luminosa nos ramos é principalmente concentrada perto do fim desses e se move gradualmente em direção do eletrodo aterrado.

Os ramos iniciais são formados pela ação de descargas parciais entre a ponta da agulha e o final desses ramos. Algumas das cargas transferidas por descargas parciais podem ser capturadas pelas paredes do canal, porém, criando uma carga espacial a qual se opõe ao campo original causando as descargas(7). O campo elétrico combinado com a onda térmica produzida pela descarga são responsáveis pela ruptura intrínseca local e, conseqüentemente, a propagação dos ramos.

Em cavidades, foi observado que descargas parciais concentram-se ao redor da periferia da cavidade cilíndrica. O aumento da condutividade das paredes causa a localização das descargas em pontos específicos, e nesses pontos, os ramos se desenvolvem guiando a ruptura(7,19).

Os ramos elétricos parecem crescer irregularmente, aos saltos. Os períodos de extinção são freqüentes em gradientes de baixa tensão e esse extinção foi atribuída ao aumento na pressão dos gases decompostos, confinados nos canais. Durante a fase final da propagação dos ramos, muitos dos canais finos encontram o eletrodo aterrado, os quais deveriam causar uma redução na pressão dentro dos ramos para a pressão atmosférica. Sob essas condições, as descargas iniciariam outra vez, mas isto não foi observado. Laurent e outros pesquisadores afirmam que não há uma completa extinção das descargas, essas desapareceram, do ramo principal, mas outras descargas estão acontecendo e localizam-se em canais finos.

2.3.4. PROCESSO DE INDUÇÃO E DE RAMIFICAÇÃO

Agora é possível sumarizar em uma só figura o processo de indução e de ramificação em resina epoxy como podemos observar na figura 1.3 do Capítulo I. A iniciação direta de ramos sem haver período de indução é o que ocorre em tensão alta, e está indicado pelo processo A, a ruptura intrínseca local é o mecanismo possível(18). Em baixa tensão, a formação de cavidades, ocorre, provavelmente, como um efeito duradouro do movimento dos elétrons de grande energia no dielétrico sólido(Processo B). Um

ramo pode iniciar devido ao alto campo formado na ponta da cavidade (geralmente as cavidades não são esféricas), (Processo C). Entretanto a cavidade cresce, por causa do constante bombardeamento eletrônico da resina (Processo D). Após a iniciação da ionização, o processo é inteiramente similar à deterioração por descargas parciais; a formação de um buraco pontiagudo levará à iniciação de ramos (Processo E). Esses são os mecanismos e fenômenos possíveis no período de indução (18).

O processo de iniciação e propagação de ramos elétricos em isolamento pode ser ilustrado na forma de um fluxograma (13), dando-se ênfase à cavidade, fig. 2.6.

No próximo Capítulo descreveremos o arranjo experimental usado, o processo da obtenção das amostras de resina epoxy, os princípios utilizados na detecção das descargas parciais, como também, as condições utilizadas para se obter os resultados experimentais.

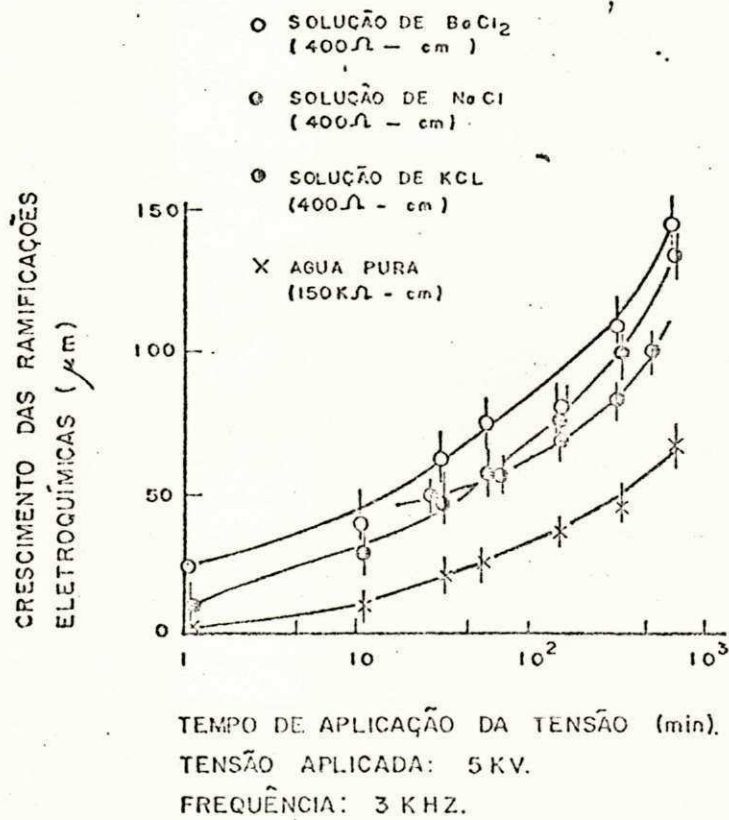


FIGURA .2.1—CARACTERÍSTICA DO CRESCIMENTO,
 RAMIFICAÇÕES ELETROQUÍMICA
 EM POLIÉTILENO.

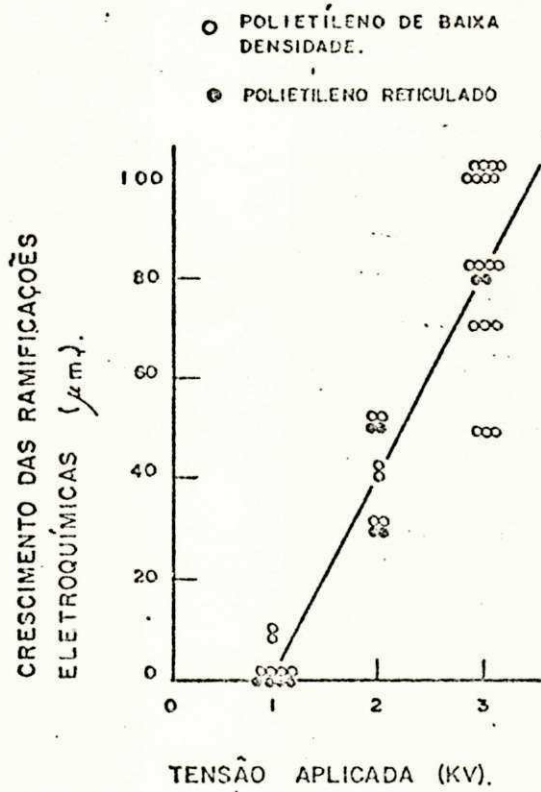


FIGURA. 2.2 -DEPENDÊNCIA DA TENSÃO NO CRESCIMENTO DE RAMIFICAÇÕES ELETROQUÍMICAS.

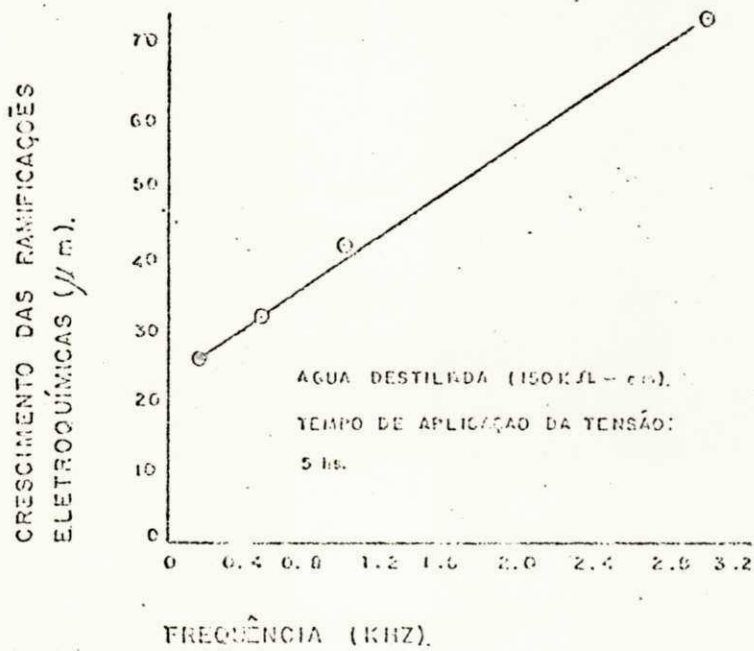


FIGURA 2.5. - RELAÇÃO ENTRE A FREQUÊNCIA E
O CRESCIMENTO DAS RAMIFICAÇÕES
ELETROQUÍMICA.

