

*Este exemplar corresponde
a redação final da Tese defen-
dida por Maria Zanin e apro-
vada pela Comissão julgadora
em 01/03/84*

Ioshiaki Doi

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DOS EFEITOS
DA TENSÃO DISRUPTIVA DE IMPULSO
ATMOSFÉRICO EM MATERIAIS ISOLANTES

MARIA ZANIN

Orientador: IOSHIAKI DOI

Tese apresentada à Faculdade de Engenha-
ria de Campinas, da Universidade Esta-
dual de Campinas, UNICAMP, como parte
dos requisitos exigidos para a obtenção
do título de MESTRE EM CIÊNCIAS

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE CAMPINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

março 1984

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos aos colegas da FEC e da UFSCar, pela colaboração no trabalho.

ÍNDICE

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	01
CAPÍTULO 2 - ASPECTOS TEÓRICOS GERAIS	05
2.1 - Introdução	06
2.1.1 - Função de um material isolante	06
2.1.2 - Escolha de um material isolante	09
2.1.3 - Degradação dos materiais isolantes	09
2.2 - Considerações sobre as sobretensões	11
2.2.1 - Sobretensões atmosféricas	11
2.2.2 - Sobretensões de manobra	12
2.2.3 - Sobretensões de frequência industrial	12
2.2.4 - Influências das sobretensões nas instalações	13
2.3 - Considerações sobre processos causadores de falta elétrica em sistemas de isolação	13
2.3.1 - Processos causadores de falhas devido a descargas	15
2.3.1.1 - Classificação das descargas parciais	15
2.3.1.2 - Processos decorrentes das descargas super ficiais	18
2.3.1.3 - Processos decorrentes das descargas inter nas	29
2.3.1.4 - Descarga corona	30
2.3.2 - Processo de ruptura devido a descargas tér- micas	31
2.3.3 - Ruptura devido a processos eletromecânicos	33
2.3.4 - Resumo dos processos de falhas em sistemas de isolação	34

2.4 - Considerações sobre determinação da degradação em materiais submetidos ao esforço elétrico..	34
2.5 - Considerações sobre materiais empregados em sistemas de isolamento elétrica	37
2.5.1 - Materiais cerâmicos	38
2.5.2 - Materiais polímeros	40
CAPÍTULO 3 - PARTE EXPERIMENTAL	47
3.1 - Materiais	48
3.2 - Sistemas de eletrodos utilizados	48
3.2.1 - Configuração do eletrodo placa-paralela ...	49
3.2.2 - Configuração do eletrodo ponta-placa	51
3.3 - Elaboração das amostras	51
3.4 - Medidas de tensão disruptiva crítica($V_{50\%}$) ..	58
3.5 - Aplicação de descarga elétrica sobre os materiais	59
3.6 - Análise pela absorção do infra-vermelho	60
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO	63
4.1 - Tensão disruptiva crítica de impulso	64
4.2 - Efeitos do meio isolante na tensão disruptiva crítica	71
4.3 - Influência da descarga elétrica em materiais isolantes sólidos	77
4.3.1 - Influência da descarga elétrica em polietileno de baixa densidade (PEBD)	77
4.3.2 - Influência da descarga elétrica em porcelana.	90
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO	100
APÊNDICE 1	103
APÊNDICE 2	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

RESUMO

A ação das descargas elétricas sobre os materiais isolantes provoca deterioração e perda de suas características elétricas, de forma lenta e gradual. O presente trabalho analisa o efeito que os vários tipos de meio isolante - polietileno de baixa densidade, polimetil metacrilato e porcelana - provocam na tensão disruptiva de impulso atmosférico e as influências que a descarga elétrica, originada por este tipo de impulso, provocam no polietileno de baixa densidade e porcelana. A investigação experimental envolveu a confecção de dois tipos de sistemas de eletrodos - placas paralelas e ponta-placa, onde os materiais foram introduzidos - a fim de serem submetidos a ação de descargas. As amostras foram analisadas ao microscópio ótico e o acompanhamento da degradação do polietileno foi realizado por meio de espectroscopia infra-vermelho. A partir da análise dos resultados obtidos foi possível detectar degradação e alteração da cristalinidade do polietileno, e formação de fase vítrea na porcelana.

ABSTRACT

Insulating materials subjected to electrical discharges deteriorate gradually and can lose their electrical characteristics along the time. This work investigates the effect of some insulating materials - low density polyethylene, poly (methyl metacrylate) and porcelain - in breakdown voltage atmospheric and, also, the effect of the electric discharges (induced by the impulse) on the performance of the low density polyethylene and porcelain. The experimental work was carried out with two electrode systems - parallel plates and point-plate - within which the samples were inserted and subjected to electrical discharges. The samples were analysed in an optical microscope. The time dependent changes in the polyethylene were monitored by infrared spectroscopy. The analysis of the results showed degradation and changes in the degree of cristalinity of the polyethylene and formation of a vitreous phase in the porcelain.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O desempenho de qualquer instalação elétrica, tanto em baixa como em alta tensão, pode ser alterado por perturbações causadas por motivos de intervenção na aparelhagem de manobra, de danos que se verificam na instalação e de fenômenos de instabilidade das redes elétricas de alimentação.

Estas causas de perturbações podem ser dependentes entre si, no sentido de que qualquer uma delas pode dar origem às outras. Normalmente esses danos nas instalações são provocados por defeitos de natureza mecânica, envelhecimento dos materiais isolantes, sobrecorrentes e sobretensões.

Deste modo, um dos pontos básicos e importantes, em sistemas de transmissão de energia elétrica em alta tensão, é o conhecimento das características e o comportamento dos materiais isolantes elétricos utilizados nos equipamentos destes sistemas, quando solicitados a esses diversos fatores.

Assim, as sobretensões, que podem ser originadas por condições de operação ou por outras circunstâncias, provocam o surgimento de descargas elétricas, que uma vez iniciadas se propagam sobre todas as partes que compõem as instalações, danificando todos os materiais isolantes (sólidos, líquidos e gasosos). Desta maneira, as descargas elétricas deterioram estes materiais e provocam a perda de suas características elétricas, de forma lenta e gradual, reduzindo assim, a vida média dos equipamentos.

Além das descargas elétricas, existem outros mecanismos que causam deterioração nos materiais que compõem os sistemas de isolação, provocando a perda de suas características isolantes, principalmente da rigidez dielétrica.

Estes mecanismos, conhecidos como processos eletromecânicos, térmicos e eletroquímicos, além de dependerem das propriedades do material isolante também dependem das condições a que o sistema de isolação está sendo submetido.

A determinação desses mecanismos bem como a determinação das características de envelhecimento e do tempo de vida dos materiais isolantes são de importância crítica para a

escolha destes materiais em uma aplicação específica de engenharia.

Existem diversos ensaios de aceitação de material que são adotados para a escolha de um determinado material. Os mais conhecidos são os ensaios que envolvem testes de determinação de níveis de descargas parciais, testes de tensões de início de corona, ou ainda de tensão disruptiva crítica de impulso. Tais testes também são utilizados na verificação da qualidade do sistema de isolação empregado em equipamentos elétricos de alta tensão.

O desenvolvimento de pesquisas que envolvam o conhecimento básico das propriedades dos materiais atualmente empregados, a avaliação e o aperfeiçoamento de suas qualidades, e a implantação de tecnologia de materiais destinada a aumentar a eficiência dos equipamentos elétricos, torna-se no momento de fundamental importância para o país, devido à rápida expansão do setor elétrico nos últimos anos.

Até o momento, o desenvolvimento de tais pesquisas tem se direcionado ao estudo do comportamento dos materiais isolantes quando solicitados em tensão contínua ou em frequência industrial. Praticamente, não existem estudos que analisem a degradação destes materiais quando submetidos a tensões de impulso atmosféricos.

O presente trabalho tem por objetivo analisar o efeito que os vários tipos de meio isolante - polietileno de baixa densidade, polimetil metacrilato e porcelana - provocam na tensão de impulso atmosférico que o sistema pode suportar e as influências que a descarga elétrica, originada por um impulso atmosférico, provocam no polietileno de baixa densidade e porcelana.

No capítulo II desse trabalho são abordados os aspectos teóricos gerais da caracterização de material isolante e dos diversos mecanismos causadores de deterioração nestes materiais. São apresentados ainda algumas considerações sobre determinação da degradação em materiais submetidos ao esforço elétrico.

No capítulo III são apresentados a metodologia e os procedimentos utilizados durante o desenvolvimento do trabalho, ressaltando-se os cuidados necessários na elaboração das amostras.

No capítulo IV é realizada a análise e a discussão dos resultados experimentais obtidos.

No capítulo V são elaboradas as conclusões acerca dos resultados obtidos experimentalmente sobre os efeitos e as influências da tensão disruptiva de impulso atmosférico nos materiais isolantes estudados.

CAPÍTULO 2
ASPECTOS TEÓRICOS GERAIS

2.1 - INTRODUÇÃO

O conhecimento das características dos materiais permite que os profissionais ligados à área de desenvolvimento de projetos, esquematizem sistemas elétricos de funções específicas, com dimensões e pesos mínimos.

Para a caracterização de um material isolante, são consideradas diversas propriedades, conforme esquema do quadro um. A partir da análise destas propriedades é possível prever, com certa margem de tolerância, o desempenho do funcionamento do sistema projetado. Este, por sua vez, pode ser alterado pela influência de diversos fatores - alguns inerentes ao próprio material, outros às condições de uso - segundo ilustra o quadro dois. Tais fatores afetam as propriedades elétricas do material isolante, alterando dessa forma seus valores numéricos, cuja variação informa aspectos qualitativos do material.

2.1.1 - Função de um material isolante

A função dos materiais isolantes quando empregados em equipamentos e instalações elétricas é a de propiciar um isolamento elétrico seguro e suficiente entre os condutores bem como entre estes e as partes metálicas do equipamento ou da instalação. E.L. Brangato⁽⁶⁾ salienta em seu trabalho que a função principal de um material isolante é resistir ao esforço elétrico, mas que na maioria dos casos deve também suportar outros esforços, como por exemplo, esforços mecânicos e térmicos. É o caso de algumas aplicações onde certas propriedades exercem predominância sobre outras consideradas. Por exemplo, a condutividade de calor pode ter uma influência que transcenda suas propriedades mecânicas e elétricas.

De um modo geral, é esperado que um material isolante resista ao esforço elétrico a que é submetido, proporcione bom suporte mecânico e ainda não se altere frente a variações de temperatura e a ação dos diversos ambientes a que é exposto.

caracterização de um material isolante	mecânica	<ul style="list-style-type: none">-resistência à tração-resistência à compressão-resistência à cisalhamento-resistência à impacto-porosidade-absorção de umidade-dureza-facilidade de trabalho
	química	<ul style="list-style-type: none">-estabilidade de composição-resistências aos ácidos, al calis, ozona, óleos, calor, corrosão e umidade-combustibilidade
	têrmicas	<ul style="list-style-type: none">-resistência térmica-calor específico-coeficiente de dilatação-ponto de fusão
	elétricas	<ul style="list-style-type: none">-resistência de isolamento-rigidez dielétrica-constante dielétrica-fator de perdas dielétricas-resistência ao efeito de descargas parciais-condutividade

QUADRO I - PROPRIEDADES A SEREM CONSIDERADAS PARA A CARACTERIZAÇÃO DE UM MATERIAL ISOLANTE^(1,2,3)

<p>fatores que afetam as características elétricas de um material isolante elétrico</p>	<p>resistência de isolamento</p>	<ul style="list-style-type: none"> -temperatura -tensão elétrica aplicada -tempo -umidade -espessura do material -tipo do material
	<p>constante dielétrica</p>	<ul style="list-style-type: none"> -temperatura -frequência -tipo de ligação -estrutura do cristal -defeitos estruturais no dielétrico
	<p>fator de potência</p>	<ul style="list-style-type: none"> -tensão aplicada -frequência -temperatura -umidade -presença de carbono e óxidos -tipo do material
	<p>fator de perdas</p>	<ul style="list-style-type: none"> -tensão aplicada -corrente elétrica -tempo de aplicação
	<p>resistência ao efeito de descarga parciais</p>	<ul style="list-style-type: none"> -tipo de material do corpo de prova -material do eletrodo -configuração do campo -forma de onda de tensão -presença de impurezas -espessura -formas do corpo de prova -temperatura -pressão -umidade -tempo de aplicação da tensão -nível da tensão -velocidade de crescimento da tensão -frequência
	<p>rigidez dielétrica</p>	<ul style="list-style-type: none"> -estrutura do material -estado físico -umidade -temperatura -configuração do campo aplicado
<p>condutividade elétrica</p>	<ul style="list-style-type: none"> -estrutura do material -estado físico -umidade -temperatura -configuração do campo aplicado 	

QUADRO 2 - FATORES QUE AFETAM AS CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS DE UM MATERIAL ISOLANTE ELÉTRICO^(1,3,4,5,6)

2.1.2 - Escolha de um material isolante

Devido a grande diversidade dos materiais isolantes e ao fato de certos materiais isolantes apresentarem nítida superioridade sobre outros, a escolha adequada de um tipo de material a ser utilizado para uma aplicação específica em engenharia depende de diversos critérios e recomendações estabelecidas, os quais variam de autor para autor. Alguns autores propõem que a escolha do material isolante deve ser feita em cada caso particular em face das propriedades convenientes às necessidades ou características da instalação e do custo dos diversos materiais isolantes^(1,2). Enquanto outros recomendam que, além de se tentar uma perfeita combinação das propriedades elétricas, mecânicas, térmicas e químicas da isolação, deve ser considerada também a velocidade de envelhecimento dos materiais. Incluindo-se assim, os efeitos de umidade, oxidação, estabilidade térmica e outros fatores que aumentam a degradação química da isolação sobre as condições de uso. Enfatizam ainda que a velocidade de degradação deve ser compatível com o tempo de vida desejado para a instalação⁽⁶⁾.

2.1.3 - Degradação dos materiais isolantes

Os critérios com base nos quais se devem projetar os equipamentos elétricos não devem considerar somente os parâmetros que se referem ao funcionamento normal. Devem ser levadas em conta as causas diretas ou indiretas, que podem dar lugar a solicitações mais intensas modificadoras das condições de funcionamento⁽⁷⁾.

Existem diversas causas que podem provocar danos às instalações elétricas: defeitos de natureza mecânica, deterioração dos materiais isolantes, sobrecorrentes e sobretensões.

A deterioração dos materiais isolantes se identifica com a alteração das características dos materiais em função do tempo de uso. No caso específico dos dielétricos, observa-se uma redução da rigidez dielétrica do material. As causas principais desta deterioração estão relacionadas às solicitações

mecânicas, térmicas, eletrodinâmicas e dielétricas às quais o material está sujeito.

O processo de degradação da isolação de equipamentos, dispositivos, máquinas e componentes elétricos difere em cada sistema devido as diferentes utilizações e condições de operação. Alguns autores enfatizam que, embora a temperatura seja a causa mais frequente da degradação da isolação, ela não é o fator mais dominante^(6,8). Isto é evidenciado em diversas publicações^(9,10,11) onde são relatadas falhas em equipamentos elétricos submetidos a esforços de tensão (descargas elétricas superficiais ou internas) a esforço mecânico, a condições ambientais adversas ou ainda a contaminação química. Desta forma a vida de qualquer componente é muito dependente da magnitude e do desenvolvimento das descargas. Isto quer dizer que ela também depende do tipo da solicitação, da distribuição do campo elétrico, da grandeza e da homogeneidade do material (lacunas, contaminação tanto do material como de sua superfície), da forma da isolação e ainda das condições ambientais a que tal componente é exposto.

Dessa maneira, as partes que compõem determinadas instalações são afetadas pela degradação dos materiais isolantes decorrente dos esforços de sobretensões. Conforme o tipo de material utilizado (líquido, sólido ou gasoso) a perda de sua rigidez dielétrica se manifesta de modo permanente ou temporário.

Quanto ao comportamento dos isolamentos perante solicitações de tensão, estes podem ser subdivididos em:^(12,13)

- isolamentos auto-regenerativos, isto é, aqueles que recuperam a integridade de suas propriedades isolantes após uma descarga disruptiva. É o caso do ar, geralmente utilizado para isolamento externo.
- isolamentos não auto-regenerativos, isto é, aqueles que não recuperam suas propriedades isolantes ou as recuperam parcialmente. São usualmente utilizados para isolamento interno de equipamentos, compreendendo elementos sólidos, líquidos ou gases confinados.

2.2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE AS SOBRETENSÕES

Sobretensão do sistema é qualquer tensão variável no tempo, fase terra ou entre fases, que excede o valor especificado do correspondente à mais alta tensão contínua do equipamento(14).

Dependendo de sua origem, as sobretensões são classificadas em: sobretensões atmosféricas, sobretensões de manobra e sobretensões de frequência industrial(14,15).

A maior distinção entre estes tipos de sobretensões de ve-se a suas durações:

- sobretensões atmosféricas : vários microsegundos até um milisegundo;
- sobretensões de manobra : vários milisegundos até alguns ciclos;
- sobretensões de frequência industrial: vários ciclos até alguns segundos geralmente oscilatório com componentes harmônicos.

2.2.1 - Sobretensões atmosféricas

As descargas atmosféricas podem causar sobretensões ao longo de uma linha de transmissão, devido a três razões(16):

- incidência direta de uma descarga sobre um condutor fase;
- incidência direta de uma descarga sobre os cabos para-raios, torres ou equipamentos.
- por intermédio de descargas indiretas.

Os impulsos decorrentes de sobretensões atmosféricas se propagam ao longo da linha de transmissão com a velocidade da luz. A evolução do fenômeno pode ser resumido em dois casos que dependem do que se verifica no momento em que a sobretensão atinge a primeira cadeia de isoladores:

- se a sobretensão tem amplitude menor que a que provocaria um arco elétrico na cadeia de isoladores,

a onda se propaga ao longo da linha, mantendo a sua forma até atingir a aparelhagem colocada nas extremidades da linha.

- se a sobretensão tem amplitude tal que provoque o arco na cadeia de isoladores, a corrente do arco é descarregada à terra e a onda de tensão é truncada. Esta onda truncada se propaga podendo alcançar a aparelhagem colocada na extremidade da linha.

2.2.2 - Sobretensões de manobra

As sobretensões de manobra ocorrem devido a operação do sistema; por exemplo, abertura e fechamento de disjuntores de um sistema(14,17).

Os surtos de manobra mais significativos do ponto de vista da severidade e probabilidade de ocorrência, são aqueles decorrentes da energização e religamento em alta velocidade de linhas de transmissão, cabos e bancos de capacitores.

Os impulsos ocasionados por sobretensões de manobra apresentam grande variedade de formas, intensidades e durações, correspondentes a uma grande variedade de eventos iniciais. Para um evento particular, seus parâmetros são determinados simultaneamente pelo sistema e pelas características do sistema de chaveamento.

2.2.3 - Sobretensões de frequência industrial

As sobretensões de frequência industrial são resultantes de condições anormais que ocorrem no sistema elétrico(14).

Alguns exemplos de fontes típicas destes surtos são:

- tensões nas fases sem defeito, durante uma falha fase-terra na linha.
- resposta do sistema a sobretensões dinâmicas após rejeição de cargas em um sistema.

- sobretensões ressonantes, ou quase ressonantes, resultantes do surto de corrente que ocorre em transformadores.

As sobretensões de frequência industrial são caracterizadas pela longa duração dos surtos, compostos por componentes harmônicos, os quais se não for tomada nenhuma medida de proteção, poderão levar a danificação do equipamento por saturação.

2.2.4 - Influência das sobretensões nas instalações

As sobretensões, quando não amortecidas, colocam em perigo a integridade ou o funcionamento de uma instalação elétrica ao atingirem o isolamento das máquinas e aparelhos em geral.

Quando isto acontece, descargas elétricas podem ocorrer reduzindo a vida média dos equipamentos e danificando-os em casos mais sérios. Estas descargas são provocadas pelas diferentes formas de atuação do campo elétrico sobre o material dielétrico, seja na superfície do material, seja internamente no próprio dielétrico, pela presença de cavidades nos seus interstícios, ou ainda nas camadas limítrofes entre dois meios dielétricos.

Um dos processos atuantes na formação de descargas elétricas superficiais é o acúmulo de cargas que ocorre na superfície do material⁽¹⁸⁾. Este fenômeno leva à concentração das linhas de força do campo elétrico em determinados locais, produzindo portanto pontos eletricamente fracos, o que leva a formação de descargas superficiais.

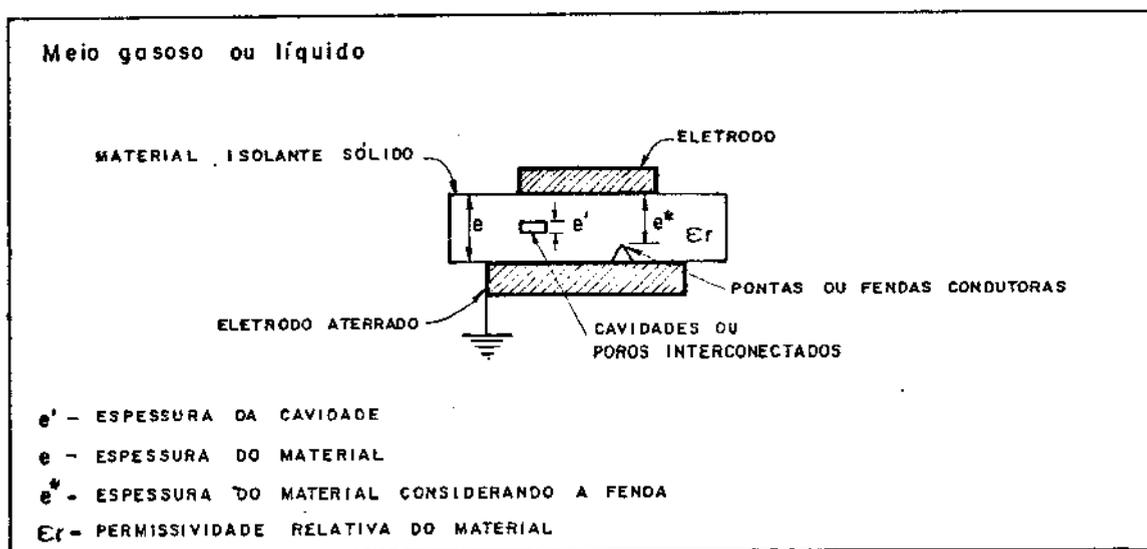
2.3 - CONSIDERAÇÕES SOBRE PROCESSOS CAUSADORES DE FALTA ELÉTRICA EM SISTEMAS DE ISOLAÇÃO

Quando uma descarga elétrica atinge os isolamentos sólidos, não se verifica a regeneração do material, nem a recuperação

constante do mesmo, como ocorre nos isolamentos de ar e parcialmente nos isolamentos líquidos e de gases confinados. Desta forma, em termos da análise do comportamento dos isolamentos sólidos quando solicitados eletricamente, é necessário observar não somente a possibilidade de descarga durante uma sobretensão mas também outros tipos de fenômenos que podem conduzir o material a uma falha elétrica.

Os processos que causam a deterioração em um sistema de isolamento e que podem levar o material a se romper podem ser classificados em : eletromecânico, descargas internas e de superfície e ainda de descargas térmicas e químicas (12,19).

Para o estudo desses processos normalmente se utiliza material isolante elétrico sólido que apresente cavidades internas ou fendas condutoras superficiais artificialmente produzidas. Esse material é intercalado em um sistema de eletrodos tipo placas paralelas, no qual é aplicado uma tensão elétrica. Considera-se também que este sistema seja inserido em um meio gasoso ou líquido, conforme esquema do quadro 3, para evitar descargas de contorno.



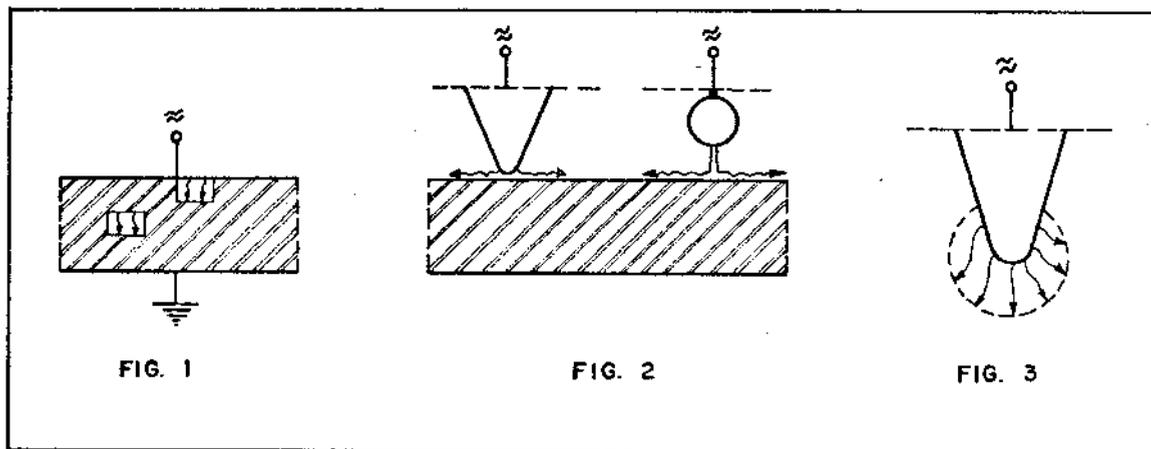
QUADRO 3 - ESQUEMA DE UM SISTEMA DE ISOLAÇÃO.

2.3.1 - Processos causadores de falhas devido a descargas

Para estudar os processos que causam falhas nos materiais isolantes devido às descargas, é importante inicialmente conhecer a classificação das descargas e os processos de ionização.

2.3.1.1 - Classificação das descargas parciais

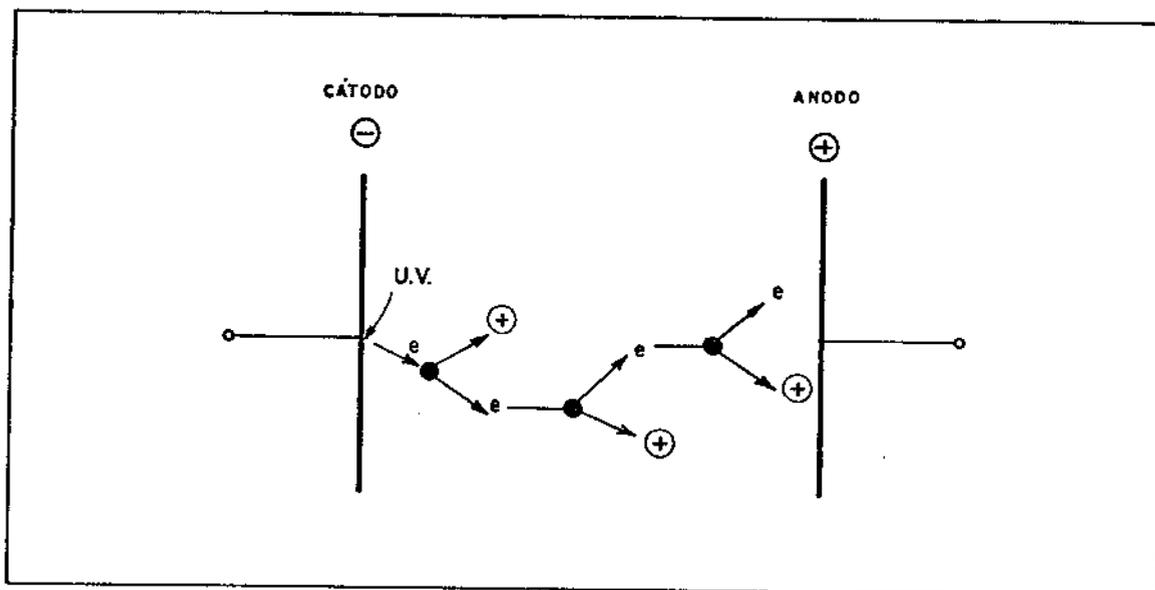
Nos isolantes submetidos a uma tensão elétrica, a solicitação elétrica pode ultrapassar a intensidade de campo de descarga local, sem que seja formada a descarga completa. Neste caso, forma-se uma descarga incompleta no isolante (sólido, líquido ou gasoso) entre os dois eletrodos que é definida por descarga parcial⁽²⁰⁾. Exemplos desse tipo de descarga são as descargas que ocorrem nas cavidades intrínsecas ao dielétrico (figura um do quadro quatro), ou sobre as superfícies (figura dois) ou ainda as descargas que ocorrem ao redor de pontas energizadas (figura três).



QUADRO 4 - TIPOS DE DESCARGAS PARCIAIS

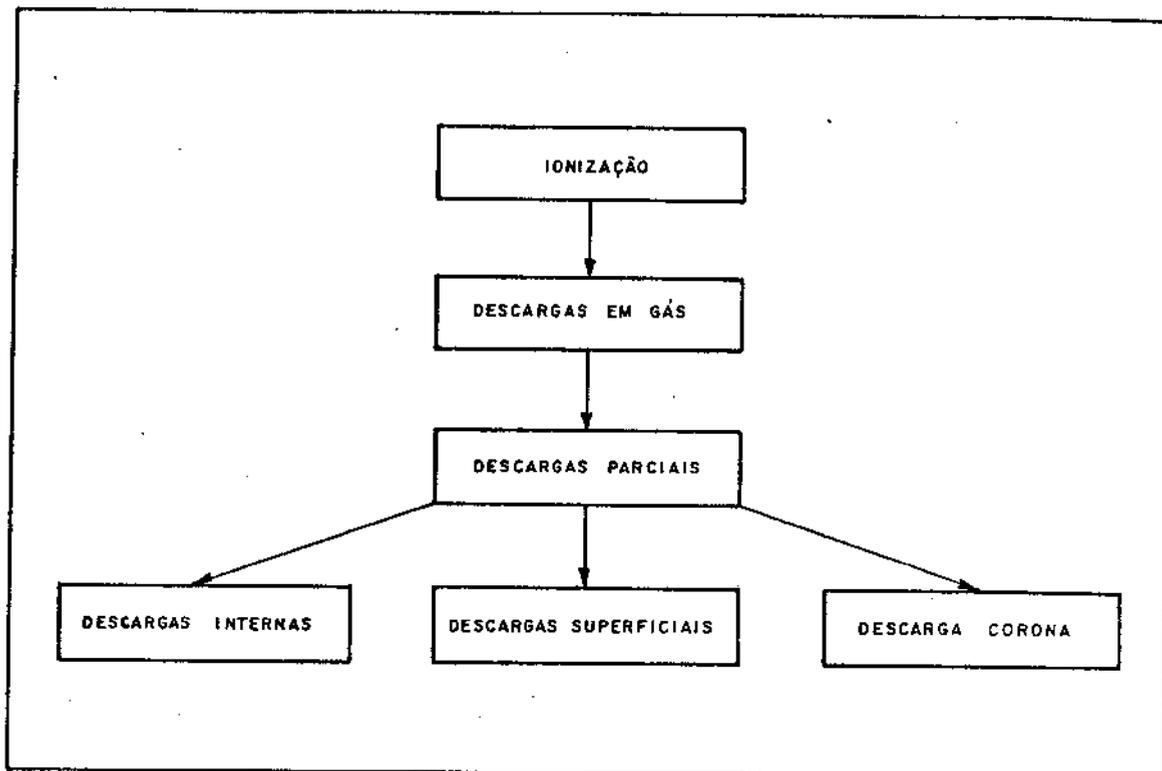
Em todas as descargas exemplificadas no quadro, a ionização ocorre pelo processo de impacto de elétrons em colisão

de elétrons. Os elétrons que se originam do cátodo são acelerados pelo campo elétrico para o meio do "gap" onde sofrem colisões com átomos e moléculas do meio. A ionização ocorre somente se a energia do elétron for suficiente ao colidir com átomos em moléculas para liberar o elétron com a consequente formação de íons positivos ou ainda para excitar as partículas para o nível superior de energia. O processo se repete com a liberação de vários elétrons, o que é denominado de avalanche de elétrons. Esta avalanche de elétrons movimenta-se na direção do ânodo formando a passagem da corrente através do meio^(12,20). O quadro 5 ilustra a formação da avalanche eletrônica em um meio gasoso a partir de um elétron pelo processo de colisão.



QUADRO 5 - FORMAÇÃO DE AVALANCHE ELETRÔNICA.

O quadro 6 ilustra o processo de formação das descargas parciais a partir da ionização do gás, no entanto o processo não é tão simples assim, pois na realidade todos esses processos agem simultaneamente nos sistemas de isolação.



QUADRO 6.- PROCESSO DE FORMAÇÃO DAS DESCARGAS.

É importante ressaltar que:

- descargas internas ocorrem nas inclusões ou cavidades no dielétrico (figura um do quadro quatro)
- descargas superficiais ocorrem na superfície de um dielétrico ou nas camadas limítrofes entre dois meios dielétricos (figura dois do quadro quatro)
- descargas corona ocorrem nos campos não homogêneos formados ao redor de pontas ou nas bordas dos eletrodos (figura três do quadro quatro).

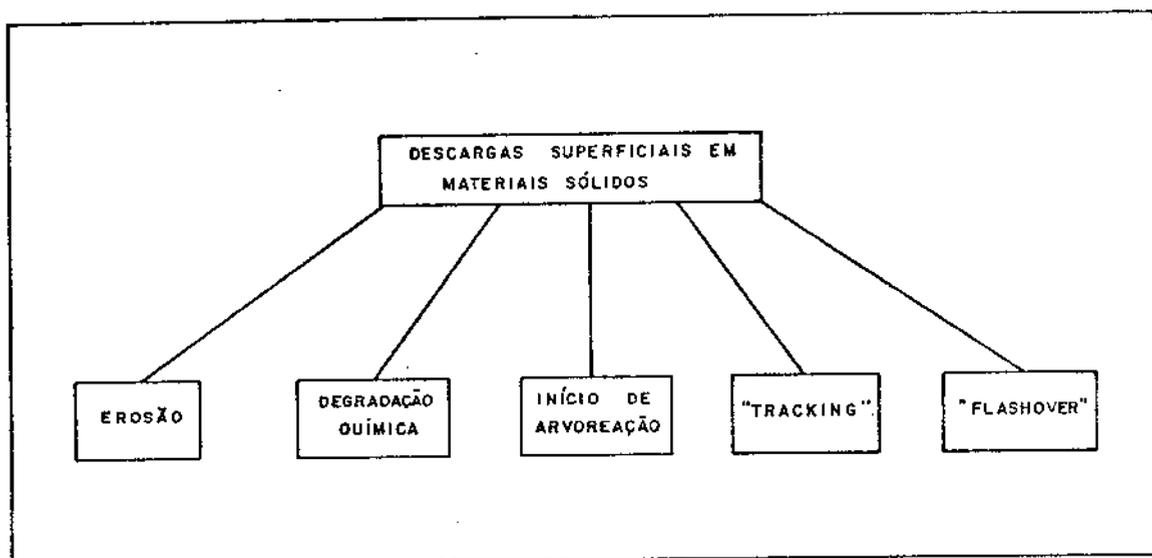
Embora a magnitude das descargas parciais seja usualmente pequena, tais descargas podem causar uma deterioração progressiva e levar a isolação a rupturas ou a falhas elétricas⁽²⁰⁾.

A rigidez dielétrica pode ser grandemente afetada com o tempo de aplicação da tensão se as descargas ocorrerem dentro

das cavidades, nos poros do material, nas superfícies próximas aos eletrodos ou ainda como resultado de uma contaminação superficial(21).

2.3.1.2 - Processos decorrentes das descargas superficiais

Quando uma isolação de material sólido estiver inserida em um meio gasoso ou líquido, descargas superficiais podem ocorrer, levando o material à erosão ou à degradação química. Podem ainda iniciar um processo de arvoreação elétrica ou de "tracking" ou de "flashover" que fatalmente resultará em uma falha de isolação (quadro sete)(21).