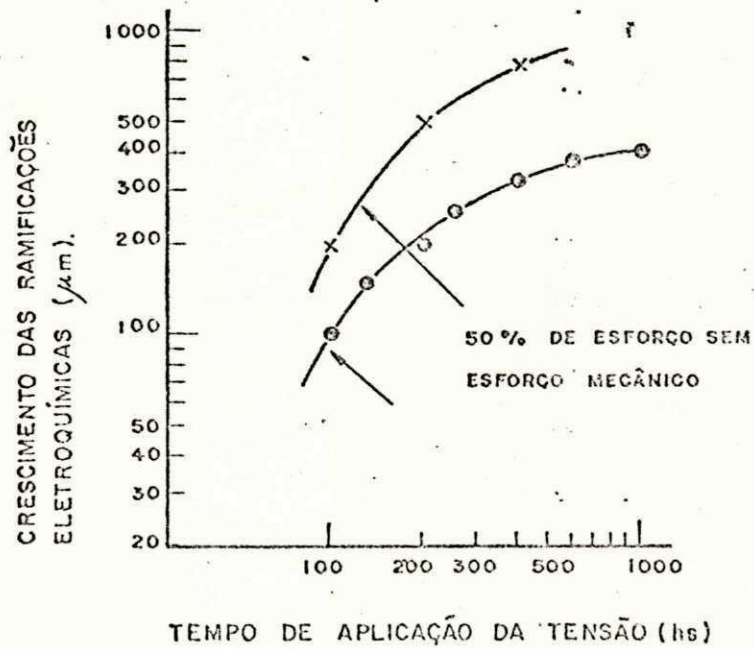


FIGURA 2.4— EFEITO DO ESFORÇO MECÂNICO
NO CRESCIMENTO DAS RAMIFICA
ÇÕES ELETROQUÍMICAS

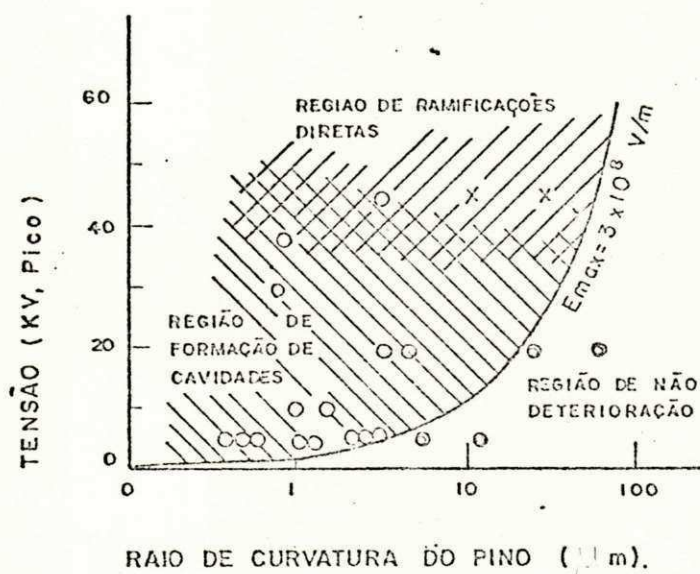
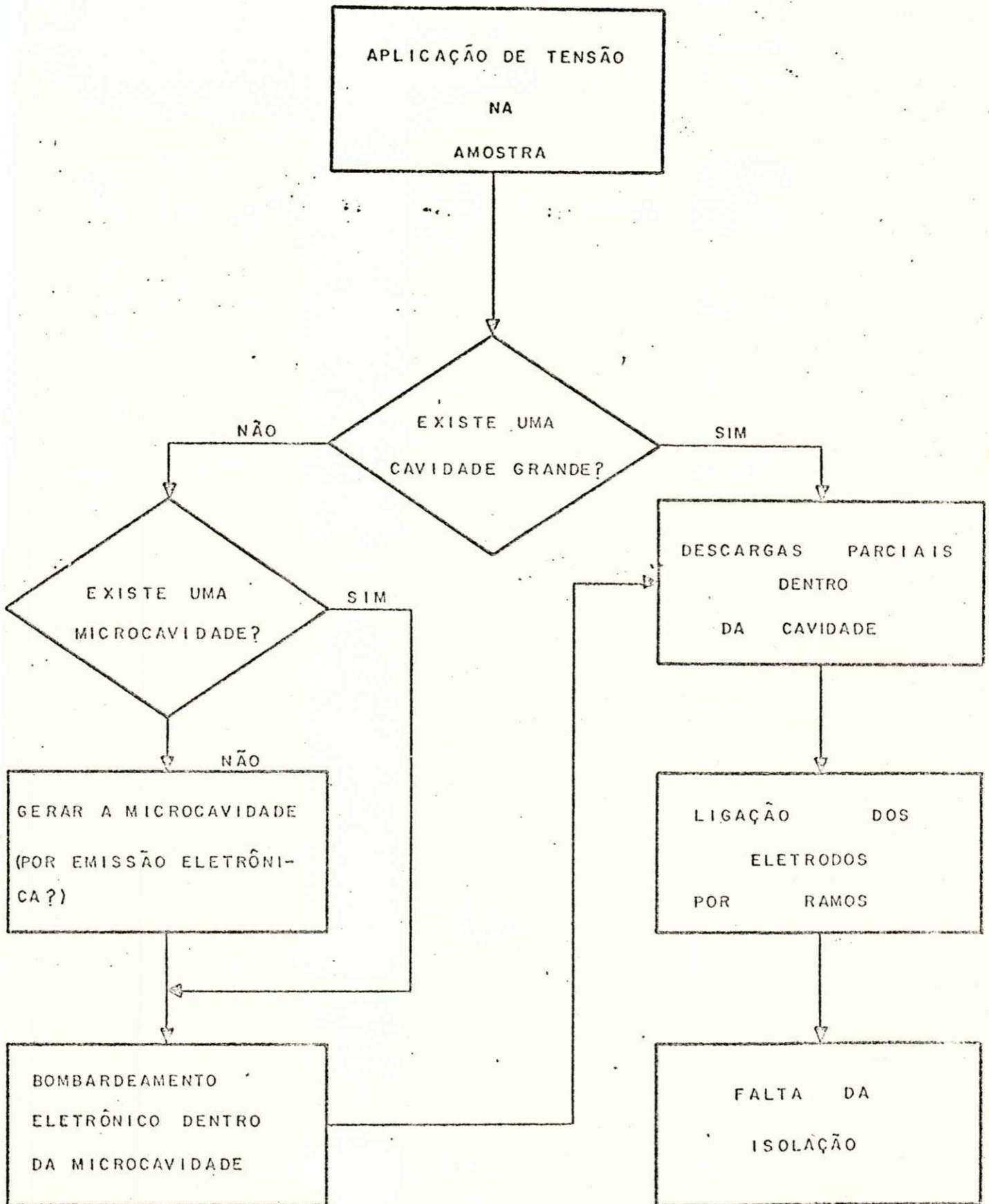


FIGURA 2.5. — TENSÃO VERSUS RAI-
 O DE CURVATURA, EM AMOSTRAS INICIAL-
 MENTE SEM DEFEITOS. NÃO DETERIORA-
 ÇÃO SOB UM PERÍODO DE AL-
 GUNS MILHARES DE HORAS (O),
 FORMAÇÃO DE CAVIDADES (O) E
 RAMIFICAÇÃO DIRETA (X).



INICIO DE RAMOS

CRESCIMENTO DE RAMOS

FIGURA 2.6 - PROCESSOS DE INICIAÇÃO E CRESCIMENTO DE RAMOS ELÉTRICOS EM

Uma configuração pino-plano foi usado em nosso experimento. Isto porque é possível obter campos elétricos altamente divergentes com tensões não muito altas. Com tensões eficazes inferiores a 40 KV foi suficiente para a indução e também para as observações dos fenômenos já explicados no capítulo anterior.

Nesse capítulo descreve-se a preparação das amostras de resina epoxy. Descreveremos também, o arranjo experimental usado, os princípios básicos usados para a detecção de descargas parciais e as condições utilizadas para se obter os resultados experimentais.

3.1.

PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS COM ARALDITE B(RESINA BISPENOL)

O araldite fundível B é uma resina sintética do grupo das resinas etoxilínicas. Em estado líquido, com a adição do Endurecedor HT-901, pode ser facilmente transformada em peças fundidas de dimensões as mais diversas, de cor amarelada, isentas de bolhas de ar. A solidificação ocorre sem a aplicação de pressão, exclusivamente pela interferência de calor. Não há despreendimento de substâncias voláteis. Em conjunto com a resina fundível Araldite B, também pode ser usado material de enchimento.

As peças fundidas com Araldite se destacam por apresentarem elevada resistência mecânica e considerável resistência ao calor. São largamente insensíveis às influências atmosféricas.

e químicas, possuem excelentes qualidades dielétricas e mecânicas(1,20). Em estado endurecido o Araldite B é inodoro, sem gosto e inócuo. A resina possui elevada aderência às superfícies de diversos materiais. O endurecedor adequado HT-901 é fornecido em pó de cor branca(20).

3.1.1. COMPORTAMENTO DA RESINA

Sob temperatura ambiente a resina é sólida, amolece a 50º-60ºC., e torna-se líquida a 125 - 130ºC. Quando se adiciona o Endurecedor HT-901 a resina fica tão líquida que penetra nas menores cavidades durante o processo de fundição. Ao se aquecer a mistura, resina e endurecedor a 120º/130ºC., durante mais de 1 hora, então a mistura começa a solidificar-se. Pelo endurecimento, a resina líquida é transformada em peça dura e infundível. O endurecimento ocorre sem o despreendimento de substância voláteis e sem reações perceptíveis. Por este motivo, a contração do volume é insignificante e as peças obtidas do resfriamento estão praticamente isentas de tensões internas(20).

3.1.2. A FUSÃO E A FUNDIÇÃO

Inicialmente, a resina é colocada em um recipiente metálico e aquecido a 120ºC em uma estufa. A essa temperatura também é aquecido o Endurecedor HT-901(anidrido aromático) tornando-se líquido. É adicionada à resina líquida, mexendo-se bem a quantidade necessária de Endurecedor HT-901(Anidrido Aromático). Usa-se

da seguinte maneira: para cada 10 partes em peso de resina, são utilizadas 3 partes em peso do endurecedor, isto é, 30% do peso da resina é a porção necessária de endurecedor com uma tolerância de $\pm 10\%$ (20).

Assim que o endurecedor estiver dissolvido na resina líquida, formando uma mistura homogênea, então a mistura é despejada em moldes previamente aquecidos à mesma temperatura. Após ser despejada, a mistura é submetida a vácuo de 40mm de Hg, eliminando assim, bolhas de ar remanescentes. Cada fundição produz cinco amostras.