QUADRO 7 - PROCESSOS QUE PODEM SER INICIADOS DECORRENTES DE DESCARGAS SUPERFICIAIS.

a) "Flashover"

O "flashover" é uma descarga completa que se desenvolve no meio em que está inserido o sistema de isolação contornando

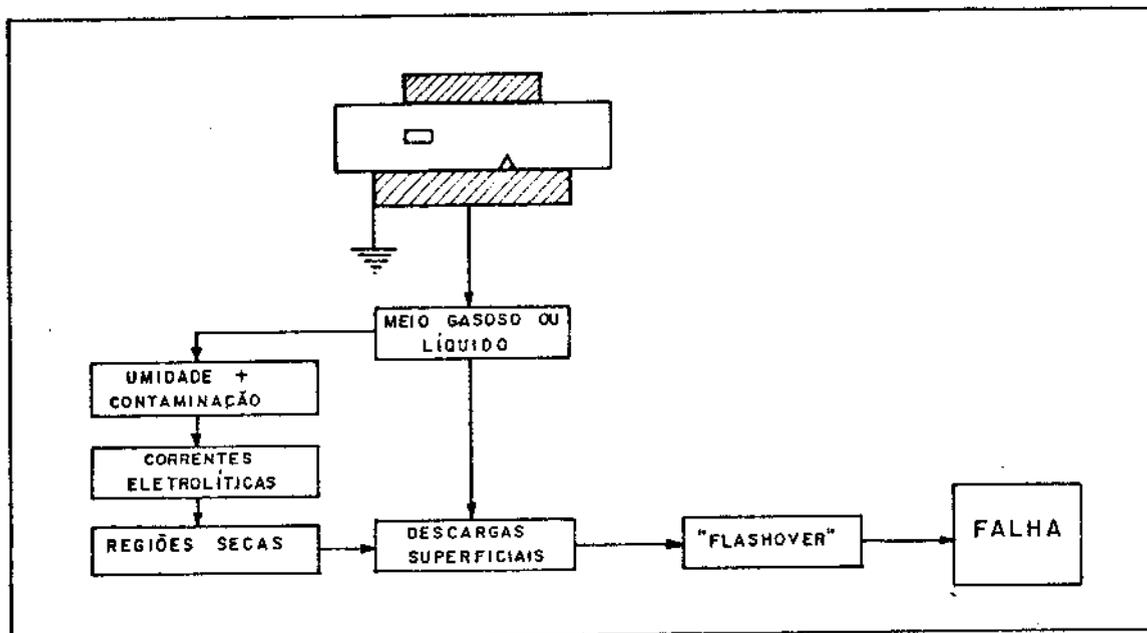
a sua superfície ou próximo a ela. O papel do material sólido deste sistema é somente de distorcer o campo elétrico de modo a afetar a rigidez dielétrica do meio.

Um exemplo típico de descargas "flashover" são aquelas que ocorrem em isoladores ou buchas seja de porcelana, vidro, epoxi ou outros materiais sintéticos.

O "flashover" é bastante afetado pelas condições climáticas e atmosféricas, portanto pela densidade do ar, umidade, chuva, contaminantes, etc... Assim, no caso típico de isoladores de linhas de transmissão, sejam de energia ou telecomunicações em que estão sujeitos às intempéries cotidianas, os valores ou níveis de tensão de "flashover" variam de dia para a noite ou mesmo de hora para hora, dependendo do tempo ser bom com sol ou com chuva.

O desenvolvimento de uma descarga "flashover" (quadro 8), pode se iniciar pela ação de tais intempéries, as quais provocam um aumento das correntes eletrolíticas superficiais quando uma tensão é aplicada nestes equipamentos. O calor gerado por essas correntes causa evaporação e ressecamento local da superfície. Há desta maneira, uma concentração de campo nas regiões secas formadas por intermédio das correntes eletrolíticas. Tais regiões provocam o surgimento de "sparks", os quais se a tensão for suficiente, se desenvolvem rapidamente, produzindo a ruptura do meio gasoso em torno da isolação caracterizando o "flashover".

Para estudos de "flashover", além da condutividade superficial, da uniformidade ou não da contaminação, devemos considerar também um fator forma de isolação; que no caso de isoladores de linhas depende do formato, da posição e do número de saias do isolador. Estes elementos afetam tanto a condutividade superficial como a distribuição inicial do eletrólito (fluido condutor), influenciando substancialmente a tensão de "flashover".



QUADRO 8 - "FLASHOVER" ATRAVÉS DE SUPERFÍCIES.

De uma maneira geral, a tensão de "flashover" tende a se tornar mais crítica quando:

- a permissividade relativa (E_r) do material for grande
- a pressão do gás for alta
- o tempo de duração do impulso for muito grande
- o contacto dos condutores for precário
- a frequência da tensão alternada for aumentada
- houver poluição superficial

b) "Tracking"

O "tracking" é definido como um processo desordenado que consiste na formação de caminhos condutores permanentes sobre a superfície da isolação⁽¹²⁾. Esta condução na maioria dos casos é resultante da própria degradação do material. A incidência de ocorrência do "tracking" depende acima de tudo do tipo de material utilizado, mas seu início depende de muitos outros fatores.

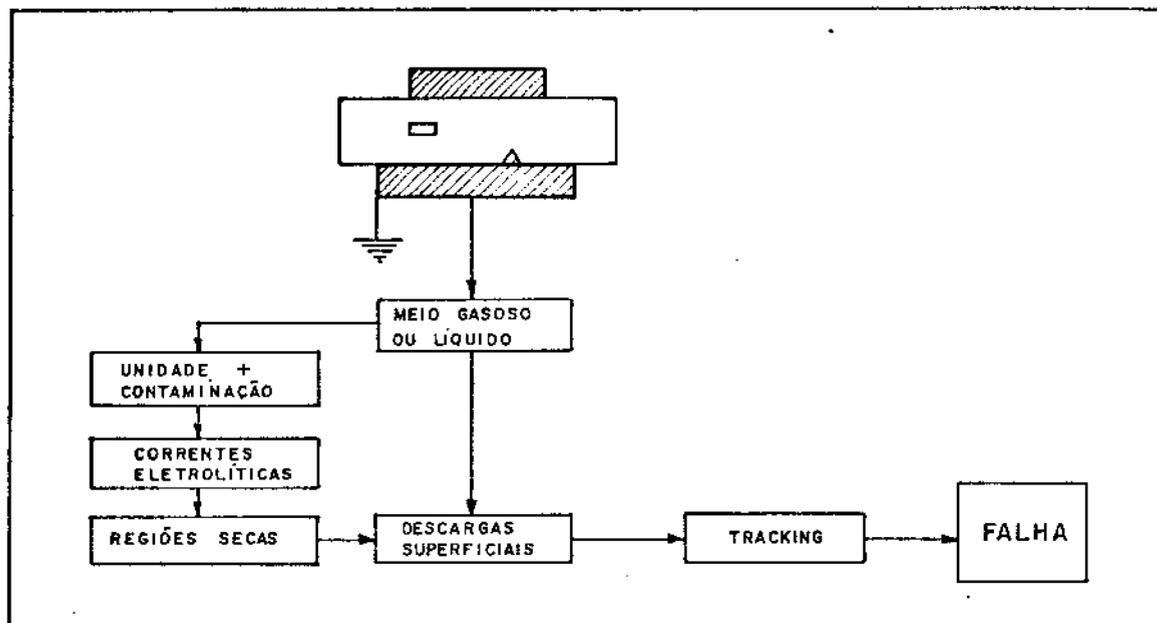
Na interpretação desse fenômeno, é de fundamental importância a maneira pela qual o carbono é combinado com as moléculas adjacentes. Supõe-se que os "tracks" produzidos são constituídos principalmente por carbonos grafíticos; daí a necessidade da presença de material orgânico (por exemplo, cêra, polímeros em geral, sujeira, etc.) para ocorrer o "tracking"(22).

De uma maneira geral, para ocorrer o "tracking" é necessário:

1. a presença de filmes ou camadas condutoras através da superfície da isolação.
2. um mecanismo através do qual a corrente de fuga ou de dispersão na camada condutora seja interrompida.
3. a degradação da isolação.

Esse mecanismo de interrupção, mencionado no item 2, é causado pelo ressecamento da superfície, proveniente do efeito de calor da corrente de fuga. Dessa maneira, "sparks" são provocados entre as camadas condutoras, que passam a atuar como extensão dos eletrodos. Com o tempo, esses "tracks" se propagam atingindo os eletrodos causando uma falha na isolação, conforme ilustra o quadro nove.

Apesar de ser um processo semelhante ao "flashover", o "tracking" apresenta diferenças significativas como por exemplo: ocorrer em tensões bem mais baixas que o "flashover", uma vez que independe da tensão de ruptura do meio gasoso. Outra característica importante é que o "tracking" é acelerado por uma concentração de corrente no final do caminho carbonizado a qual provoca ressecamento da camada condutora e desencadeia a formação de um maior número de microdescargas. Estas microdescargas com o decorrer do tempo conduzem o sistema de isolação a falhas elétricas.



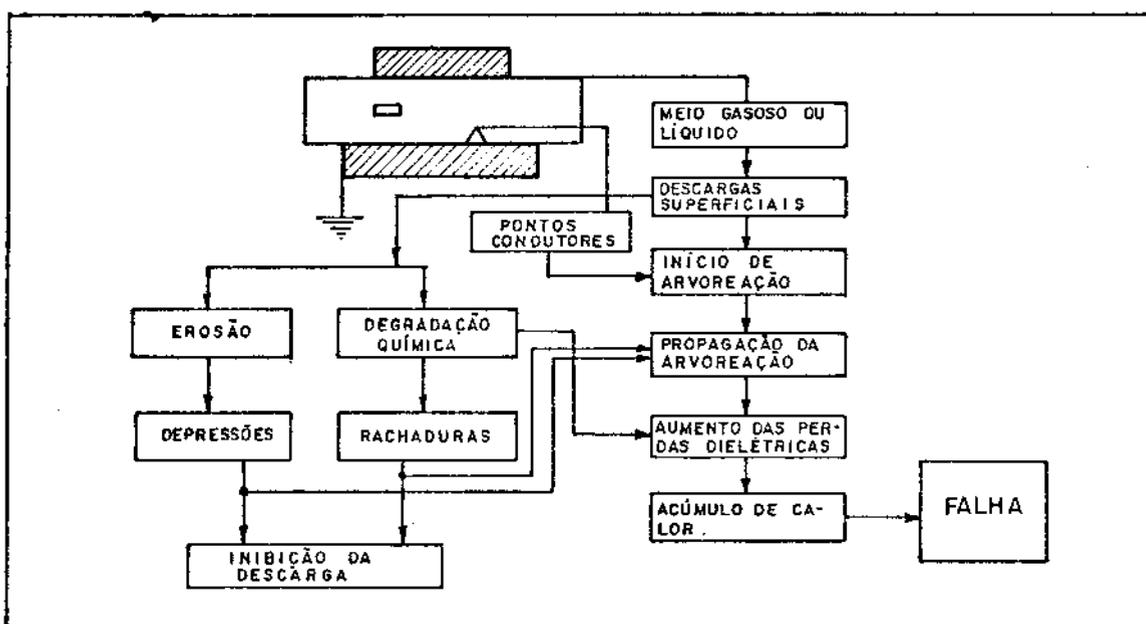
QUADRO 9 - PROCESSO DE "TRACKING".

Para prevenir que se desencadeie um processo de "tracking" em uma isolação, L.L. Alston⁽¹²⁾ sugere que as superfícies sejam limpas, secas e sem deformação e que a isolação seja feita de materiais resistentes ao "track". Como a limpeza nem sempre é praticável, o autor sugere ainda o revestimento dos equipamentos por repelentes gordurosos. No entanto, tal procedimento não elimina a possibilidade de ocorrência de um risco de falha através da sujeira coletada pela gordura.

c) Arvoreação elétrica

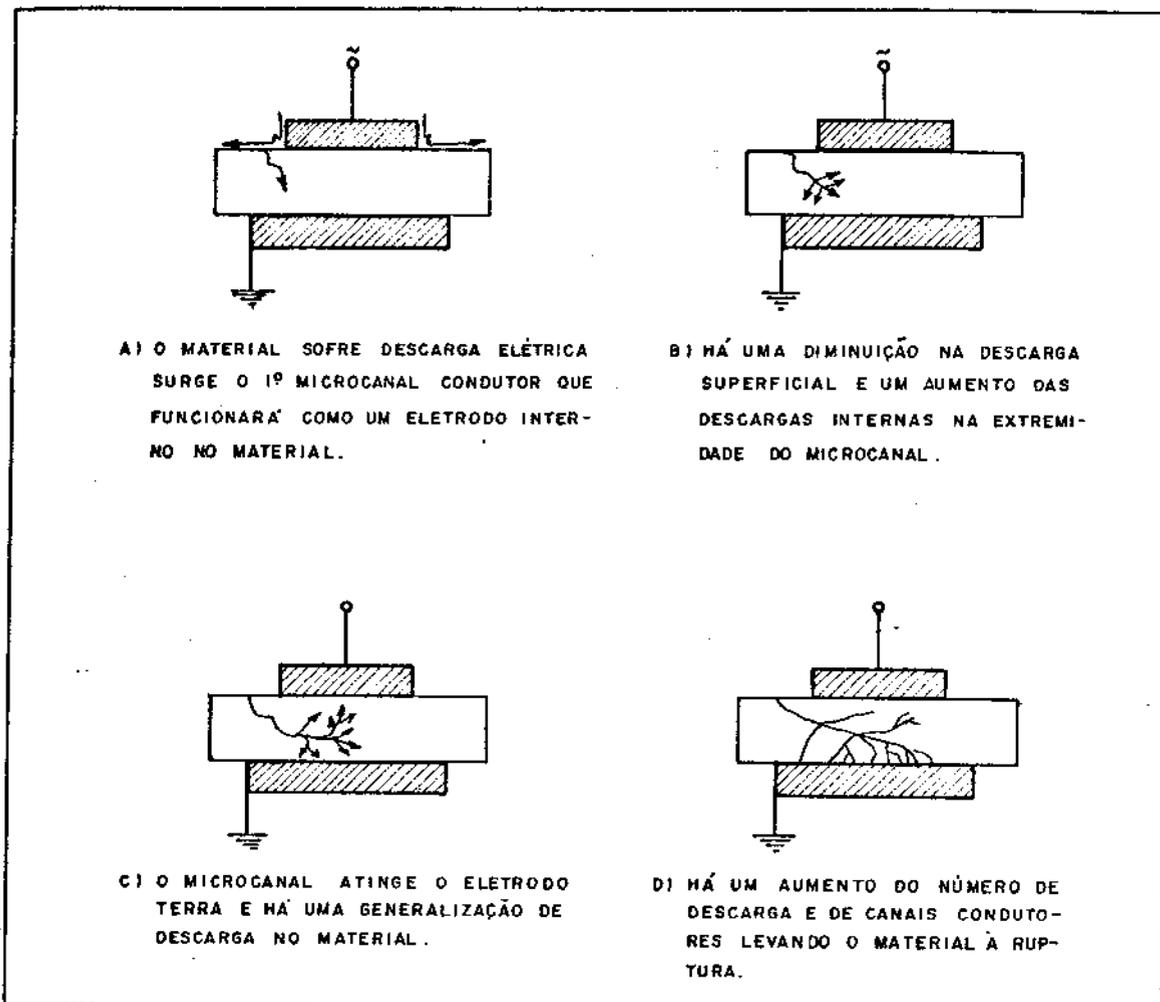
Quando ocorre uma descarga elétrica em um gás, há a formação de caminhos condutores neste meio. Um processo semelhante a este acontece quando um material sólido sofre uma descarga elétrica, com a diferença que nos materiais sólidos tais caminhos condutores, deixam marcas visíveis na superfície ou internas ao material. Este processo comumente denominado por arvoreação

ção elétrica, permite a formação de canais de descargas parciais internas ao material. A arvoreação elétrica, uma vez iniciada, se propaga através do material (vide quadro 10), provocando o envelhecimento irreversível dos materiais que compõem a isolação.



QUADRO 10 - PROCESSO DE ARVOREAÇÃO ELÉTRICA.

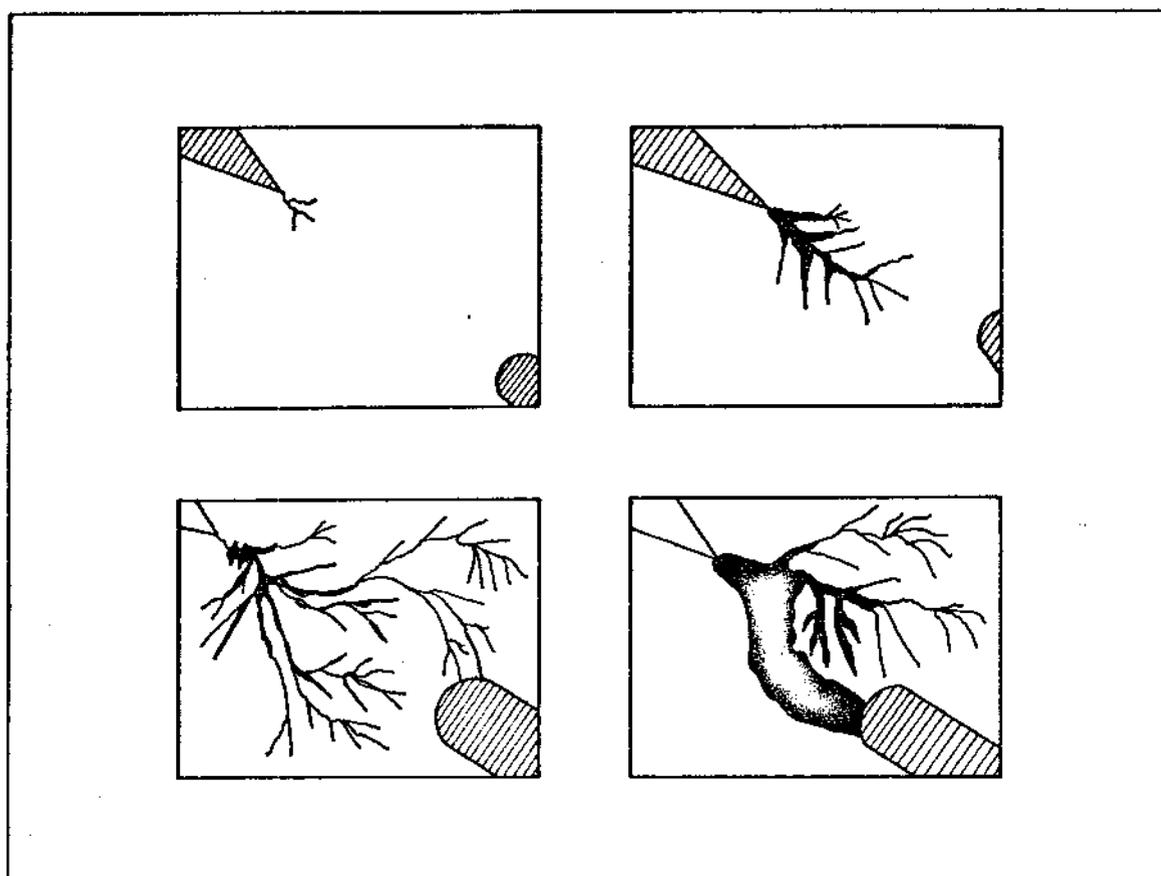
O desenvolvimento da descarga parcial devido a arvoreação elétrica apresenta diversas fases diferentes. Durante uma fase inicial de envelhecimento, o número de descargas parciais detectadas aumenta enquanto o primeiro microcanal surge na extremidade do eletrodo. Verifica-se neste instante uma redução no número de descargas na superfície. Paralelamente surge um tipo diferente de filamento (microcanal condutor) que acaba se propagando em virtude das descargas localizadas nas suas extremidades. Tão logo este filamento atinja o ânodo, um aumento repentino da intensidade e do número de descargas é então observado. A ruptura do material ocorrerá mais tarde, acompanhada por um aumento generalizado no número de descargas (vide esquema do quadro 11).