3.1.3 CURA E RECOZIMENTO

O tempo de cura depende da temperatura, conforme se pode verificar na tabela 3.I. Escolheu-se o tempo de 14 horas corresponde a temperatura de 120°C, como o período de cura.

O recozimento das amostras é feito com o máximo cuidado, na própria estufa. O resfriamento das amostras segue o esquema da Tabela 3.II. A contração do volume que ocorre durante o resfriamento é muito pequena em comparação com outras resinas fundíveis(1,20).

3.1.4. OS MOLDES

Os moldes podem ser feitos de ferro ou outro metal não poroso. Em virtude da extraordinária aderência das resinas Araldite, é imprescindível recobrir com um produto separador, quais

quer superfícies ou partes dos moldes que possam entrar em contato com a mistura. É usado o separador QZ13 de fabricação da CIBA-GEIGY. Esse separador é aplicado a pincel, sempre antes da fundição, com os moldes já aquecidos.

O molde foi projetado para cinco amostras (fig. 3.1.a, b e c). Esse consiste de um cilindro de ferro com cinco furos cilíndricos. As agulhas são montadas na base. O conjunto é colocado em uma pequena câmara de vácuo onde são evacuados os gases, facilitando assim, a eliminação de cavidades cheias de ar. O conjunto molde e câmara de vácuo é visto na fig. 3.1c.

3.1.5. PINOS

Os pinos usados no nosso experimento são agulhas nº 14 de fabricação Singer apresentando raios de curvatura entre $40\mu\text{m}$ e $60\mu\text{m}$. O material destas agulhas é o aço e podemos observá-las, nas figuras 3.2a e b, com magnificação em torno de 500X.

3.1.6. ELETRODOS

Os eletrodos base são fabricados em latão fig. 3.3. Esses eletrodos base apresentam um furo central, onde a agulha será colocada. Os eletrodos se apresentam com rosca na parte superior. Essa rosca é utilizada tanto no processo de fundição como no ensaio. No processo de fundição ela é útil na fixação e centralização das amostras. No ensaio, a rosca também, para fixação e contato elétrico entre o pino e o condutor de alta tensão,

fig. 3.4. Esses eletrodos base em conjunto com as agulhas formam os eletrodos propriamente ditos, como visto na fig. 3.3 e 3.4.

3.2. ARRANJO EXPERIMENTAL

Os experimentos foram realizados em uma sala eletromagneticamente blindada. A fonte de potência de 60Hz dentro da sala foi condicionada com transformadores isolados eletricamente e filtros na linha de potência, fig. 3.5.

A iluminação, desse sala é feita por lâmpadas incandescentes. Todas essas precauções foram tomadas para permitir uma medição sensível de descargas parciais. O nível de ruído ainda permaneceu em torno de 0,2pC.

O arranjo dos equipamentos elétricos e a distribuição desses equipamentos são mostrados nas figs. 3.5 e 3.6. Um regulador motorizado, fabricação Ferranti, foi empregado para aplicar o nível de tensão apropriado à amostra. A medição da tensão nas amostras foi realizada através de medidores instalados no próprio regulador motorizado. Esse regulador equipado com relé de sobrecorrente ajustável, permitindo assim, controle direto na duração da sobrecorrente quando há uma ruptura direta.

O circuito de alta tensão é livre de descargas parciais. Uma resistência de alta tensão de $20K\Omega$ foi usada para limitar a corrente de curto-circuito. A amostra fica situada em um recipiente isolado, o qual contém óleo de transformador, inibindo assim, as descargas na superfície da amostra, como é mostrado na

na fig. 3.7.

3.3. CALIBRAÇÃO DO INSTRUMENTO NO CIRCUITO DE ENSAIO COMPLETO

A calibração do instrumento no circuito de ensaio completo é feita para determinar-se o fator de escala K_e , nas condições de ensaio reais com o objeto son ensaio inserido no circuito. O fator K_e fornece a relação entre a magnitude da descarga e a magnitude do impulso da tensão no instrumento de medição. Esse fator é afetado pelas características do circuito; geralmente a sensibilidade aumenta com o valor do capacitor de acoplamento C_k (21).

Embora a medição de descargas parciais sejam feitas em muitos componentes elétricos para assegurar a qualidade da isolação, geralmente não há uma especificação definida para essas medições. Algumas vezes, descargas em componentes são determinadas pelo uso do método da NEMA, onde é empregado um instrumento de medição de rádio interferência e, em outras, são usadas detetores de descargas calibrados os quais medem a magnitude do pico das descargas. O primeiro método é largamente usado na América e pouco na Europa(22). Anteriormente tinha havido algumas discordância quando se comparavam os resultados obtidos pelos dois diferentes métodos, e afirmações conflitantes têm sido feitas sobre o menor valor de medição. Há autores que afirmam ser os mediadores de pico de descargas parciais, entretanto está demonstrado que descargas tão baixa quanto 0,2pC pode ser detetada com um

circuito medidor de rádio interferência(22).

Os detetores usados para medição de descargas parciais são normalmente calibrados por injeção de cargas em quantidade conhecida, na forma de pulsos saturados ou através dos terminais de entrada do instrumento detetor(fig. 3.8a) ou em paralelo com a amostra para ensaio(fig. 3.8b). Nessas figuras, a carga de calibração qcal está representada pela tensão degrau e_q em série com uma pequena capacitância C_q (qcal = $e_q C_q$), C_o é a amostra para ensaio, C_k o capacitor de acoplamento, Z_d é a impedância de detecção, e C_p a capacitância de dispersão em paralelo com Z_d .

A carga de calibração ou uma descarga parcial na amostra produz uma queda de tensão nos terminais da impedância de detecção e em muitos instrumentos, é esse pulso de tensão que é amplificado e medido(22).

O sistema de medição elétrica entretanto, foi calibrado de acordo com as especificações da ASTM e ABNT. Por esse procedimento encontramos que 1pC corresponde a 14mV no osciloscópio.

3.4. REDUÇÃO DAS PERTURBAÇÕES

A redução das perturbações foi conseguida pela filtragem das fontes de energia para os circuitos de ensaio e de medição. Também com essa finalidade foi construído um recinto eletromagneticamente blindado. Os filtros de passagem baixa foram projetados para uma frequência de corte de 1kHz. Esses filtros e os transformadores isoladores estão colocados em caixas metálicas.

As perturbações podem entrar no circuito de teste por meio

de múltiplas conexões de terra. A corrente de interferência flui no sistema de terra podendo entrar em uma conexão e sair na outra. Em princípio, essa perturbação provocada pela conexão de terra em pontos diferentes pode ser eliminada por meio de uma única conexão de terra.

Embora a fonte de alimentação estivesse ligada ao circuito de ensaio, porém com tensão zero, sempre apresentava ruídos, os quais são provenientes do próprio instrumento de medição ou do circuito de amplificação do detetor de descargas parciais. Entretanto, esse sistema de detetação e de medição é capaz de registrar iguais ou maiores do que 0,2pC.

3.5. PRINCÍPIOS BÁSICOS USADOS PARA DETEÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS

A medição de descargas proporciona um teste sensível na detetação da propagação de ramificações em isolantes polimerizados. As aplicações das técnicas de detetação de descargas dependem das condições nas quais ocorrem estas descargas, nos diferentes tipos de isolamento do comportamento das descargas, isto é, em suas grandezas e frequências de repetição em termos de formas de ondas das tensões aplicadas e nas formas diferentes de deterioração e ruptura causada pelas descargas. As descargas parciais em um corpo de prova causam dissipação e transferência de cargas no local de ocorrência, dando origem a impulsos elétricos de corrente e uma súbita queda de tensão nos terminais do corpo de prova.

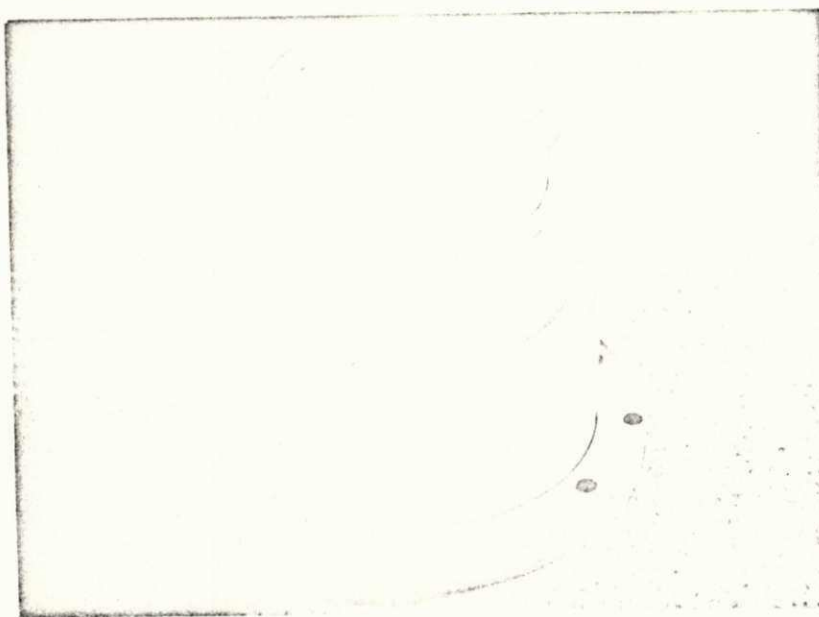
O comportamento das descargas internas, para tensões alternadas, podem ser representado pela sessão de um dielétrico sólido e o seu circuito equivalente corresponde conforme figura 3.9a e 3.9b, respectivamente. A figura 3.10 representa a seqüência de descarga do circuito equivalente da figura 3.9b. Quando uma tensão alternada V_c é aplicada através da cavidade e atinge a tensão de ruptura U_{\pm} , descargas ocorrem na cavidade em cada meio ciclo, como se o capacitor C_c do modelo da figura 3.9b fosse instantaneamente curto-circuitado. Essas descargas provocam uma queda de tensão ΔV , reduzindo instantaneamente a tensão U_{\pm} para V_{\pm} momento em que a descarga se extingue. A tensão U é a tensão de iniciação e V é a tensão de extinção. Com a extinção da descarga, a tensão sobre a cavidade aumenta outra vez(23).