QUADRO II - PROCESSO DE ARVOREAÇÃO ELÉTRICA DEVIDA A UMA DESCARGA DE SUPERFÍCIE.

Os sistemas de isolação podem tanto apresentar pontas condutoras na superfície compreendida entre o dielétrico sólido e o eletrodo, como conter cavidades preenchidas por gases ou líquidos, ou ainda impurezas de natureza sólida como fragmentos de metais, etc. Tais gases ou líquidos normalmente apresentam rigidez dielétrica menor que o material sólido do sistema de isolação. Quando tal sistema for submetido a uma sobretensão, descargas podem ocorrer nestas cavidades ou ainda através daquelas

pontas condutoras. Desta maneira, também pode se iniciar o processo de arvoreação elétrica (vide esquema do quadro 12).



QUADRO 12 - DESENVOLVIMENTO DE UMA TÍPICA RUPTURA CAUSADA POR ARVOREAÇÃO ELÉTRICA. (Extrado do livro ref.24 - pg.257)

Vários estudos realizados em cabos de materiais poliméricos⁽²¹⁾ mostram que o início da arvoreação decorre sobretudo da concentração de tensão local em lugares que apresentam imperfeições ou impurezas na isolação. A probabilidade de crescimento da arvoreação a partir de tais imperfeições depende de um fator que é determinado principalmente pela forma geométrica da impureza e pelo campo ao qual está sujeito o material.

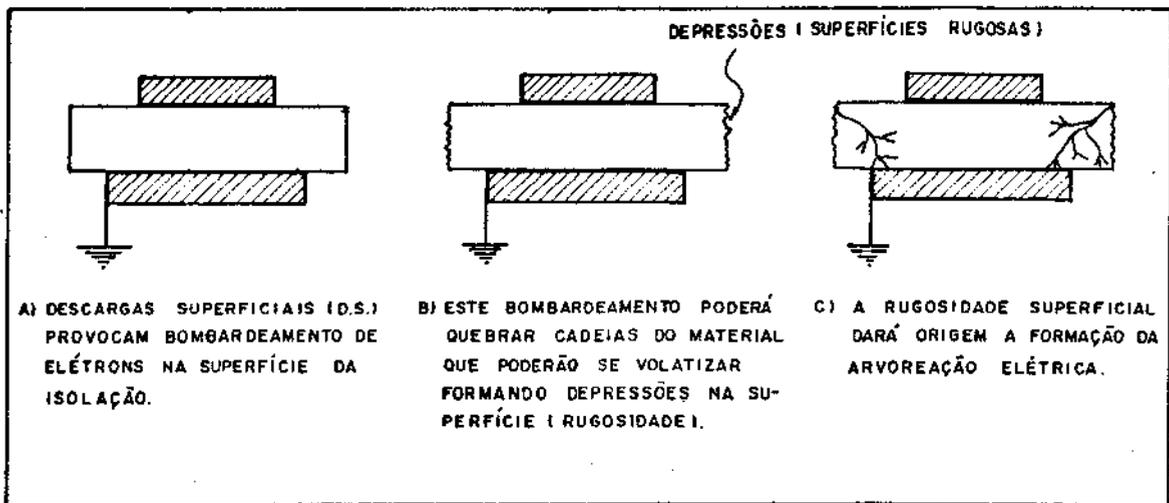
d) Degradação química e erosão devido às descargas

Quando uma isolação está expostas às descargas de superfície, ou contém cavidades, estes pode sofrer uma degradação química ou erosão. Estes dois tipos de deterioração podem culminar em uma falha com o decorrer do tempo. Existem muitos fatores que influenciam nestes processos. Os que mais se evidenciam dependem da espessura, tipo do material, da frequência e da amplitude da tensão aplicada, das condições ambientais e também da tensão mecânica a qual o material está sujeito⁽²¹⁾. Apesar de em um primeiro instante parecer que são processos iguais, um tipo de deterioração difere substancialmente do outro, como ilustram os quadros 13 e 14.

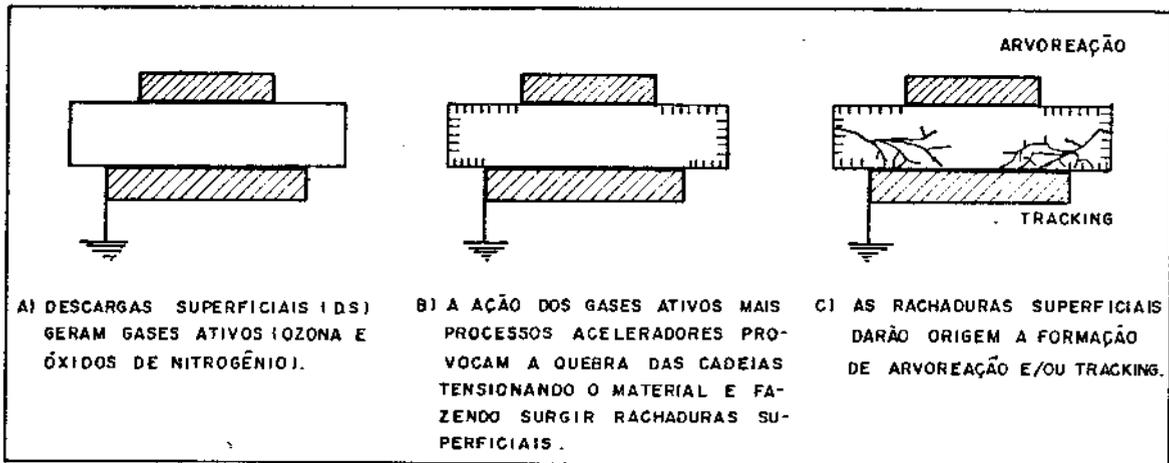
Um material quando submetido a tensões baixas, pode sofrer erosão através de bombardeamento de elétrons e assim iniciar um processo de degradação química decorrente dos gases ativos gerados pelas descargas. Sempre que o material estiver em contato com o ar, ozona e óxidos de nitrogênio poderão se formar ao seu redor. Dependendo do tipo de material, principalmente se este for um polímero ou ainda se o material estiver coberto por vernizes, estes gases atacam a isolação e provocam a quebra das cadeias moleculares do material⁽²¹⁾.

Desta forma inicia-se a formação de rachaduras que aceleram o surgimento do processo de arvoreação elétrica. Dependendo do material a degradação química pode aumentar suas perdas dielétricas e o acúmulo do calor formado causará eventualmente a ruptura térmica.

A degradação de uma isolação pode ser explicada também como resultado do aquecimento proveniente de "sparks". Tal aquecimento pode desencadear o "tracking" se o calor gerado carbonizar ou volatilizar a isolação. Existem outros processos, tais como decomposição física, radiação ultravioleta e ataques químicos, que podem também atuar em conjunto, acelerando a degradação do material⁽²³⁾.



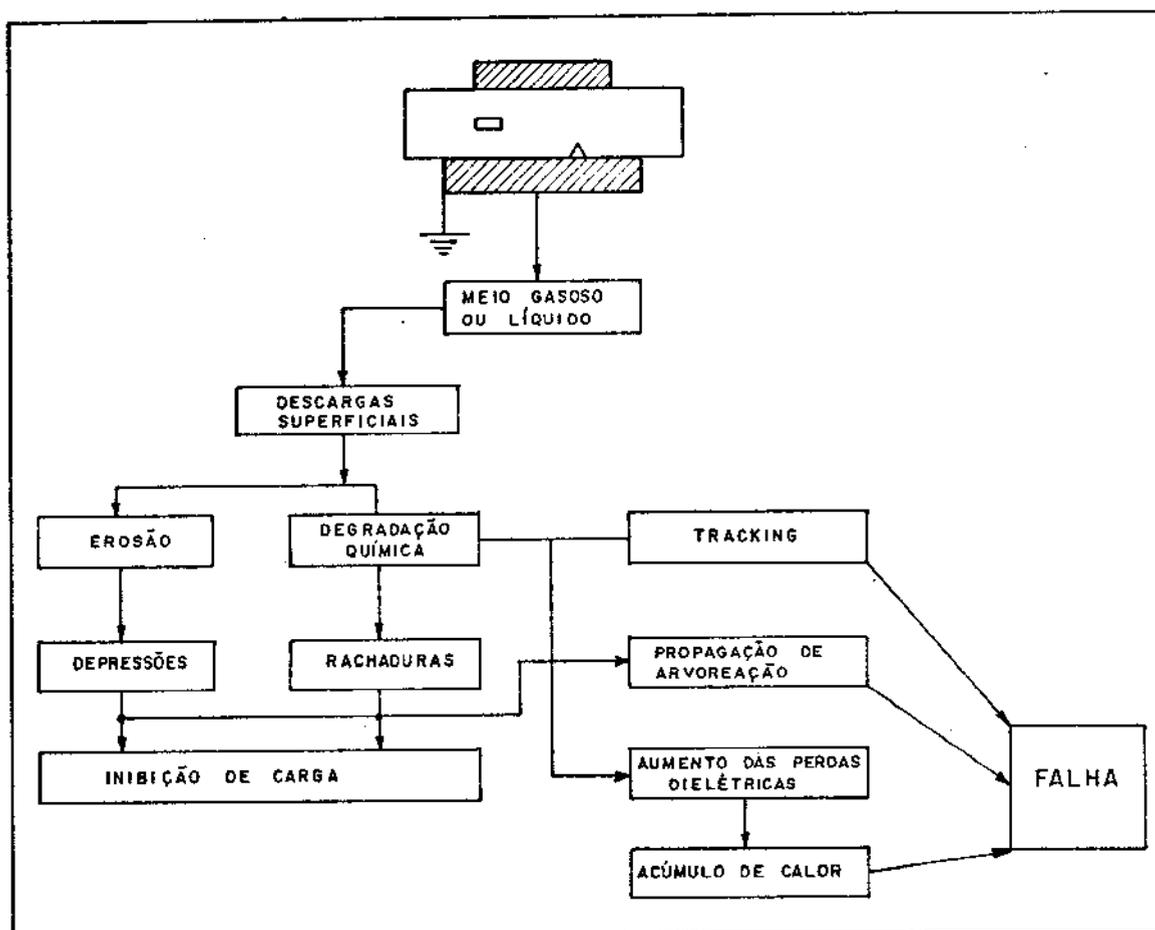
QUADRO 13 - PROCESSO DE EROÇÃO



QUADRO 14 - PROCESSO DE DEGRADAÇÃO QUÍMICA.

O processo de erosão, com o decorrer do tempo, se apresenta em forma de depressões, aparentando uma rugosidade na superfície que colabora no acúmulo de contaminação. Da mesma forma que ocorre na degradação química, a rugosidade também pode propiciar o desenvolvimento do processo de arvoreação elétrica através do material.

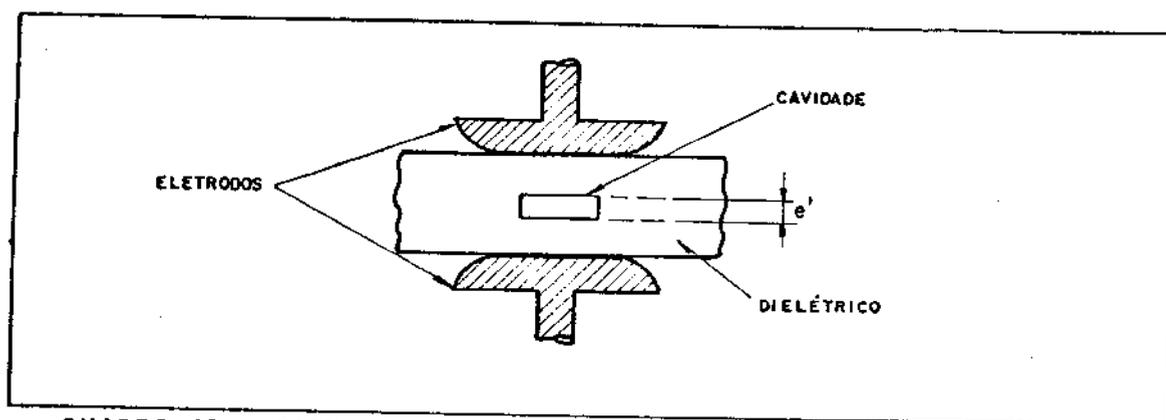
Quando um material estiver exposto a umidade e por um processo qualquer sofrer uma deterioração, isto é, sua superfície apresentar-se rugosa ou ainda com rachaduras, existe a possibilidade de se conter o desenvolvimento de descargas através da liquefação dos produtos da descarga que podem aumentar a densidade do meio. Particularmente nas cavidades intrínsecas ao material, as descargas podem ser interrompidas e desta forma permanecendo dormentes pelo material. Um esquema geral do processo de degradação química e erosão devido às descargas de superfície é ilustrado no quadro 15.



QUADRO 15 - PROCESSO DE DEGRADAÇÃO QUÍMICA E EROSÃO DEVIDO ÀS DESCARGAS DE SUPERFÍCIES.

2.3.1.3 - Processos decorrentes das descargas internas

Em geral, um sistema de isolamento pode conter lacunas ou cavidades no interior do dielétrico, conforme ilustra o quadro 16. Tais defeitos normalmente são preenchidos com outros meios, gases ou líquidos, que apresentam rigidez dielétrica menor que o sólido.



QUADRO 16 - SISTEMA DE ISOLAÇÃO COM CAVIDADE INTERNA.

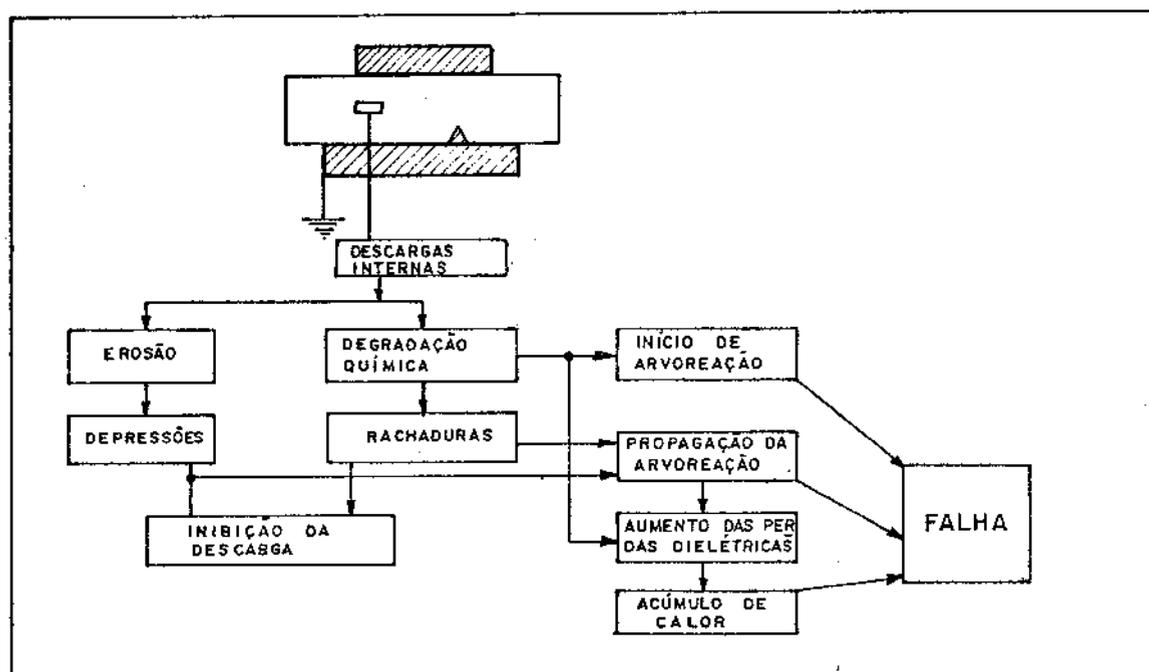
Quando tal sistema é submetido a uma tensão elétrica, essas lacunas ou cavidades causam concentração de campo. O campo elétrico resultante pode exceder o campo do dielétrico. Assim, sob esforços normais de operação do sistema de isolamento, a tensão ao longo da cavidade pode exceder a sua tensão de ruptura levando a ocorrência de descargas internas⁽²³⁾.