A detetação de descargas está baseada nos princípios da detetação direta Fig. 3.8a. A detetação direta se caracteriza pela transformação de impulsos de corrente, causados pelas descargas, em impulsos de tensão, os quais são amplificados e medidos. Esses impulsos de tensão, que aparecem através da impedância de detetação, em nosso caso constituída por uma resistência de $3,3K\Omega$.

No próximo capítulo descreve-se minuciosamente o procedimento dos ensaios, enfatiza-se novamente o arranjo experimental, apresenta-se os resultados obtidos e posteriormente discute-se os resultados e as observações colhidas durante os ensaios.

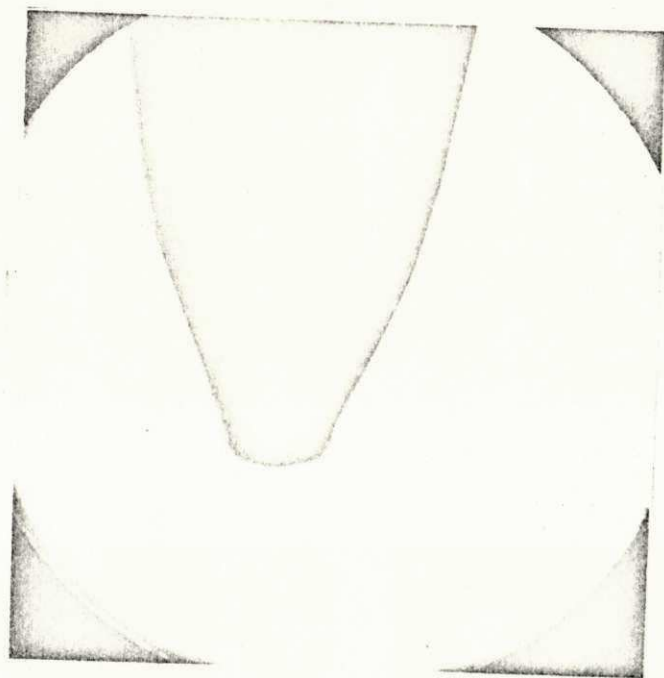


a) c)

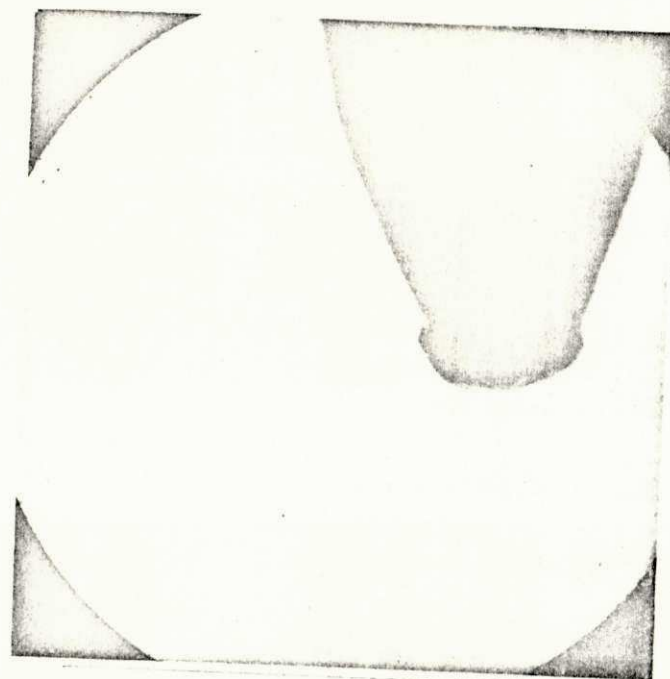


b)

Fig. 3.1. Conjunto molde-câmara de vácuo necessário a fundição das amostras.



a)



b)

Fig. 3.2. - Agulhas usadas como eletrodos parabólicos (MAG. x 320)

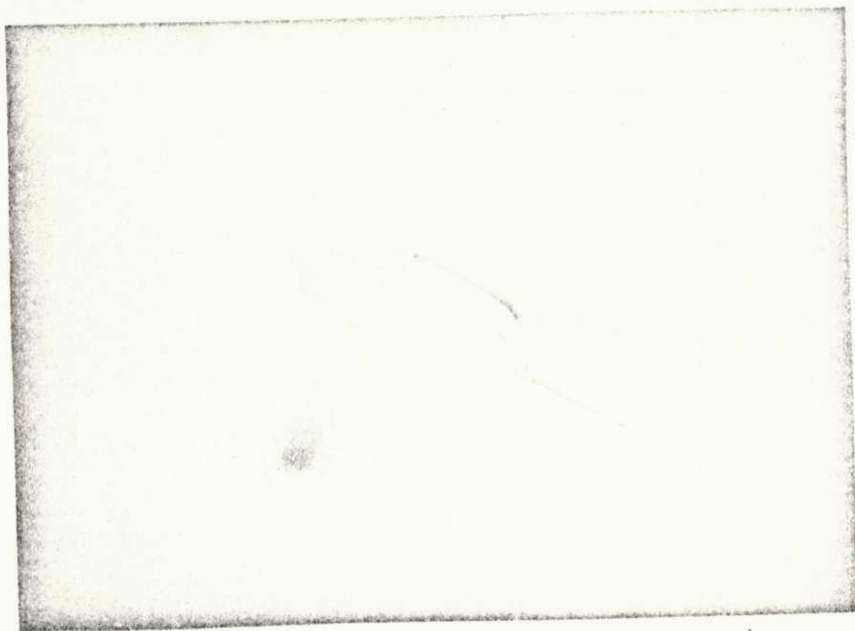


Fig. 3.3. - Elettrodo base de latão
com agulha.

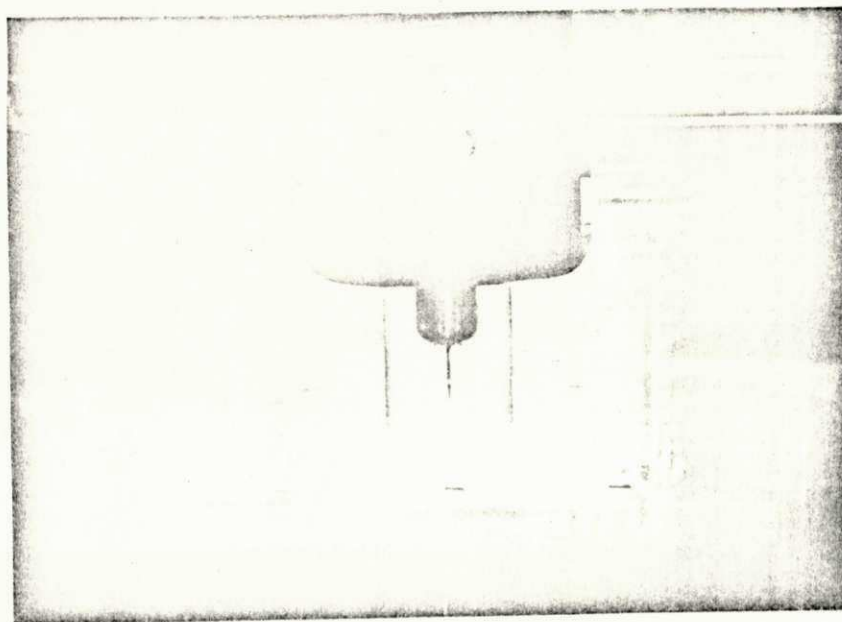


Fig. 3.4. - Conexão da amostra
com condutor de alta tensão.

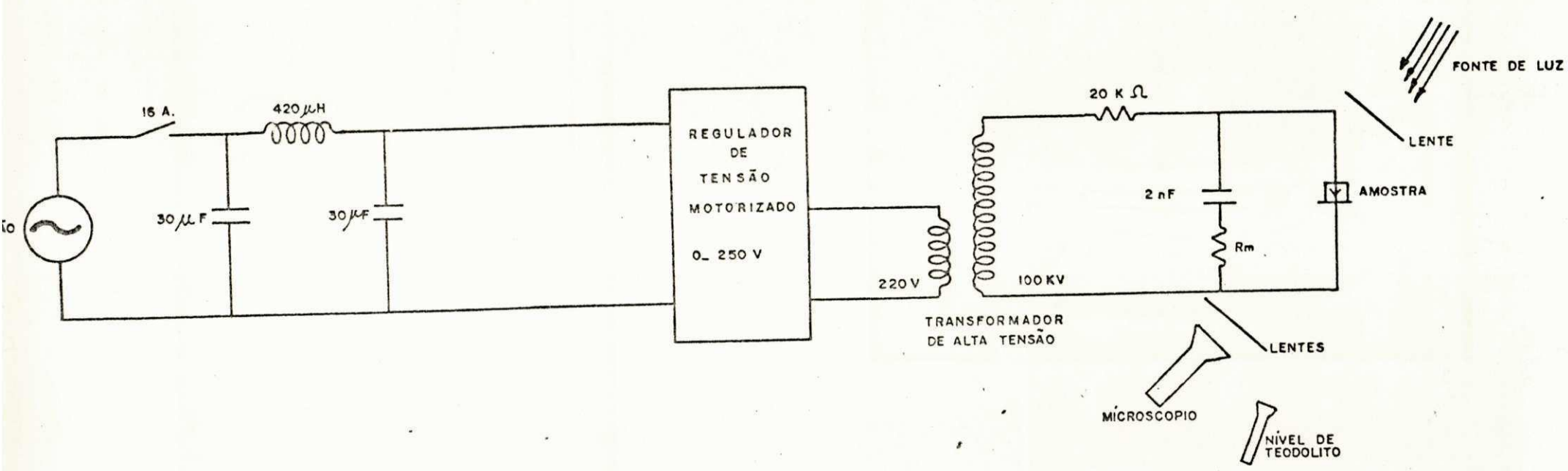


FIGURA. 3.5 ARRANJO EXPERIMENTAL DOS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS.