Existem muitos fatores que influenciam o desenvolvimento das descargas internas: dimensões e geometria da cavidade, pressão e temperatura utilizadas durante o processamento do material, características do material utilizado e outros.

O surgimento destas descargas afeta toda a superfície da cavidade com o frequente bombardeamento de elétrons provenientes das descargas. Tal bombardeamento pode apresentar energia suficiente para romper ligações químicas do material e provocar o desenvolvimento do processo de erosão na sua superfície. Da

mesma forma, os íons gerados causam danos ao material, aumentando a temperatura da superfície e produzindo instabilidade térmica(21,24).

Os produtos das descargas internas (sobretudo ozona e óxidos de nitrogênio) provocam a quebra de cadeias do material, tensionando-o e ocasionando-lhe rachaduras. Assim, um processo de degradação química também pode ser iniciado nas superfícies das cavidades internas ao material. O quadro 17 ilustra esquematicamente todos os processos que podem se desenvolver pela ocorrência de descarga interna ao material.



QUADRO 17 - DESCARGAS INTERNAS .

2.3.1.4. Descarga corona

Conforme mencionado anteriormente, a descarga corona ocorre em campos não homogêneos formados ao redor de pontas ou nas bordas dos eletrodos em alta tensão. É muito difícil estabelecer a tensão de início da descarga corona pois esta depende de muitos fatores como; formato do eletrodo, umidade, condições superficiais (homogeneidade), presença de gotículas de água so-

bre a superfície do condutor, e muitos outros⁽²⁰⁾.

As descargas corona ocorrem com frequência tanto em tensão alternada como em tensão contínua. Tais descargas se ocorrem de maneira constante atacam direta e indiretamente os materiais utilizados na isolação pelo aquecimento do material e pela formação de ozona e outros produtos agressivos provocadores de deterioração química nestes materiais. Além disto, a ocorrência de descargas corona em condutores e ferragens geralmente traz problemas de interferências em telecomunicações⁽²³⁾.

Devido principalmente aos efeitos de destruição mecânica e química nos materiais adjacentes, as descargas corona são indesejáveis. Desta maneira, os equipamentos elétricos devem ser projetados, de forma a se evitar as descargas corona.

2.3.2 - Processo de ruptura devido a descargas térmicas

Além de falhas provocadas pelas descargas elétricas, um sistema de isolação também pode ser levado ao rompimento devido a outros processos. Tais processos conhecidos como térmicos, químicos e eletroquímicos, apesar de distintos, apresentam-se relacionados entre si. Essa relação é justificada pelo aumento da temperatura e pela presença de íons no material, o que pode desencadear qualquer um ou mesmo todos esses processos conjuntamente⁽¹²⁾.

Quando uma substância é exposta a ação de uma tensão, há um desenvolvimento de calor gerado pelo efeito da corrente de condução e dos íons internos ao material. Com o aumento da temperatura ocorre uma diminuição da resistência eletrolítica, aumentando assim o movimento dos íons. O calor gerado é parcialmente conduzido para o meio ambiente e parcialmente absorvido pelo material. Se esta absorção exceder a emissão, a temperatura aumentará, surgindo pontos de instabilidade térmica onde o material irá se queimar ou fundir, caracterizando a descarga térmica^(12,25).

Um material isolante, mesmo na ausência de tensão elétrica, pode sofrer deterioração química a partir de inúmeras

causas, tais como instabilidade química, oxidação, hidrólise ou ainda incompatibilidade de materiais⁽¹²⁾. Assim que este material for submetido ao esforço de uma tensão elétrica, correntes iônicas poderão surgir, conduzindo-o à ruptura por intermédio de uma descarga térmica.

Nenhum sistema de isolamento é completamente livre de íons. Tais íons podem ser originados pela dissociação de impurezas ou ainda a partir da ionização repentina dos materiais isolantes. Assim quando os sistemas de isolamento ficam submetidos ao esforço de uma tensão elétrica, tais íons se dirigem ao eletrodo e ao atingí-lo perdem sua carga e reagem, formando gases ou outras substâncias⁽¹²⁾. Desta forma a isolamento e o metal do eletrodo são atacados pelos gases gerados ou pelas substâncias depositadas sobre o eletrodo. Os produtos das reações nos eletrodos podem ser quimicamente ou eletricamente prejudiciais, e em alguns casos podem ocasionar rapidamente falhas na isolamento. A velocidade da eletrólise será afetada dependendo do tipo de tensão que é aplicado, se A.C. ou D.C.

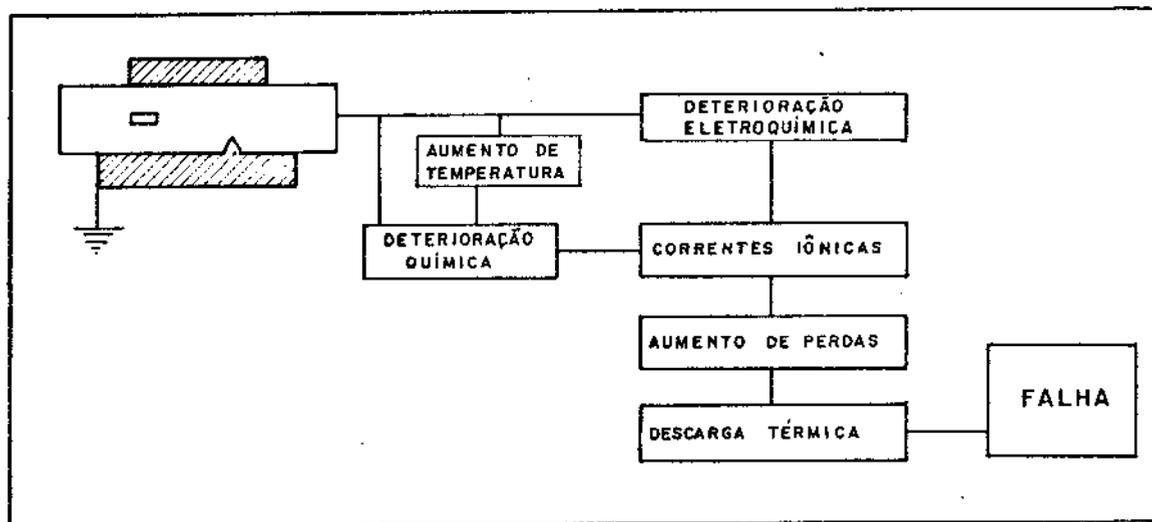
Este sistema de isolamento poderá ainda sofrer um aumento de temperatura devido às correntes de condução ou outras formas de perda de energia que podem surgir em decorrência do esforço elétrico.

A velocidade de deterioração eletroquímica também poderá ser aumentada devido a um aumento da corrente iônica. Tal velocidade será ainda maior, em função do tipo de material isolante utilizado no sistema. Se o material for polar há um maior grau de dissociação das substâncias iônicas, o que implicará em uma maior corrente iônica⁽¹²⁾.

O aumento dessas correntes iônicas levará a um aumento das perdas dielétricas. Conseqüentemente haverá um aumento na temperatura que fatalmente conduzirá a um novo aumento dessas correntes iônicas. O resultado deste processo é a ocorrência de degradação e de uma possível instabilidade térmica no material.

O quadro 18 ilustra esquematicamente todo o desenvolvimento de ruptura devido a descarga térmica. A maior parte des

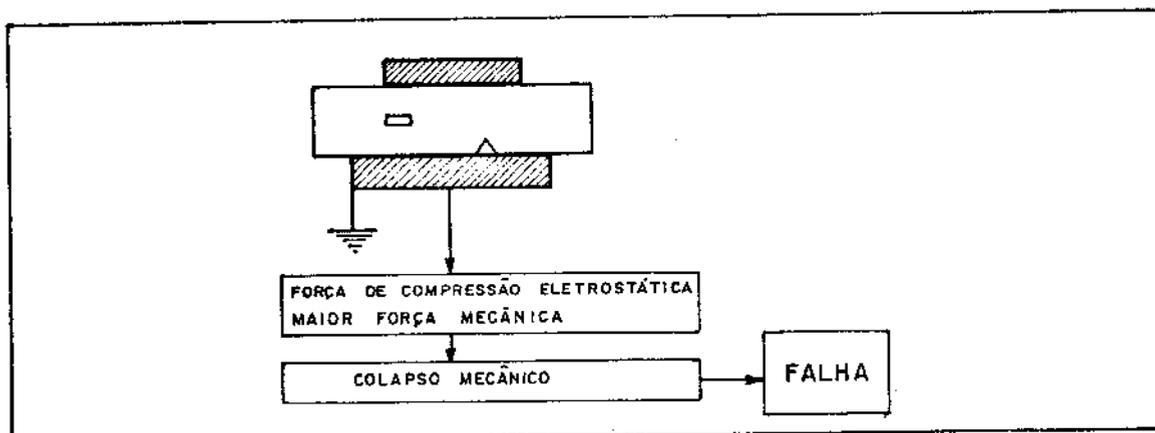
tes processos ocorrem devido a aplicação de uma tensão acima da tensão de serviço no desempenho do material⁽²⁵⁾.



QUADRO 18 - PROCESSO DE RUPTURA DEVIDO A DESCARGAS TÉRMICAS

2.3.3 - Ruptura devido a processos eletromecânicos

A ruptura de um material também pode ser desencadeada através de processos eletromecânicos, que normalmente são definidos da seguinte forma: quando uma tensão é aplicada no dielétrico, este fica sujeito a uma força eletrostática que o comprime. A compressão aumenta a tensão elétrica efetiva, diminuindo a espessura do dielétrico e aumentando desta maneira o esforço de compressão. Uma condição instável é atingida e a falha elétrica ocorre devido a um colapso mecânico (vide quadro 19)⁽¹²⁾.



QUADRO 19 - PROCESSO DE RUPTURA ELETROMECAÂNICO .

Os isolantes sólidos, quando solicitados a uma força de compressão eletrostática maior que sua força mecânica podem sofrer fraturas ao longo de todo o material. Tais forças de compressão surgem devido a atuação entre as cargas da superfície que aparecem quando a tensão é aplicada.

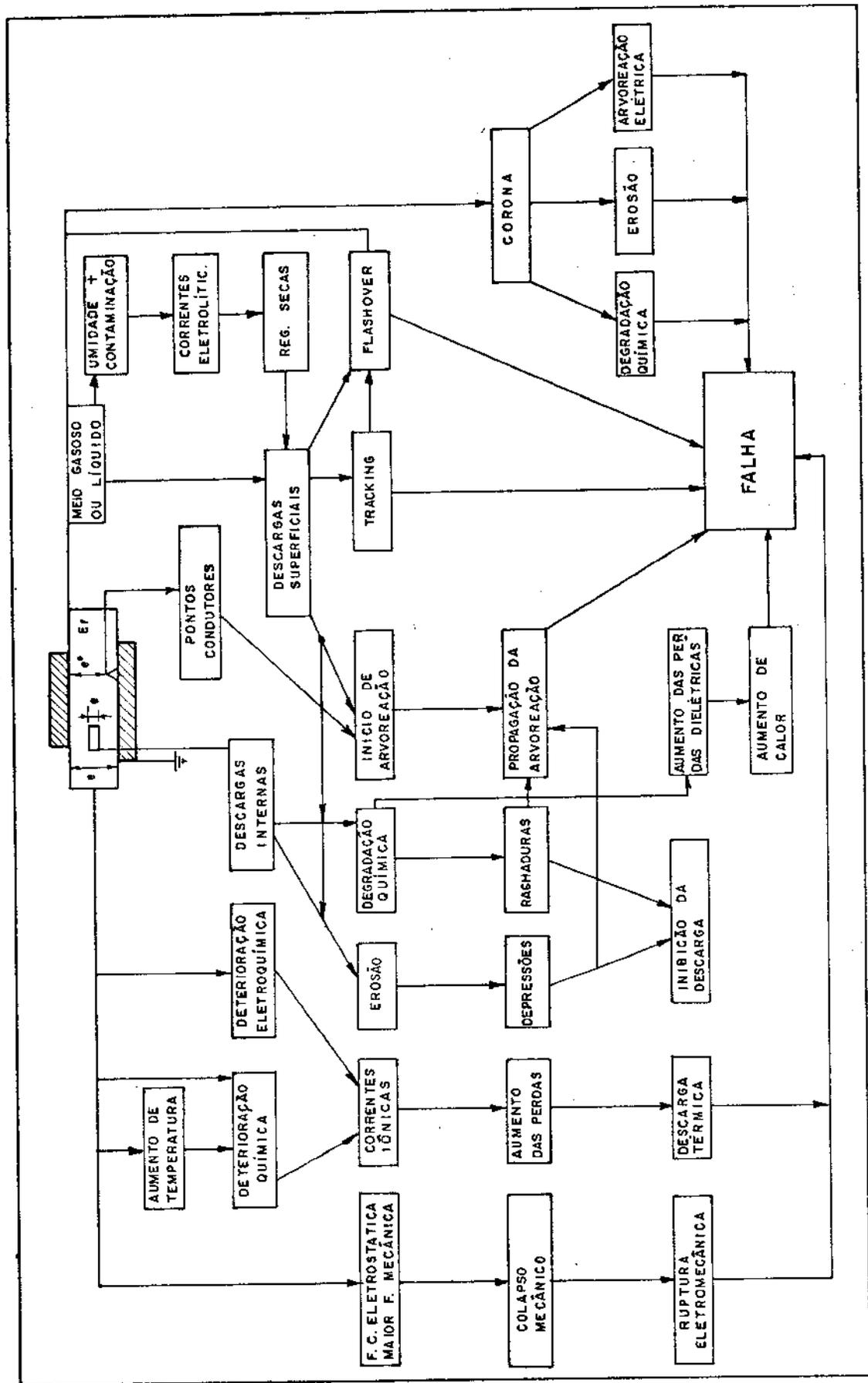
2.3.4 - Resumo dos processos de falhas em sistemas de isolação

Todos os processos abordados até o momento que afetam o desempenho de um sistema de isolação foram esquematizados no quadro 20.

2.4 - CONSIDERAÇÕES SOBRE DETERMINAÇÃO DA DEGRADAÇÃO EM MATERIAIS SUBMETIDOS AO ESFORÇO ELÉTRICO

A determinação das características de envelhecimento e do tempo de vida dos materiais de uma isolação elétrica é de importância fundamental para o uso específico de tais materiais. Muitos estudos tem sido realizados com o intuito de se determinar o tempo de vida de uma isolação. Tais estudos estão voltados à determinação da tensão crítica de ruptura, ao comportamento de arvoreação ou ainda às mudanças na perda dielétrica com o tempo.

Os trabalhos desenvolvidos nesse campo tem sido utilizados para orientar o desenvolvimento de novos materiais isolantes, para verificar o controle de qualidade dos sistemas de isolação, como também para diagnosticar e localizar falhas em sistemas de isolação em serviço.



QUADRO 20 - PROCESSO DE FALHAS EM SISTEMAS DE ISOLAÇÃO

Efetuiremos neste tópicu, um breve resumo de algumas das técnicas e procedimentos adotados para a determinação da degradação de um material isolante.

- Análise Cromatográfica e espectroscopia

Técnicas de análises químicas de gases foram utilizadas originalmente para localizar falhas em aparelhos fechados ou semi-fechados. Tais técnicas estão atualmente bastante difundidas, sendo empregadas para medir degradações térmicas lentas. É o caso, por exemplo, da análise de CO, CO₂ e H₂O liberados pela degradação de um isolamento de celulose; ou ainda da análise de H₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₄ e C₂H₆ provenientes dos diferentes tipos de falhas elétricas que ocorrem nos transformadores a óleo⁽¹⁰⁾.

Leroy, et alii⁽²⁶⁾ desenvolveram um circuito eletrônico como o intuito de registrar a quantidade total de energia elétrica correspondente a uma descarga elétrica e também um instrumento para análise qualitativa e quantitativa da mistura de gás envolvida. Baseou-se em cromatografia de gás, espectroscopia de massa e de absorção de infra-vermelho.

Y. Toriyama, et alii⁽²⁷⁾ estudaram a degradação do polietileno submetido à descargas elétricas. Utilizaram medidas de variação de seu peso molecular, análises do espectro de absorção de infra-vermelho, análises químicas quantitativas, espectroscopia de massa dos gases envolvidos, cromatografia de gás e ainda observações realizadas sobre as condições da superfície da amostras por meio de microscópio óptico e eletrônico.

- Medidas de descargas parciais

As medidas de descargas parciais também são técnicas de fundamental importância na determinação da degradação dos materiais. Para detecção das descargas parciais são utilizados diversos métodos; medidas de pulso das descargas^(28,29,30), métodos sônicos e eletrônicos^(29,30,31), e outros.

- Testes de vida acelerada

Os testes de vida acelerada tem contribuído muito para

a introdução de novos materiais isolantes. É o caso da deterioração termoquímica de materiais onde estes são submetidos a temperaturas superiores às de operação.

Testes de tensão acelerada são muito importantes para predizer o desempenho dos sistemas de isolação em operação. São realizados através de uma série de tensões mais elevadas do que as utilizadas em serviço. Tal medida é tomada a fim de produzir falha elétrica em curto espaço de tempo. Para efeito de comparação os resultados obtidos são extrapolados para a tensão de serviço.

Novas técnicas de testes acelerados tem sido desenvolvidas para medir a resistência superficial ao arco elétrico ou a descargas parciais sob condições de umidade e de poluição em sistemas de isolação. Estes testes incluem teste de nevoeiro e de poluição⁽³²⁾, testes de plano inclinado⁽³⁹⁾ utilizados para medir resistência ao "tracking" e à erosão, bem como outros métodos empregados para analisar condições de serviços.

2.5 - CONSIDERAÇÕES SOBRE MATERIAIS EMPREGADOS EM SISTEMAS DE ISOLAÇÃO ELÉTRICA

É evidente que nenhum dispositivo elétrico, por mais simples que seja, pode existir sem o emprego de materiais isolantes. Assim, o papel que os materiais isolantes desempenham nas instalações elétricas é muito importante. A vida de uma máquina depende sobretudo da isolação elétrica, da escolha e do emprego correto do material que compõe a isolação.