Fig. 3.6. - Vista parcial do arranjo experimental.

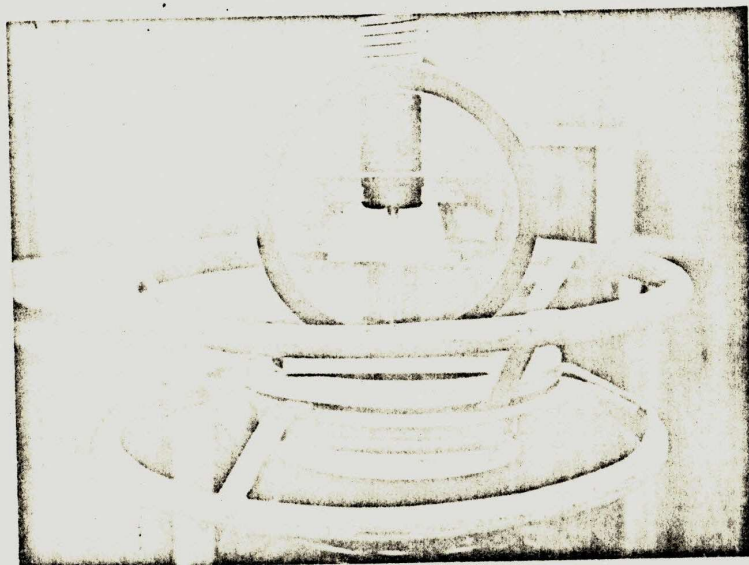


Fig. 3.7. - Câmara de ensaio e equalizador de tensão.

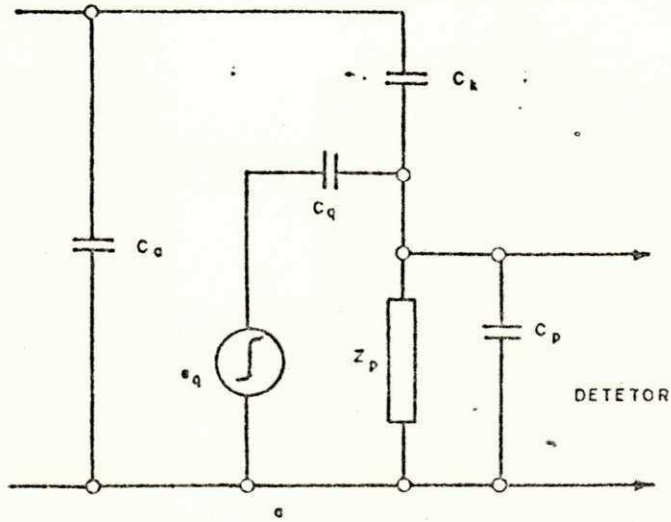


FIGURA. 3.8a - CALIBRAÇÃO INDIRETA

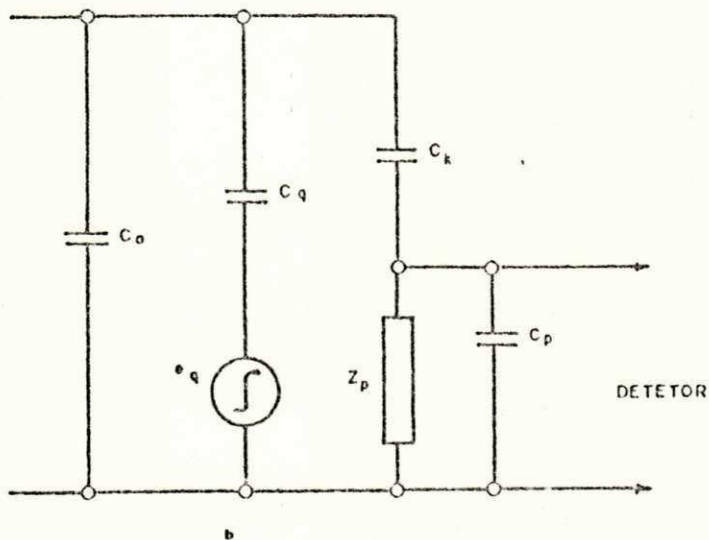


FIGURA. 3.8b - CALIBRAÇÃO DIRETA

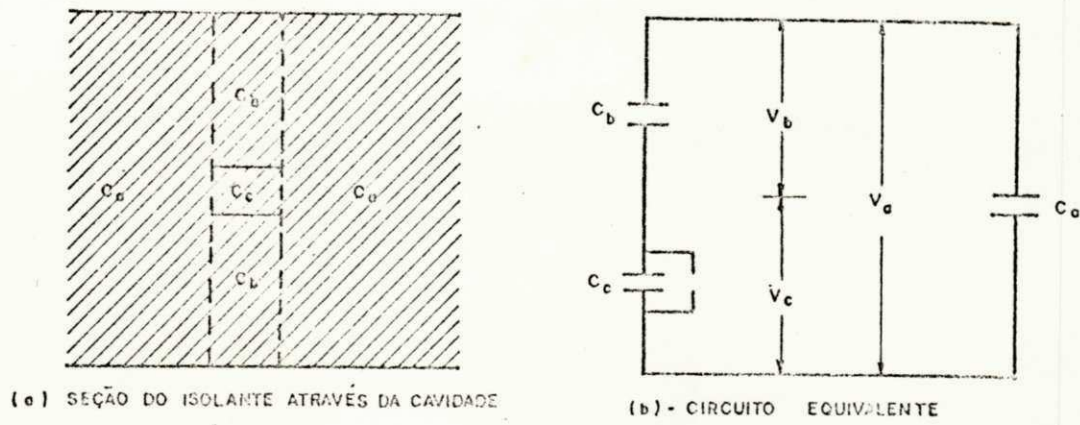


FIGURA 3.9 - MODELO DE UMA CAVIDADE EM UM ELEMENTO SÓLIDO

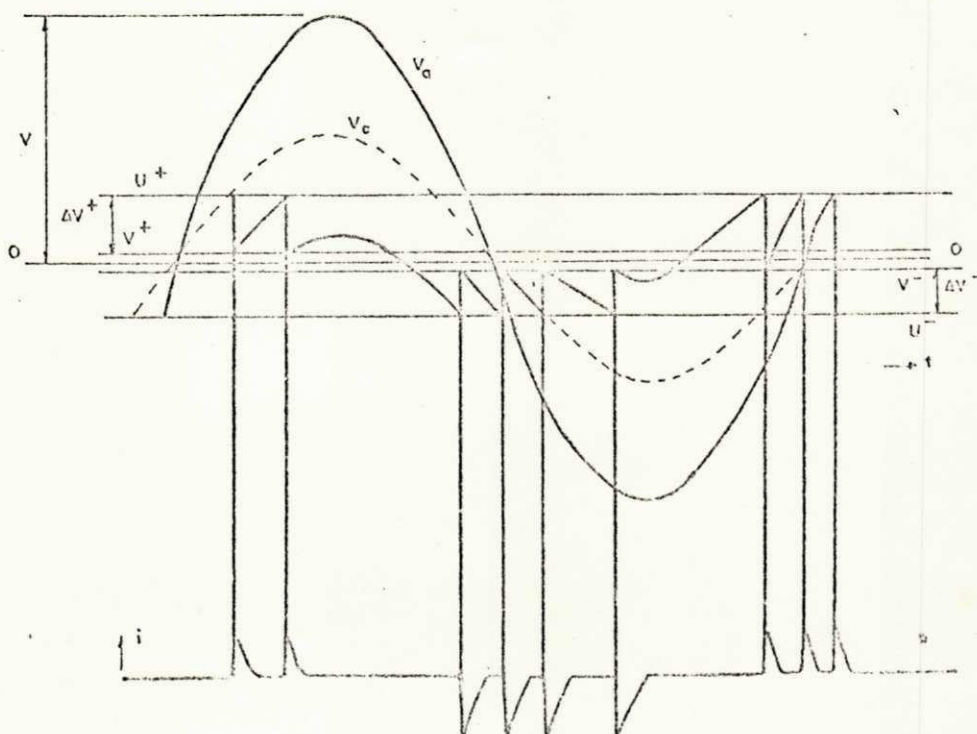


FIGURA 3.10 - REPETIÇÃO DE DESCARGAS INTERNAS

TABELA 3.1

TEMPO DE ENDURECIMENTO	TEMPERATURA DE ENDURECIMENTO	CONTRAÇÃO DO VOLUME
14 - 20 horas	100°C	0,5 - 0,8 %
14 horas	120°C	1,0 - 1,2 %
7 - 10 horas	140°C	1,3 - 1,5 %
7 horas	160°C	1,5 - 1,9 %
2 - 3 horas	180°C	1,9 - 2,2 %
1 - 2 horas	200°C	2,2 - 2,3 %

TABELA 3.II

ESQUEMA PARA RESFRIAMENTO DA TEMPERATURA DA ESTUFA COM O TEMPO DE 8 horas	
TEMPO (horas)	REDUÇÃO DA TEMPERATURA PARA :
0, 00	115 °C
0, 50	109 °C
1, 00	90 °C
1, 50	80 °C
2, 00	72 °C
2, 50	67 °C
3, 00	56 °C
3, 50	50 °C
4, 00	DESLIGAR A ESTUFA E ABRIR A PORTA
8, 00	RETIRAR AS AMOSTRAS

RUPTURA ELÉTRICA DE RESINA EPOXY -
UM ESTUDO EXPERIMENTAL

A resina epoxy é um composto químico sintetizado a menos de meio século, a sua aplicação como dielétrico é ainda mais recente. Pesquisas em resina epoxy como isolante têm sido desenvolvidas em todo o mundo, mas ainda existem muitas dúvidas sobre os processos de formação e crescimento de cavidades, como também, sobre o processo de crescimento dos ramos elétricos, etc.

Para o estudo da resina epoxy, foi usada a configuração pino-plano, obtendo-se assim, campos elétricos altamente divergentes com tensões não muito altas. Resultados experimentais obtidos com a configuração pino-plano são bastante escassos. O estudo da ruptura elétrica em resina epoxy vem sendo intensificado nos últimos anos e, existem ainda poucas medições sobre essa ruptura.

Já vimos anteriormente que existem um campo elétrico crítico. O objetivo desse trabalho é medir o campo elétrico crítico da ruptura, com a configuração tipo pino-plano em resina epoxy. Shibuya et al(9) usaram em seus experimentos a mesma configuração, porém com o raio de curvatura bem menor, determinando assim, uma região muito diferente daquela usada nesse trabalho.

4.1

PROCEDIMENTO DOS ENSAIOS

Efetuarão-se as medições do campo elétrico de ruptura, com a configuração pino-plano, em resina epoxy(Araldite B), usando o

circuito elétrico de ensaio mostrado na fig. 3.5. Na figura visualiza-se numa vista parcial os equipamentos utilizados, enfatizando bem o arranjo experimental para se realizar um ensaio.

A amostra é colocada na câmara de ensaio retirando-se uma das tampas laterais, em acrílico. A câmara é constituída por um tubo de PVC de 250mm de comprimento e 300mm de diâmetro. O plano aterrado no interior da câmara é formado por uma placa plana de alumínio. O plano aterrado está eletricamente ligado a outra placa no lado externo. E essa, aterrada por um cabo de cobre a um único ponto de aterramento do circuito. A amostra é fixada por intermédio de uma placa e parafusos em acrílico. Entre a amostra e o plano aterrado colocou-se sempre uma chapa de acrílico com espessura de 1.5mm, evitando-se que as rupturas mais bruscas não danificassem o plano aterrado.

O campo elétrico no interior da câmara é bastante intenso. Óleo de transformador foi utilizado, suprimindo-se o corona e seus efeitos. Não foi usado na confecção da câmara nenhum acessório de metal, que pudesse distorcer o campo elétrico.

A tensão é aplicada à amostra pela excitação do primário do transformador de alta tensão. O transformador Messwandler Bau com potência de 5KVA e tensão 220/100KV está conectado eletricamente por intermédio de um condutor flexível ao capacitor de marca Biddle de 2000 μ F e isento de descargas parciais até 120KV. A energização da amostra é feita por intermédio de um condute metálico, tendo diâmetro de aproximadamente 50mm, evitando-se maiores forças de campo e conseqüentemente o corona. Uma resistência de aproximadamente 20K Ω é usada na saída do

transformador. Essa resistência tem a finalidade de limitar a corrente no instante da ruptura. Na conexão do resistor com o condutor metálico usou-se um equalizador de tensão. A finalidade de desse equalizador é atenuar o campo elétrico nessa conexão.

A excitação ou alimentação do transformador, em baixa tensão, é feita por meio de um regulador de tensão motorizado, fabricação Ferranti, potência de 10KVA e tensões 220V/0-240V. O regulador de tensão é dotado de um relé de sobrecorrente, ajustável entre 14 e 42A.

A frequência nominal da rede é 60Hz. Um filtro elétrico passa baixa, tipo π , está colocado na saída do regulador, filtrando os impulsos vindos na rede de alimentação.

Para as observações visuais, usou-se em um dos lados uma fonte de luz concentrada e no outro, um microscópio e um nível de teodolito.

Quando descargas parciais acontecem na amostra, causam dissipação e transferência de cargas no local de ocorrências, tendo origem a queda de tensão nos terminais do corpo de prova. Esses impulsos de correntes, causados pelas descargas, são transformados em impulsos de tensão, os quais são amplificados e medidos. A medição dos níveis das descargas parciais foi feita tanto no osciloscópio Tektronix como no indicador analógico de descargas do detector.

O detetor de descargas parciais está conectado ao circuito através do resistor de medição ligado em série com o capacitor de acoplamento.

Todos os equipamentos estão ligados ao mesmo ponto de ater

ramento, evitando-se assim, os chamados "loops" no aterramento. A sala utilizada para ensaio é totalmente blindada e aterrada suprimindo-se as interferências eletromagnéticas no circuito.

4.2. RESULTADOS

No presente trabalho, exemplos de amostras com ramificações que guiaram a ruptura elétrica completa são mostrados na fig. 4.1. Nas observações visuais realizadas com as amostras antes da aplicação de tensão, verificou-se que essas amostras não apresentavam imperfeições. Em contrapartida, com a aplicação de tensão as cavidades aparecem e crescem, transformando-se em ramos que continuam crescendo até alcançar o eletrodo aterrado.

Na tabela 4.I são mostrados os parâmetros usados com base nesse trabalho. Após a utilização das agulhas nos ensaios não foi possível medir o raio de curvatura das mesmas. Com as descargas há um desgaste no eletrodo (agulha) e quando a ruptura é de grande intensidade o eletrodo sofre um desgaste mais intenso. O raio de curvatura médio usado, foi calculado com base no raio de outras quarenta agulhas. Os intervalos do raio de curvatura foram encontrados com uma confiança de 95%. O raio de curvatura conforme a confiança deverá ficar entre $(47,525 < 50,110 < 62,625) \mu\text{m}$. E com essa faixa no raio de curvatura foi calculado o campo elétrico aparente.

A fig. 4.1. mostra a dependência entre o campo elétrico máximo e o tempo necessário à ruptura. O campo elétrico máximo na ponta do eletrodo foi calculado conforme equação 2.1.b., página

29. Essa equação fornece o campo elétrico máximo na ponta do eletrodo quando esse se apresenta no formato parabólico. Em algumas amostras, o tempo de aplicação de tensão não foi suficiente para haver a ruptura elétrica. Em outros ensaios, não foi possível realizar a medição do tempo com precisão. Os resultados dessas amostras não foram utilizados na confecção da fig. 4.1.

Em todos os ensaios realizados nesse trabalho, não foram observadas descargas esporádicas, isto é, descargas parciais isoladas com níveis baixos, as quais não apresentavam uma frequência de repetição. Foi observado poucas vezes, que essas descargas não aconteciam por períodos de até cinco horas e os níveis dessas descargas raramente ultrapassavam a 10pC.

As ramificações sempre ocorreram com níveis de descargas parciais superiores a 100pC, às vezes atingindo o nível de até 500pC(6). As descargas com intensidade menor do que 50pC não provocaram ramificações visíveis. Quando estão acontecendo descargas, o ramo ou canal apresenta-se mais largo, retornando às vezes, ao seu diâmetro anterior. Foi observado também, que desligando-se a fonte de tensão a ramificação levará maior tempo para completar a total ruptura, essa observação foi confirmada por Olyphant(4).

4.3. DISCUSSÃO

A presente experiência mostra que ramificações podem crescer em isolantes sólidos e particularmente, em resina epoxy. A aplicação da tensão e o raio de curvatura são os mais decisivos

fatores que afetam a formação e crescimento dos ramos, também confirmado por Shibuya(8).

A fig. 4.1. mostra o resultado das observações experimentais, tendo como base os dois fatores mais decisivos na deterioração de um material isolante, a tensão aplicada e o raio de curvatura do eletrodo. Nessa figura, pode-se notar que um certo período de tempo é necessário para a formação dos ramos. Esse tempo para a formação de cavidade e conseqüentemente a propagação das ramificações, está intimamente relacionado com o campo elétrico máximo na ponta do eletrodo, campo aparente(nos cálculos não foi considerado o efeito das cargas espaciais).

A fig. 4.1. é uma confirmação da hipótese sugerida por Shibuya et al(8 e 10). O resultado experimental desse trabalho também sugere que o campo elétrico de 3×10^8 V/m na ponta do eletrodo é o campo elétrico crítico. A deterioração não aparece nas amostras isentas de cavidades, se o campo elétrico máximo aplicado é inferior ao campo crítico.

Referente ao processo de iniciação, não se analisou antes do ensaio a aparência microscópica da interface eletrodo-isolante das amostras. A interface sempre foi analisada com o olho desapaarelhado. Entretanto, se concorda com os postulados apresentados por Shibuya(8 e 10):

- 1) Se a interface é perfeita, essa deve ser alterada a fim de dar origem a microcavidade.

- 2) Essa microcavidade que apareceu agora aumenta de tamanho até que as descargas parciais sejam iniciadas. Definindo assim, o final do período de iniciação.

Quanto aos ramos elétricos, esses parecem crescer irregu-

larmente aos saltos. Acredita-se que o aumento da pressão combinado com a onda térmica produzida pelas descargas sejam responsáveis pela ruptura intrínseca local do material e a consequente propagação dos ramos(7). Essa suposição explica a observação de que quando está acontecendo descargas o ramo ou canal apresenta-se mais largo, retornando às vezes ao seu diâmetro anterior. Algumas das ramificações observadas estão mostradas nas figuras 4.2, 4.3 e 4.4. Nessas figuras pode-se observar que as ramificações crescem tridimensionalmente em direção ao eletrodo plano aterrado.