Dependendo do estado de agregação, os materiais isolantes se dividem em gasosos, líquidos e sólidos. No que tange a sua natureza química, podem ser classificados em orgânicos e inorgânicos. Os materiais orgânicos são compostos de carbono e geralmente também contêm hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e outros elementos. As demais substâncias são consideradas inorgânicas sendo que muitas delas contêm silício, oxigênio, alumínio e outros metais⁽⁵⁾.

Para o objeto de trabalho dessa pesquisa serão estudados os materiais sólidos especificadamente poliméricos e cerâmicos.

2.5.1 - Materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos são materiais inorgânicos que permitem a manufatura de peças de diversas formas, as quais ao serem submetidas a cozimento ou queima em altas temperaturas, sofrem processos físico-químicos complexos, adquirindo as propriedades necessárias para o seu uso técnico(5,33).

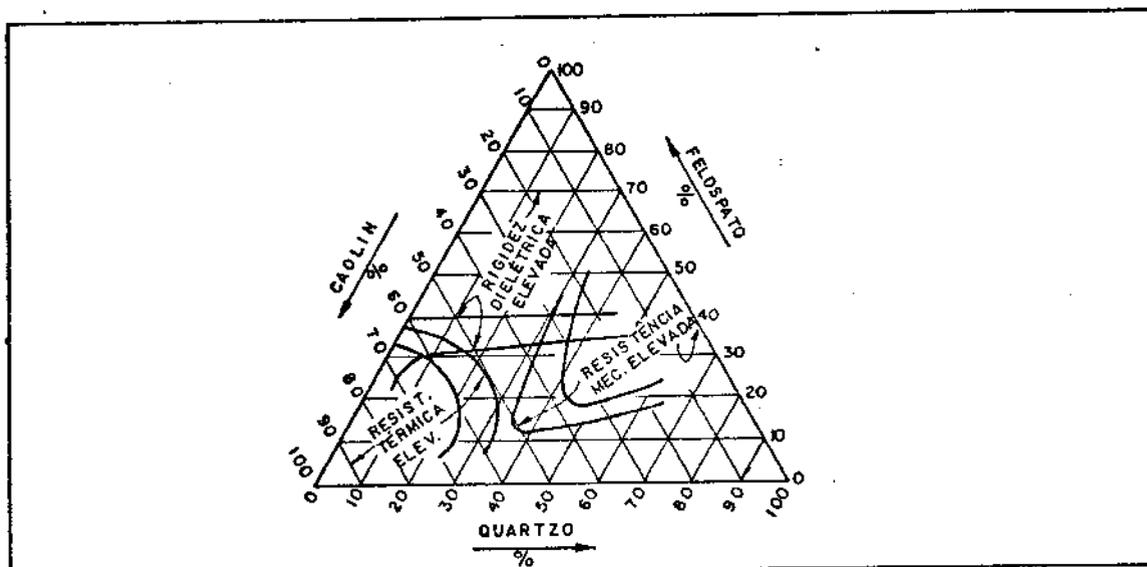
Os materiais cerâmicos abrangem uma grande variedade de substâncias naturais e sintéticas tais como cerâmica branca, esmalte refratário, vidros, cimentos, isolantes dielétricos, materiais de construção civil, abrasivos e muitos outros(33,34). Por essas razões, seu campo de aplicação é muito diverso. Em eletricidade, os materiais cerâmicos são empregados como semicondutores (bióxido de titânio), como materiais magnéticos (ferrita), ferroelétricos e especialmente são utilizados como isoladores elétricos(5).

Muitos materiais cerâmicos possuem alta resistência mecânica, ângulo de perda dielétrica muito pequeno, grande resistência ao calor e outras propriedades valiosas para o uso em isolamento elétrica.

As matérias primas mais importantes na composição de uma massa cerâmica são a argila, a sílica e o feldspato, sendo que a magnesita, a calcita, a cromita e outros minerais são utilizados em menor porcentagem, dependendo do uso específico que terá a peça(33).

O quadro 21 mostra a dependência existente entre as resistências elétricas, mecânica e a ação de calor, e por outro lado a composição de um material cerâmico. Observa-se pelo diagrama que os valores máximos destas três importantes propriedades não podem reunir-se em uma mesma composição. A substância argilosa (caolim) melhora as propriedades térmicas; o quartzo, as mecânicas e o feldspato, as elétricas.

Para o objeto de trabalho desta pesquisa, estudar-se-á apenas a porcelana empregada na fabricação de isoladores elétricos comumente conhecida como "porcelana elétrica".



QUADRO 21 - INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DA PORCELANA NA RIGIDEZ DIELETRICA, RESISTÊNCIA MECÂNICA E RESISTÊNCIA A TEMPERATURA. (Extraído do livro Técnicas de la Alta Tension Roth).

- Porcelana

A porcelana utilizada como material isolante é empregada desde o início do desenvolvimento da eletrotécnica, e até hoje ela é um dos principais materiais fabricados para esta função.

O processo de fabricação da porcelana envolve a utilização de argilas especiais - caolín, argila (clara muito pura e de alta qualidade), outros tipos de argilas (refratárias e plásticas), quartzo e feldspato⁽⁵⁾. O processo tecnológico de fabricação da porcelana exige cuidados para a eliminação das impurezas e para o processo de pulverização. Desta forma, a massa de porcelana é obtida misturando os materiais com água até que se consiga uma massa uniforme. Para a obtenção das diversas configurações das peças, existem diversos métodos de conformação:

colagem, extrusão e prensagem. Tais métodos interferem nas propriedades das peças acabadas. As operações que se seguem após a conformação são o recobrimento com verniz e o cozimento⁽²⁵⁾.

Para a fabricação de isoladores elétricos os materiais devem apresentar alta resistividade (ρ), alta resistência dielétrica e baixo fator de perdas. O quadro 22 apresenta as diversas composições dos materiais empregados em uma massa para equipamentos utilizados em alta tensão, segundo o método de conformação utilizado⁽³⁵⁾. O processo prensado úmido não aparece no esquema pois não é empregado na elaboração de peças destinadas a servir em alta tensão.

MATERIAL	EXTRUSÃO	COLAGEM
Caolim	15	25
Argila	30	20
Feldspato	35	35
Quartzo	20	20

QUADRO 22 - COMPOSIÇÃO DOS MATERIAIS EM PORCENTAGEM EM FUNÇÃO DO MÉTODO DE CONFORMAÇÃO. (Extraído do livro ref. 35 pg. 388).

A porcelana elétrica tem uma importância extraordinária na técnica de alta tensão devido a vários fatores: boa resistência aos agentes atmosféricos, químicos e físicos de todo o gênero, ser um material de baixa higroscopia e resistente a elevadas temperaturas; possuir um preço moderado e ainda ser um material que se adapta em quase todas as formas construtivas sem necessidade de juntas.

2.5.2 - Materiais polímeros

Os polímeros são materiais de alto peso molecular, ou

seja, possuem cadeias longas. Cada cadeia polimérica é uma macromolécula formada pela repetição de pequenas unidades estruturais ligadas por covalência. As muitas unidades de repetição (meros) de cada cadeia são geradas a partir de pequenas moléculas (monômeros) que são as matérias primas dos polímeros (36).

Em relação à origem dividem-se em : naturais, naturais modificados e sintéticos. Para os polímeros sintéticos, sua obtenção por reações químicas denomina-se síntese ou polimerização.

Dependendo de suas propriedades, características, processamento e forma de aplicação, os polímeros quando empregados como produtos fornecem plásticos, borrachas, fibras, adesivos, espumas, tintas e revestimentos.

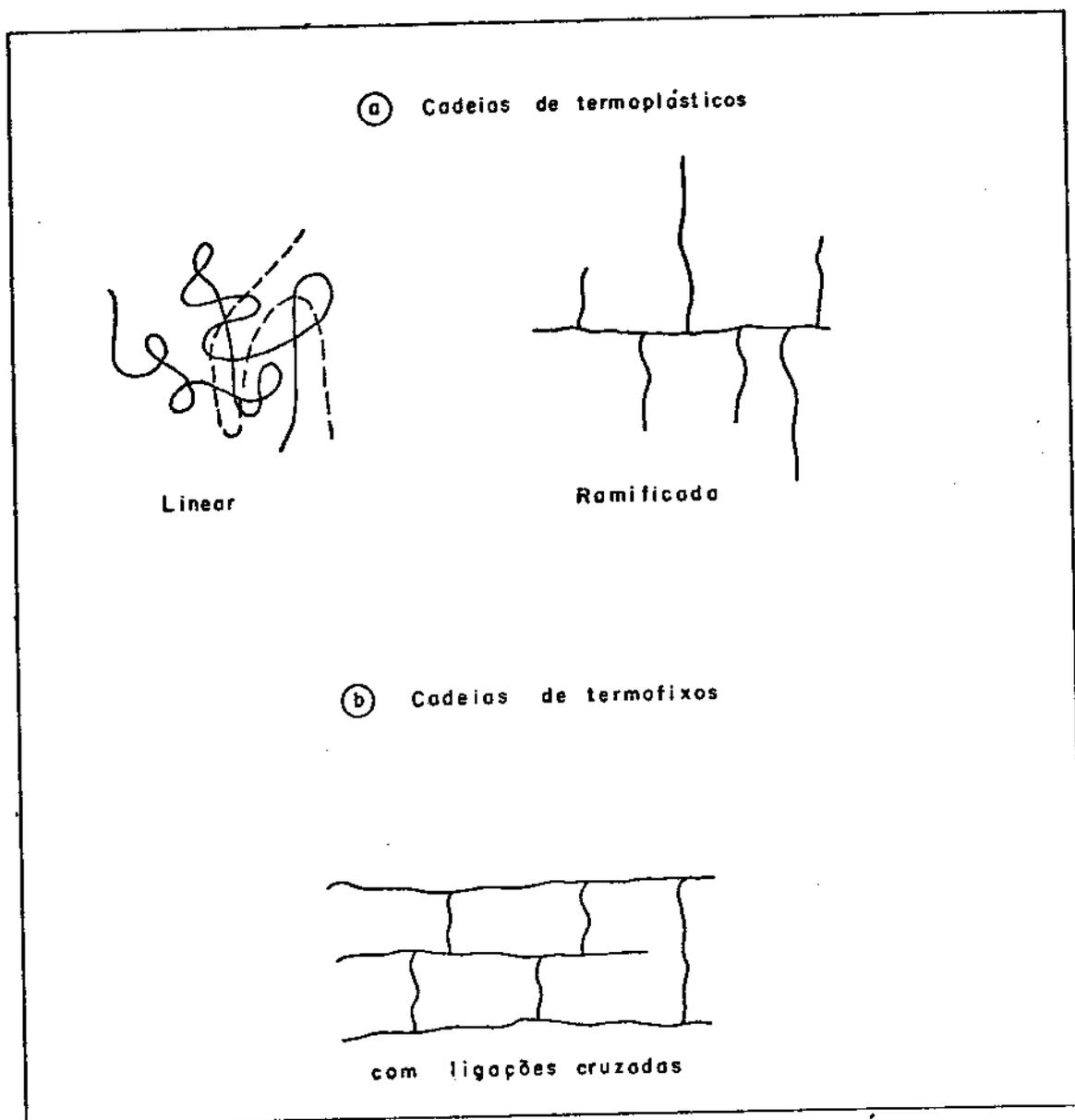
Em função do tipo de cadeia polimérica e, conseqüentemente, das suas propriedades tecnológicas, os polímeros são divididos em duas grandes classes: termoplásticos e termofixos (termorrígidos ou termoestáveis) (36,37,38,39).

Os termoplásticos são polímeros com cadeias lineares ou ramificadas, ou seja, com cadeias não interligadas, conforme ilustra a figura a do quadro 23. Em conseqüência disto, os termoplásticos amolecem sob o efeito da temperatura e de pressão, podendo ser remoldados e solúveis em solventes adequados, sem que sejam alteradas as suas propriedades básicas. São exemplos de termoplásticos: polietileno de baixa e de alta densidade, poliestireno, policloreto de vinila (PVC) e poliésteres saturados.

Os termofixos, ao contrário, possuem cadeias interligadas por ligações covalentes que formam as ligações cruzadas ou pontes entre cadeias, conforme mostra a figura b do quadro 23. Desta maneira, os termofixos são insolúveis, infusíveis e não podem ser remoldados. São exemplos de termofixos: poliésteres insaturados, epoxi, e outros.

Se um isolamento elétrico deve suportar o efeito de elevadas temperaturas sem se deformar ou fundir e ainda conservar sua alta resistência mecânica, para esta finalidade devem ser empregados os polímeros termofixos. Os termoplásticos, por

sua vez, são muito mais elásticos e menos propensos ao envelhecimento térmico, além do fato de sua tecnologia de elaboração ser na maioria dos casos muito mais simples⁽⁵⁾.



QUADRO 23 - DIFERENTES TIPOS DE CADEIRAS POLIMÉRICAS.

Para o objeto de trabalho desta pesquisa serão estudados os seguintes materiais poliméricos: polietileno de baixa densidade e polimetil metacrilato.

Polietileno de baixa densidade (PEBD)

O polietileno de baixa densidade é um polímero que se comporta como termoplásticos, pertencendo também ao grupo dos materiais não polares (29,37,38).

Sua estrutura química é simples, constituída por uma cadeia carbônica e por hidrogênios ligados lateralmente. É obtido a partir da polimerização do etileno ($H_2C = CH_2$) através de processo via radicais livres a alta pressão (38).

Tal processo utiliza pressões altas da ordem de 1.000 a 3.000 atm e temperaturas na faixa de 80 a 300°C, obtendo-se desta maneira o polietileno de baixa densidade. Sua característica estrutural é responsável pela menor densidade. Devido às condições de polimerização durante o processo de obtenção do polietileno, observa-se a formação de uma grande quantidade de ramificações.

Estas ramificações têm pesos moleculares bem diferentes umas das outras e podem também apresentar sub ramificações ou até mesmo ligações cruzadas com outras moléculas de polietileno.

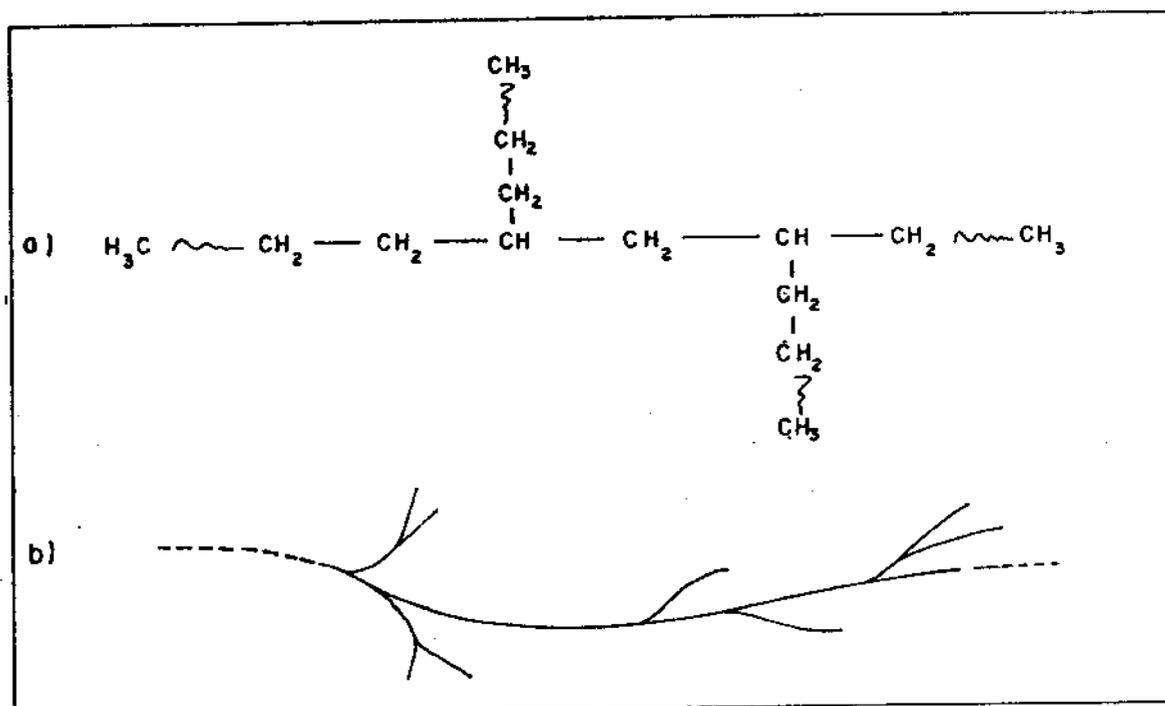
Esquemáticamente, o polietileno de baixa densidade pode ser mostrado conforme o quadro 24. Observa-se ao longo da cadeia principal as ramificações e sub-ramificações.

Em consequência da presença de ramificações, o PEBD apresenta propriedades tais como: flexibilidade, transparência, baixa densidade e aumento do volume livre (38).

De um modo geral, as principais características do polietileno, além do seu baixo custo são: possuem excelentes propriedades de isolamento elétrico, boa resistência química, fácil processabilidade, boa dureza, flexibilidade e boa transparência em filmes finos (39).

Por estas razões e por possuir higroscopia bastante pequena (0,01%) e ainda boa elasticidade, este material é empregado largamente em isolamentos de cabos, condutores tanto para radiofrequências ou em cabos telefônicos, como para cabos de energia; sem que produzam perdas dielétricas consideráveis. A

natureza não polar deste polímero é ideal para tais atividades. Além destas aplicações o polietileno tem uso generalizado em equipamentos e máquinas de baixa, média e alta tensão(5,37).