Os níveis de tensão aplicada, em valores eficazes, foram entre 30 e 40KV e nesse trabalho não foi observado a influência do material usado com o eletrodo. Embora se tenha constatado o desgaste desse eletrodo quando foi submetido a ensaio.

CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Uma técnica para investigar os efeitos das descargas internas, da formação de cavidade e do crescimento das ramificações, desde da elaboração dos moldes à confecção das amostras, foi desenvolvida nesse trabalho.

Com a configuração ponta-plano foi possível obter campos elétricos altamente divergentes. O eletrodo(ponta) usado tinha o formato parabólico. Os resultados experimentais obtidos são mostrados na tabela 4.1. Com o campo elétrico aparente na ponta do eletrodo e o tempo para haver a ruptura completa do dielétrico foi traçado o gráfico mostrado na figura 4.1. Essa figura confirma a hipótese sugerida por Shybuya et al(8). O resultado experimental desse trabalho também sugere ser o campo elétrico de 3×10^8 V/m na ponta do eletrodo o campo elétrico crítico. A deterioração não aparece em amostras isentas de cavidades, se o campo elétrico aparente máximo aplicado for inferior ao campo elétrico crítico.

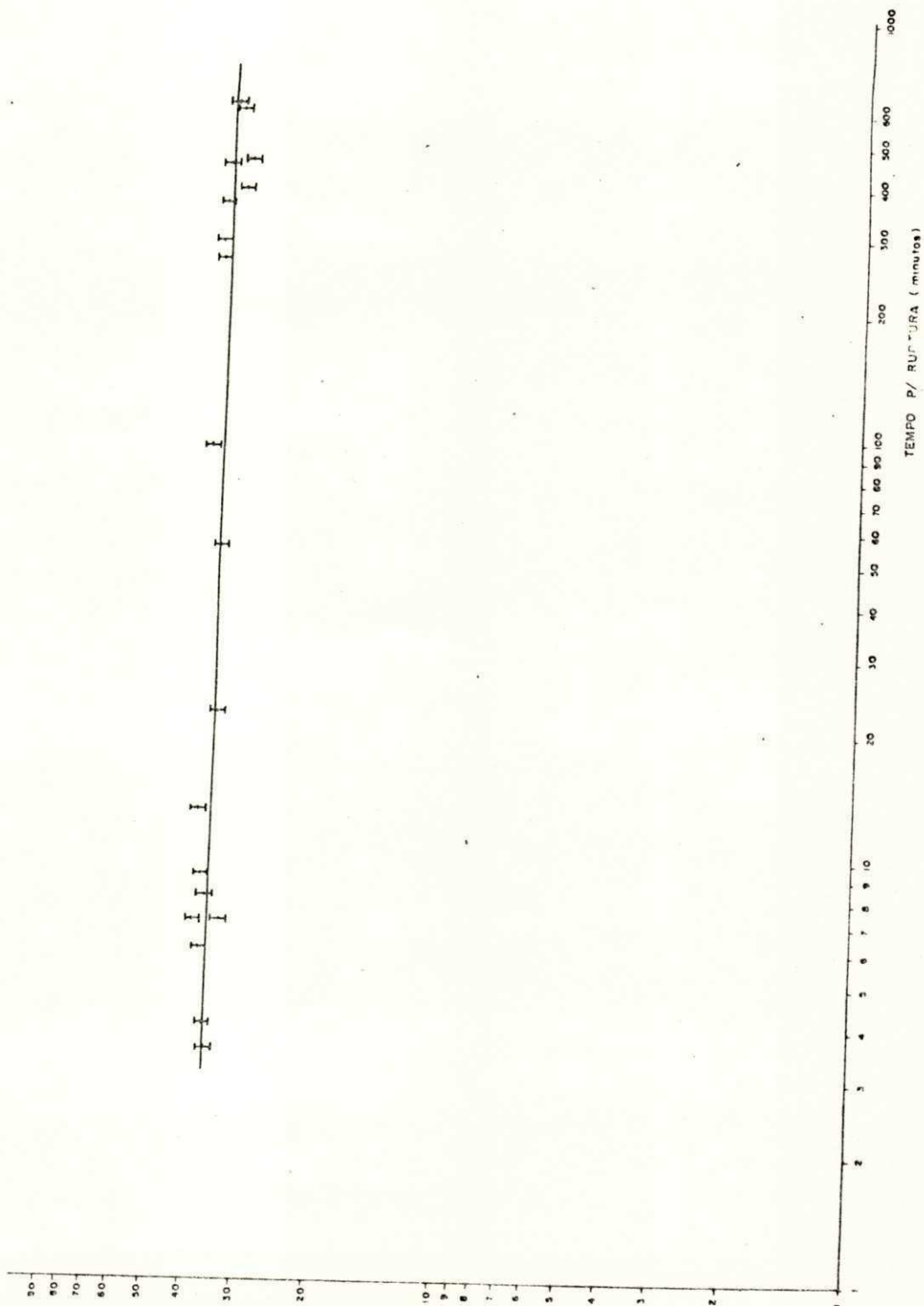
Por conseqüência os métodos e as técnicas apresentadas, objetivando a determinação do campo elétrico crítico são válidos para o estudo das propriedades elétricas dos isolantes sólidos.

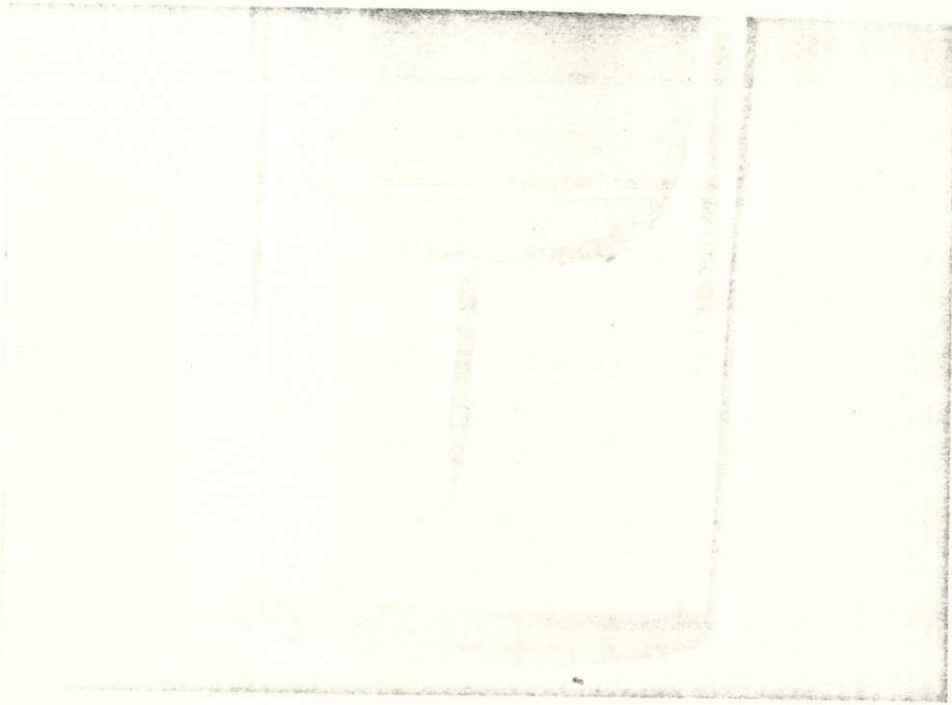
Dos resultados e observações dessa investigação várias questões importantes não foram respondidas e seguem algumas sugestões objetivando a determinação do campo elétrico crítico e a conseqüente otimização de uso desse tão importante isolante.

- 1) Estudo da influência do raio de curvatura na determinação do campo elétrico crítico. O raio de curvatura deve

rã abranger uma grande faixa de variação.

- 2) Estudo dos efeitos produzidos pelos parâmetros de fundição, tais como, tempo de cura, tempo de recozimento, cavidades, impurezas, etc., na determinação do campo elétrico crítico.





a)



b)

Fig. 4.2. - Amostra com ramificações
(fotos com ângulo diferen
te-mesma amostra)