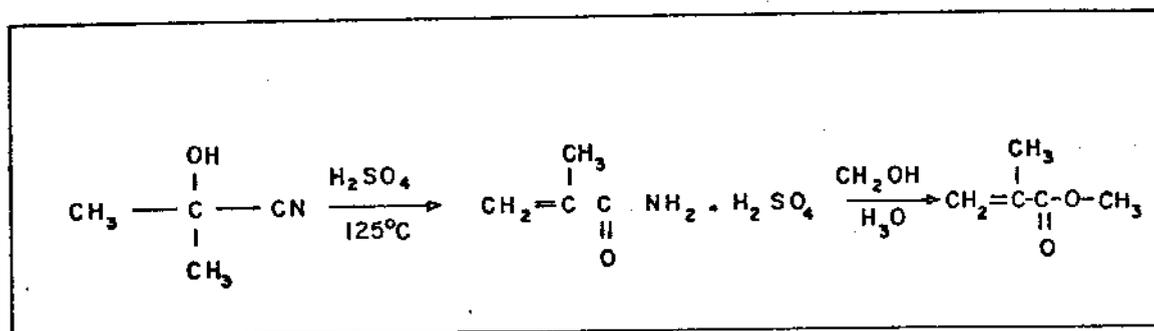
QUADRO 24 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA (a e b) DO POLIETILENO RAMIFICADO (P. E. B. D.) (Segundo ref. 45 e 47)

Especificamente o polietileno de baixa densidade, por ser menos pesado (0,91 a 0,925 g/cm³), apresenta vantagens quando empregado na proteção mecânica de cabos e fios(29,37).

Polimetil metacrilato (PMMA)

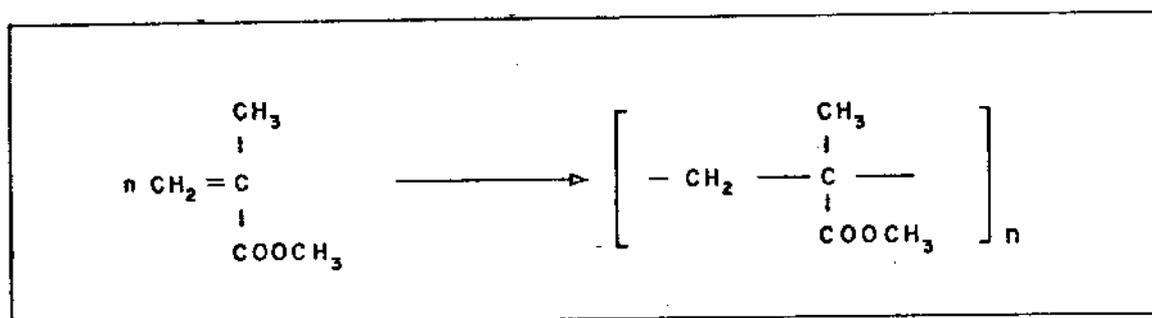
O polimetil metacrilato é um polímero claro, incolor e transparente que se comporta como termoplástico. Faz parte do grupo dos materiais polares. É conhecido comercialmente com os nomes de plexiglass, lucite, perspex, vidro orgânico, acrílico e outros(37).

O metil metacrilato é sintetizado a partir do aquecimento da cianidrina de acetona com ácido sulfúrico para formar sulfato de metacrilamida, o qual é levado a agir com água e metanol para resultar no metil metacrilato (quadro 25)



QUADRO 25 - PROCESSO DE SÍNTESE DO METIL METACRILATO

O polimetil metacrilato é obtido por polimerização em massa (quadro 26), através de um processo lento, a fim de se evitar que tensões possam produzir fissuras na massa dura, incolor e transparente resultante (40).



QUADRO 26 - POLIMERIZAÇÃO EM MASSA PARA OBTENÇÃO DO POLI-METIL METACRILATO (PMMA).

As propriedades que mais se destacam neste polímero é a sua transparência ótica. As propriedades mecânicas e térmicas

são relativamente boas. Desta maneira é largamente aplicado em automóveis, jóias, lentes, rótulos e para fins decorativos na indústria de construção(37).

Apesar de não possuir excelentes propriedades elétricas, o PMMA desprende grandes quantidades de gases (CO , H_2 , vapor de H_2O , CO_2) sob o efeito de um arco elétrico. Quando a ruptura do arco é produzida em um espaço limitado que abriga uma peça de PMMA, os gases que se desprendem criam uma elevada pressão que facilita a extinção do arco. Por esta razão o PMMA é considerado um material supressor de arco elétrico, sendo aplicado nos descarregadores de alta tensão(5).

CAPITULO 3

PARTE EXPERIMENTAL

3.1 - MATERIAIS

Para a realização da parte experimental deste trabalho, foram utilizados os seguintes materiais: polietileno de baixa densidade (PEBD), polimetil metacrilato (PMMA) e porcelana. Estes materiais foram escolhidos por serem materiais largamente utilizados como isolantes elétricos nas mais variadas aplicações de eletricidade e pela disponibilidade de matéria prima em quantidade suficiente para a elaboração das amostras.

O polietileno de baixa densidade utilizado é de fornecimento da Poliolefinas, do tipo MN 379 do lote 90049 na forma de granulado.

O polimetil metacrilato foi adquirido em placas vendidas comercialmente com espessura de 8mm.

A porcelana utilizada apresentou as seguintes composições conforme análise química:

- P.F. = 6,20%
- SiO₂ = 66,15%
- TiO₂+Al₂O₃ = 22,21%
- Fe₂O₃ = 0,793%
- CaO = 0,3487%
- MgO = 0,65%
- K₂O = 2,77%
- Na₂O = 0,876%

As constantes dielétricas do PEBD, do PMMA e da porcelana foram adotadas como sendo respectivamente 2,25; 3,4 e 5,9.

3.2 - SISTEMAS DE ELETRODOS UTILIZADOS

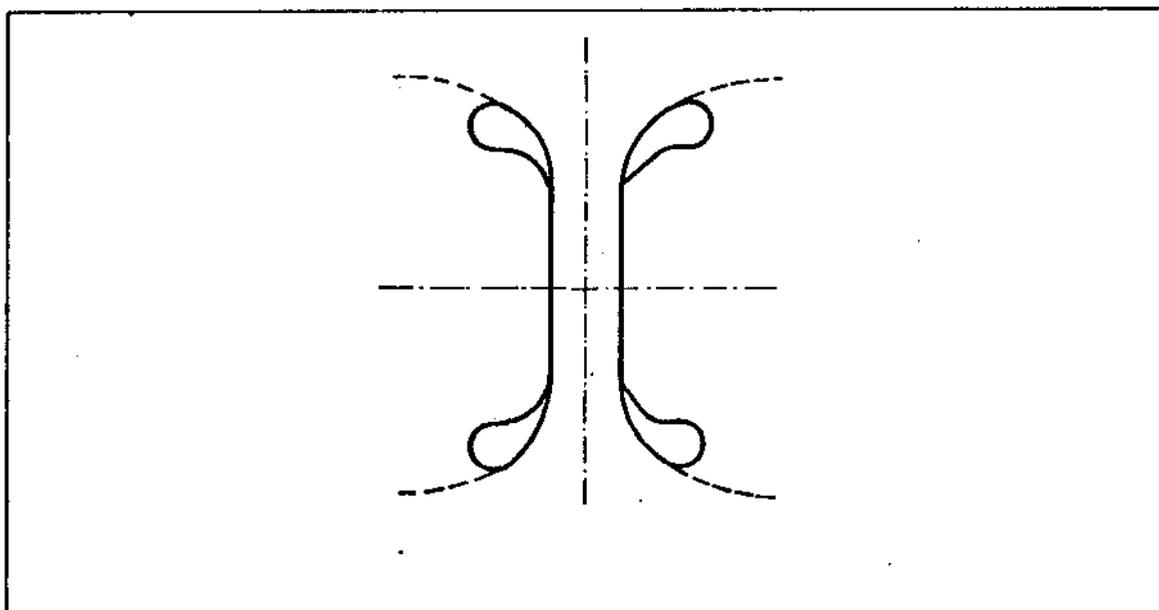
Na parte experimental deste trabalho foram utilizados dois tipos de configurações de eletrodos:

- a) sistema de eletrodo de placas paralelas: para analisar a influência do meio isolante na tensão disruptiva crítica (V_{50%}) de impulso.

- b) sistema de eletrodos de ponta-placa: para analisar os efeitos da descarga de impulso em materiais isolantes

3.2.1 - Configuração do eletrodo placa-paralela

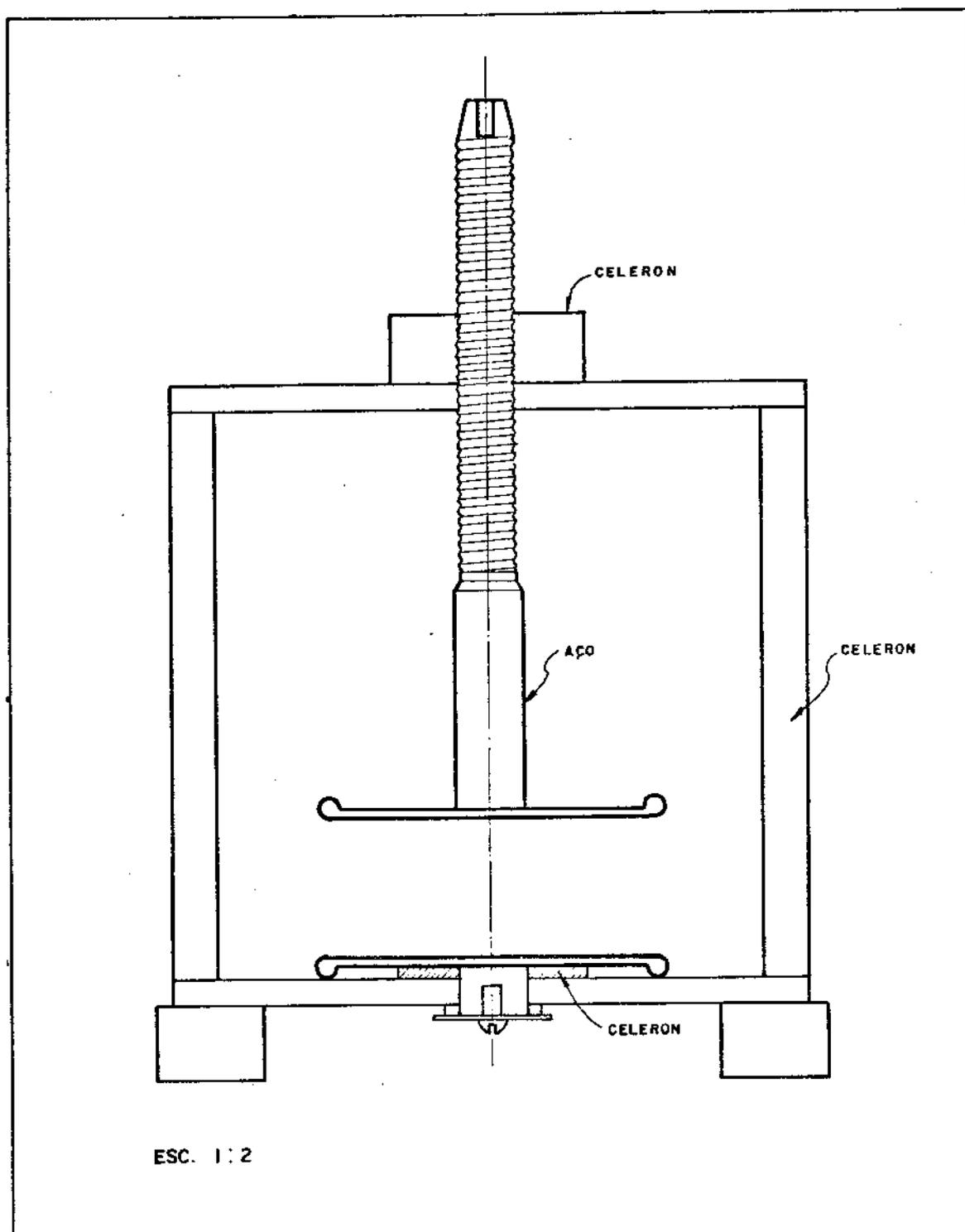
Uma primeira dificuldade em construir este sistema de eletrodos de placas paralelas é o grande cuidado que deve ser tomado durante a sua construção para evitar concentrações de tensões nas bordas. Segundo Cobine⁽⁴¹⁾, próximo às bordas dos eletrodos planos, o raio de curvatura deve ser diminuído gradualmente, de tal maneira que em nenhum ponto o campo elétrico torne maior que o do centro da região plana (quadro 27). Garante-se desta forma, que o campo elétrico produzido por este sistema seja homogêneo.



QUADRO 27 - CURVATURA DAS BORDAS DE UM ELETRODO PLANO
(Segundo ref. 41 pg. 179)

Para evitar esse tipo de problema utilizou-se um cano de cobre soldado nas bordas das placas planas de tal modo a dar perfeita continuidade entre a placa e o cano de cobre.

Outra preocupação a ser considerada é o tipo de material utilizado na construção do sistema de eletrodos, tanto para o suporte quanto para o eletrodo em si, pois podem influenciar nos resultados. Assim, para a construção dos eletrodos foram utilizados o aço e para o suporte de isolamento o celeron (conforme consulta a ASTM-149⁽⁴²⁾). Um esquema geral do sistema de eletrodos placas paralelas utilizado é ilustrado no quadro 28).



QUADRO 28 - ESQUEMA DE ELETRODO PLACAS PARALELAS.

Este eletrodo foi construído de tal maneira que a placa superior pudesse se deslocar verticalmente para variar o espaço entre as placas.

3.2.2 - Configuração do eletrodo ponta-placa

Para a construção do eletrodo ponta utilizou-se novamente o aço, aproveitando-se a estrutura do suporte do sistema de eletrodos de placas paralelas, o eletrodo superior (ponta) foi construído de tal maneira a possibilitar o seu deslocamento na vertical e aproximar-se do eletrodo plano inferior. Detalhes desse sistema de eletrodos encontram-se no quadro 29.

3.3 - ELABORAÇÃO DAS AMOSTRAS

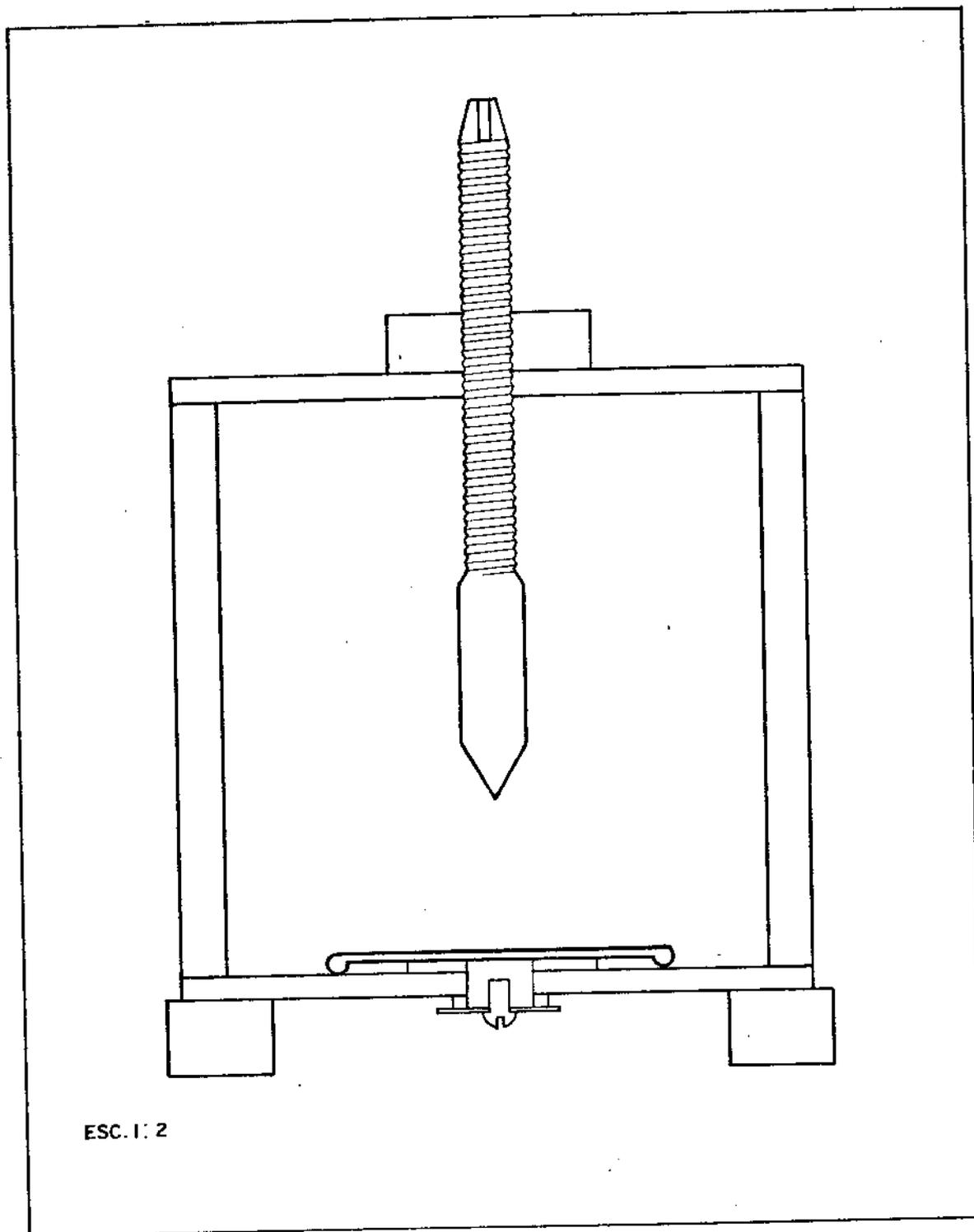
O formato das amostras foi fixado em discos de maneira a acompanhar a distribuição do campo gerado pelo sistema de eletrodos de placas-paralelas ou de ponta-plana. Tal formato permite que a superfície da amostra fique equidistantes do eletrodo de ponta quando esta for submetida a descarga de impulso atmosférico.

O diâmetro do material foi escolhido em 5cm, pela menor dificuldade em se preparar amostras com este tamanho com menor incidência de defeitos e imperfeições.

Devido a ausência de literatura que enfoquem todas as etapas necessárias para o processamento das amostras, e também a grande dificuldade enfrentada durante esta fase da pesquisa, esse ítem se preocupa com a descrição pormenorizada dos procedimentos adotados nessa fase.