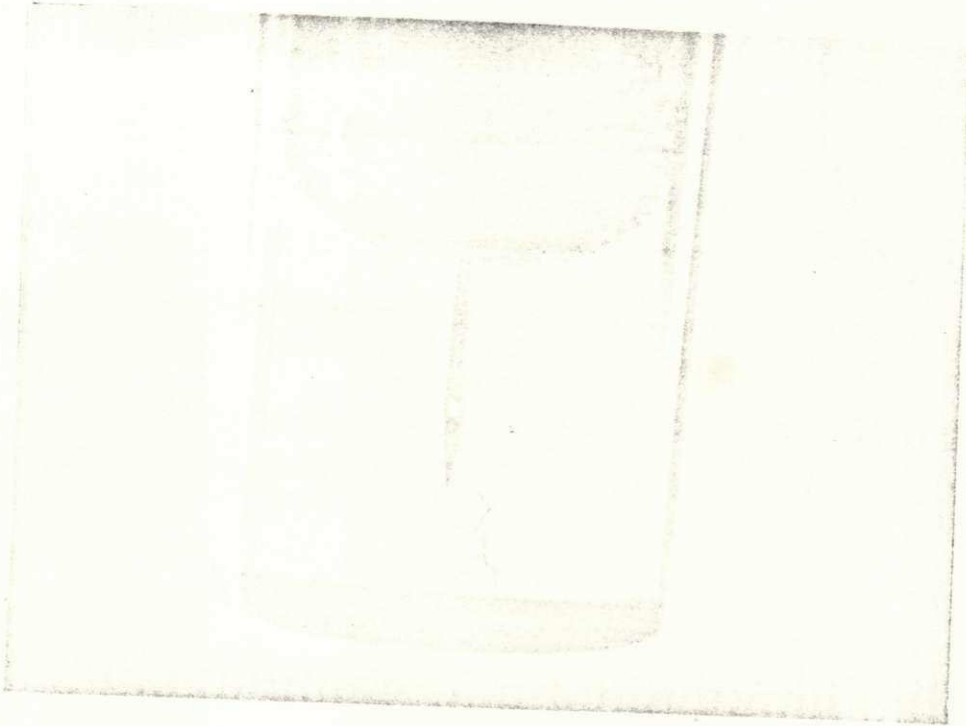


Fig. 4.3. - Amostra com ramificações

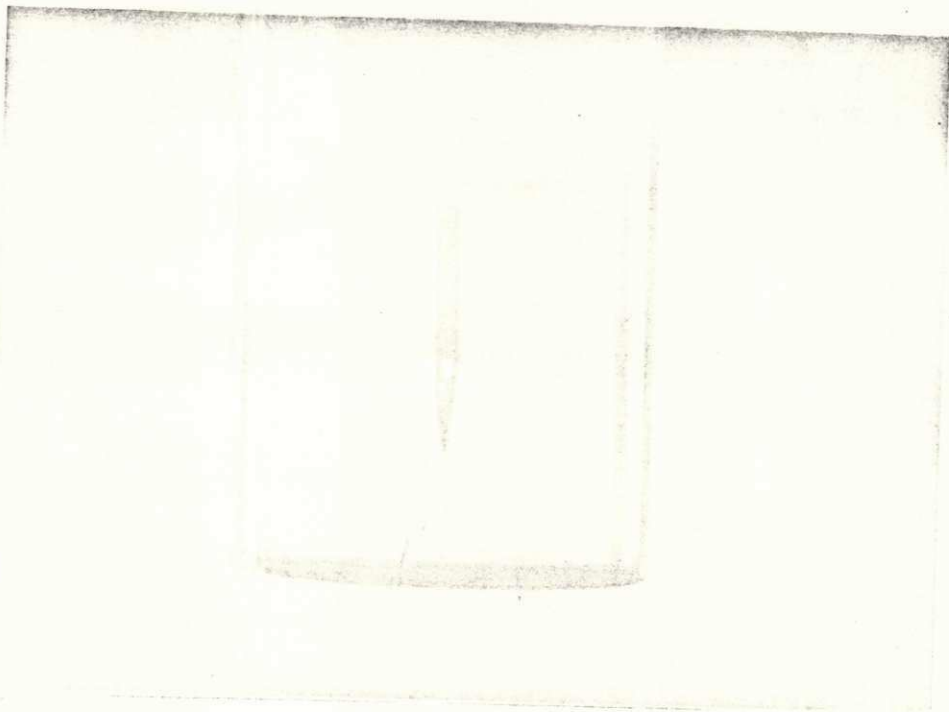


Fig. 4.4. - Amostra com ramificações

TABELA

4.1.

Nº DA AMOSTRA	d (mm)	RAIO DE CURVATURA (MÉDIO EM μm)	TENSÃO (KV) (PICO)	E_{max} ($\times 10$ V/m) (MÉDIO)	TEMPO DE APLICAÇÃO DE TENSÃO	TEMPO P/A RUP-TURA (MINUTOS)
21	7,0	50,11	51,4	3,52	255	255
22	7,0	50,11	56,6	3,87	7	7
23	7,0	50,11	54,0	3,70	6	6
24	7,0	50,11	54,0	3,70	44-104	44-104
25	7,0	50,11	55,3	3,79	13	13
27	7,0	50,11	54,0	3,70	9	9
28	7,0	50,11	52,7	3,61	226-766	226-766
29	7,0	50,11	52,7	3,61	8	8
30	7,0	50,11	51,4	3,52	282	282
31	7,0	50,11	50,1	3,52	22	22
32	7,0	50,11	48,9	3,35	7	7
33	7,0	50,11	47,6	3,26	-	-
34	7,0	50,11	47,6	3,26	170 - 655	170 - 655
35	7,0	50,11	46,3	3,17	434	-
36	7,0	50,11	47,6	3,26	585	585

TABELA 4.1 (CONTINUAÇÃO)

Nº DA AMOSTRA	d (mm)	RAIO DE CURVATURA (MÉDIO EM μm)	TENSÃO (KV) (PICO)	E_{max} ($\times 10$ V/m) (MÉDIO)	TEMPO DE APLICAÇÃO DE TENSÃO	TEMPO P/A RUP-TURA (MINUTOS)
37	7,0	50,11	46,3	3,17	374	374
38	7,0	50,11	44,5	3,04	439	439
39	7,0	50,11	42,4	2,90	4000	-
40	7,0	50,11	54,0	3,70	92	92
41	7,0	50,11	50,1	3,52	54	54
42	7,0	50,11	48,9	3,35	568	568
43	7,0	50,11	48,9	3,35	400	-
44	7,0	50,11	48,9	3,35	1320	-
45	5,0	50,11	51,4	3,67	6	6
46	5,0	50,11	50,1	3,59	4	4
47	5,0	50,11	48,9	3,50	345	345
48	5,0	50,11	47,7	3,42	126	-
49	5,0	50,11	47,7	3,42	429	429
50	5,0	50,11	49,8	3,55	3,5	3,5

REFERÊNCIAS

- 1) T. W. Dakin, "Application of epoxy resins in electrical apparatus". IEEE Trans. Electrical Insulation, Vol. EI-9, pp. 121 - 128, 1974.
- 2) J. H. Mason, "Electrophotography of internal discharges in dielectrics, Nature, Vol. 164, Nº 4167, pp. 461 - 552, 1949.
- 3) J. H. Mason, "The behaviour of electrical discharges over the surface of sheet insulation", Gas discharges and the electricity supply industry, Butterworths, pp. 428-438, 1962.
- 4) M. Olyphant Jr., "Breakdown by treeing in Epoxy Resins". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. 82, pp. 1106 - 1112, December, 1963.
- 5) K. Nakanishi, S. Hirabayashi, "Phenomena And Mechanisms of Tree Inception In Epoxy Resins", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-14, Nº 6, pp. 306-314, December, 1979.
- 6) G. Bahder, T. W. Dakin, J. H. Lawson, "Analysis of treeing Type Breakdown, CIGRÉ paper, 15-05, 1974.
- 7) C. Laurent, C. Mayoux, "Analysis of the Propagation of Electrical Treeing Using Optical And Electrical Methods", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. EI-15, Nº 1, February, 1980.

- 8) Y. Shibuya, S. Zoledziowski, J. H. Calderwood, "Void Formation and Electrical Breakdown In Epoxy Resin", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-96, N^o 1, Janua-ry/February, 1977.
- 9) N. Shimizu, K. Hosi, M. Kosaki, "Space Charge Behaviour and Luminescence Phenomenon in Polymers at 77K", IEEE conf. Record of 1978 IEEE Int. Symposium on Electrical Insulation, pp. 212 - 215, 1978.
- 10) Y. Shibuya, S. Zoledziowski, J. H. Calderwood, "Light Emis-sion and Deterioration in Epoxy Resin Subjected to Power Frequency Electric Fields", Proc. IEE, Vol. 125, N^o 4, April, 1978.
- 11) A. B. Borishade, "The Development of Electrical Discharges in Simulated Tree Chamels", IEEE Trans. Electr. Insulation, Vol. EI-12, N^o 5, October, 1977.
- 12) R. J. Densley, T. S. Sudanshan, "Some Results of Partial Discharges Measurements. During the Growth of Electrical Trees", 1977 Anual Report Conference on Electrical Insulation and Dieletric Phenomena, 330 - 338, 1979.
- 13) R. M. Eichhorn, " Treeing in solid extruded eletrical insu-lation", IEEE Trans. on Elect. Insulating, Vol. EI-12, N^o 1 February, 1976.

- 14) Fumitoshi Noto, "Research on water treeing in polymeric insulating materials", IEEE Trans. on Elect. Insulating, Vol. EI-15, Nº 3, pp. 251 - 258, 1980.
- 15) G. C. Stone, Thesis for the Degree of master "Statistical Analysis of Accelerated aging testes on solid electrical insulation.
- 16) N. Yoshima, F. Noto e K. Kikuchi, "Growth of water trees in Polyethylene and Silicone Rubber by water Electrode". IEEE Trans. on Elect. Vol. EI-12, Nº 6, pp. 411-416, 1977.
- 17) R. Miller e I. A. Black, "Partial discharge measurements over the frequency range 0,1Hz to 50Hz, IEEE Trans. Electr. Insulating, Vol. EI-12, Nº 3, pp. 224 - 233, 1977.
- 18) Y. Shibuya, Thesis of PhD, Electrical prebreakdown Phenomena of epoxy resin in highly nonuniform fields, 1976.
- 19) J. H. Mason, "Breakdown of solid dielectrics in divergent fields". Proc. IEE, Vol. 102, p^t.C, pp. 254-263, 1955.
- 20) Catálogo Ilustrativo da Ciba-Geigy Química S/A. Plásticos e Aditivos
- 21) Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), P.MB-575/1972, Medições de descargas parciais.

- 22) E. M. DEMBINSKI e J. L. DOUGLAS, "Calibração and comparison of parcial Discharge and Radio-Interference Measuring Circuits", Proc. IEE, Vol. 115, Nº 9, pp. 1332-1340, 1968.

- 23) J. H. Mason, "Discharge detection and measurements", Proc. IEE, Vol. 112, 1965, pp. 1407 - 1423.