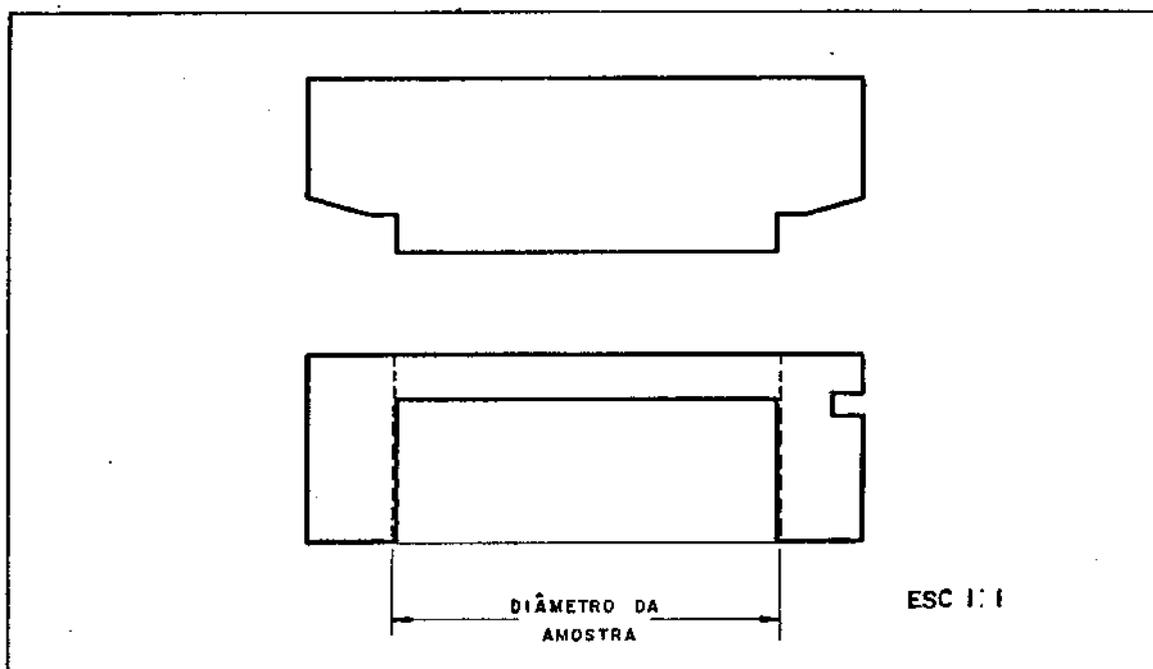
a) Amostras de PEBD

Para a elaboração das amostras de PEBD foi construído um molde em latão, de tal forma que as amostras mais finas fossem processadas inicialmente, e as mais espessas à medida que o molde fosse sendo desbastado. Detalhes desse molde encontram-se no quadro 30.



ESC. 1: 2

QUADRO 29 - ESQUEMA DO ELETRODO PONTA PLACA



QUADRO 30 - ESQUEMA DO MOLDE DE ELABORAÇÃO DAS AMOSTRAS DE P E BD.

As seguintes etapas devem ser seguidas para a elaboração das amostras de PEBD:

1ª etapa - Preparação do molde

O molde deve ser limpo, polido e aquecido a uma temperatura de 130°C. A fim de se evitar a adesão do material deve-se pulverizar desmoldante e o excesso deve ser retirado pois poderão afetar a superfície da amostra.

2ª etapa - Pesagem do material

A fim de se garantir que a quantidade de material presente no molde seja suficiente para eliminar as bolhas formadas durante o processamento, o material a ser colocado no molde deve exceder em torno de um terço o peso da amostra.

3ª etapa - Colocação do material

O material a ser colocado sobre o molde não deve ser espalhado para facilitar a eliminação de bolhas.

4ª etapa - Processamento da amostra

O processo de fabricação das amostras deve manter as seguintes condições:

- temperatura do molde 130°C
- tempo de pré-aquecimento do molde 2min
- tempo para fusão dos grânulos ... 2min
- pressão de prensagem 1 t
- tempo de prensagem 2min

A carga aplicada durante o processo de prensagem deve ser feita para facilitar a retirada do ar ou os gases gerados presentes entre os grânulos do material.

O estudo da degradação do PEBD realizado por meio de um espectrofotômetro de absorção de infra-vermelho pelo processo de transmissão exigiu a elaboração de amostras transparentes e com espessuras menores que meio milímetro. Dessa maneira as amostras que foram expostas às descargas foram novamente processadas por intermédio de um outro molde constituído de duas placas planas de latão, sem defeitos superficiais.

Para realizar esses filmes de PEBD, as seguintes etapas devem ser seguidas:

1ª etapa - Preparação do molde

Para evitar contaminação e para maior facilidade na retirada do filme, as placas utilizadas como molde devem ser recobertas com folhas de alumínio (com a face polida em contato com o polímero). Esta característica de polimento permite obter filmes transparentes.

2ª etapa - Colocação do material

Uma certa quantidade da amostra a ser reprocessada deve ser colocada sobre o molde para dar início ao processamento.

3ª etapa - *Processamento da amostra*

O processo de fabricação dos filmes de PEBD deve manter as seguintes condições:

- temperatura da placa superior e inferior da prensa 130°C
- tempo de aquecimento do molde e fusão dos grânulos 2min
- pressão de prensagem 1 t
- tempo de prensagem 2min

Após o tempo de prensagem deve-se esfriar naturalmente para obter amostras lisas, sem imperfeições superficiais

b) Amostras de polimetil metacrilado (PMMA)

O processo de elaboração das amostras de PMMA deve ser desenvolvido tomando-se os seguintes cuidados:

- a placa de PMMA deve ser recortada em discos (serra de fita) em diâmetros maiores que a medida final.
- ao se facear os discos no tórno mecânico deve-se utilizar um fluído de corte (querozene) para dar acabamento mais fino na amostra. A espessura deve ser controlada (micrômetro), até a obtenção da medida final.
- para obter o diâmetro definitivo deve-se novamente recortar a amostra (serra de fita) em um diâmetro mais próximo da medida desejada e dar o acabamento no tórno.

c) Amostra de porcelana

Para se obter as amostras de porcelana, pelo processo de colagem, as seguintes etapas e cuidados devem ser respeitados:

1ª etapa - *Confecção do modelo*

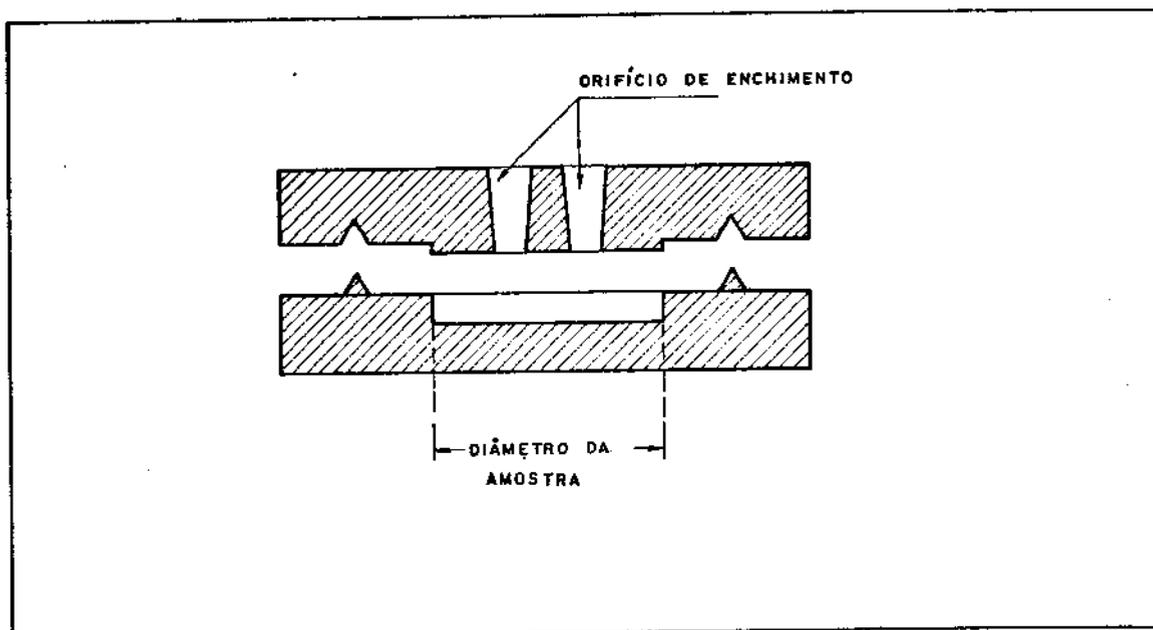
Os modelos dos discos de porcelana devem ser confeccionados em materiais que não sofram alterações quando umedecido e se destaquem facilmente quando da execução do molde (poliester).

As dimensões de espessura e diâmetro devem ser acrescidas de 10% em relação às dimensões finais, devido à retração que a peça sofre durante o processamento.

O acabamento superficial do modelo deve ser o mais fino possível para se garantir a qualidade da peça final.

2ª etapa - Confeção do molde

O molde deve ser feito em duas partes para facilitar o destacamento da amostra. O quadro 31 ilustra o esquema do molde utilizado para a elaboração das amostras.



QUADRO 31 - ESQUEMA DO MOLDE DE ELABORAÇÃO DAS AMOSTRAS DE PORCELANA.

A consistência do gesso para confeccionar o molde deve fornecer bons resultados de colagem para barbotinas (suspensão de argila) de densidade 1,60 a 2,00 g/cm³ e proporcionar um molde resistente a quebras (utilizou-se 75, isto é, para 100 partes de gesso, mistura-se 75 partes de água).

Fixado o modelo e feito o cercado nas dimensões apropriadas ao molde (no nosso caso, 3cm maior que o modelo), o

gesso deve ser preparado e despejado no cercado. Uma vez endurecido, deve-se destacar o modelo do molde.

3ª etapa - Preparação da suspensão de argila

A suspensão de massa deve ser preparada com água, com densidade próxima a $1,56\text{g/cm}^3$ e defloculada com silicato de sódio em agitação constante.

4ª etapa - Processo de colagem das amostras

Para processar as amostras, a barbotina deve ser despejada no molde. O gesso, absorvendo a água lentamente, proporciona uma adesão dos grãos de argila na parede do molde, colando o material de fora para dentro. Depois de colada, e mesmo durante o processo da colagem, a argila forma uma parede densa, devido a sua plasticidade. Acabado o processo de colagem a amostra deve ser retirada.

5ª etapa - Secagem e queima

As amostras, após sofrerem um processo de acabamento superficial, devem ser secas a 110°C em estufa. Depois de secas, devem ser queimadas a 1250°C , com patamar de uma hora aproximadamente.

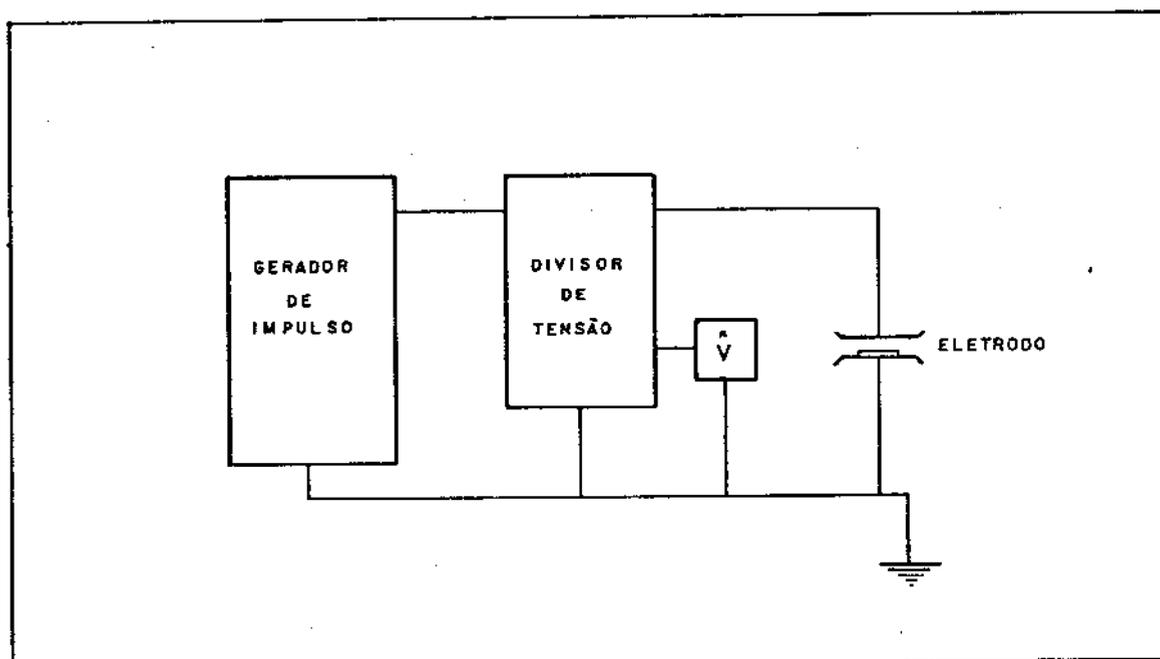
As amostras produzidas apresentaram as seguintes espessuras em mm.

PEBD	PMMA	PORCELANA
1,3	1,7	1,3
1,4	2,1	1,9
1,9	3,1	2,1
2,1	4,0	2,6
2,4	5,0	3,1
3,0		
3,9		

3.4 - MEDIDAS DE TENSÃO DISRUPTIVA CRÍTICA

Os estudos do comportamento do sistema de eletrodos utilizados e da influência da introdução de outros meios dielétricos em sistemas isolados a ar, foram realizados através dos valores da tensão disruptiva crítica de impulso. Tais valores foram obtidos por meio da aplicação de impulso de tensão de forma padronizada (1,2/50 μ s). Como a disruptiva do ar ocorre de modo aleatório, estes valores foram adotados como os de V50%, isto é, como sendo o valor de pico da tensão impulsiva com intensidade de tal que provoque uma descarga em experiências sucessivas em 50% de todos os casos(17).

O gerador que produziu a tensão de impulso é constituído por capacitores os quais são carregados em paralelo e descarregados em série via resistência e indutâncias do sistema. A montagem experimental utilizada encontra-se esquematizada no quadro 32.



QUADRO 32 - ESQUEMA DO SISTEMA DE ENSAIO .

O método utilizado para determinar os valores da tensão disruptiva crítica (V50%) foi o de acréscimo e decréscimo. Este método encontra-se desenvolvido em diversos livros, publicações e normas especializadas sobre o assunto, por exemplo nas referências 14, 43, 44 e 45.

O método constitui basicamente em:

- 1) Escolher uma tensão U_K admitida aproximadamente igual à tensão disruptiva ($U_{50\%}$) e um degrau de tensão ΔU (aproximadamente 3% de U_K). Um impulso ao nível de U_K é então aplicado. Se este impulso não causar uma descarga disruptiva, o próximo degrau deverá ter um nível de $U_K + \Delta U$. Se ocorrer uma descarga disruptiva ao nível de U_K , o próximo impulso deverá ter o nível $U_K - \Delta U$. Assim o nível de cada impulso é determinado pelos resultados anteriores.
- 2) Este procedimento é repetido até que um número suficiente de observações tenha sido registrado. A tensão de descarga disruptiva ($U_{50\%}$) é determinada por:

$$U_{50\%} = \frac{\sum n_v U_v}{\sum n_v}$$

Nos testes de equipamentos as normas existentes recomendam que o número de aplicações (n_v) seja maior ou igual a vinte e menor ou igual a 40.

Para o nosso caso, o número de aplicações de tensão foi fixado em trinta e o degrau de tensão ΔU de 3% de U_K . Os valores das tensões de descargas disruptivas ($U_{50\%}$) obtidos foram corrigidos para as condições normais de temperatura e pressão (IEC-168 e IEC-60.1).

3.5 - APLICAÇÃO DE DESCARGA ELÉTRICA SOBRE OS MATERIAIS

Para estudar a influência que a descarga elétrica provoca nos materiais dielétricos, utilizou-se o sistema de eletrodo ponta-placa, conectado ao divisor de tensão conforme o esquema apresentado no quadro 31. Esse sistema de eletrodos proporciona um campo elétrico não homogêneo, adequado portanto ao estudo dos efeitos provocados no material pelas descargas que incidem sobre a amostra.

Para eliminar qualquer possibilidade da descarga não atingir o material, o eletrodo energizado, no caso o de ponta, foi colocado na posição central em contato à superfície da amostra a ser observada.

Na escolha da tensão de descarga, o material foi submetido a pequenas tensões de impulso positivo, que foram sendo aumentadas gradativamente até a ocorrência da primeira descarga. Essa descarga é caracterizada pela passagem do impulso de corrente, visível a olho nũ, sobre a superfície do material. Desta maneira, a tensão de impulso que provocou a descarga pode ser considerada probabilisticamente como sendo a menor possível.

3.6 - ANÁLISE PELA ABSORÇÃO DO INFRA-VERMELHO

O infra-vermelho pode ser medido através de sua frequência ou comprimento de onda. O comprimento de onda é expresso em microns ($1\mu\text{m} = 10^6\text{m}$), variando entre 2,5 até $50\mu\text{m}$, e o número de onda em centímetro inverso (cm^{-1}), variando dentre 4000 até 200cm^{-1} para a região do infra-vermelho.

A radiação infra-vermelha absorvida por uma molécula orgânica, é transformada em vibração das suas ligações. Este processo é quantizado, e, no espectro vibracional é possível se notar a presença de bandas de absorção bastante características para cada ligação⁽⁴⁶⁾.

Assim, a degradação de um material polimérico pode ser observada através da análise das intensidades dessas bandas. Conforme estudos de Y. Toriyama⁽²⁷⁾, durante a degradação do polietileno provocada por descargas parciais, há o surgimento de grupos carbonílicos, os quais apresentam uma banda de absorção na região de 1715cm^{-1} . Desta maneira, estes pesquisadores acompanharam a degradação do polietileno através de medidas de absorbâncias nesta faixa de frequência.

Existem diversas formas para se medir as absorbâncias, uma delas é através da Lei de Beer, outra consiste na comparação das áreas formadas pelos espectros de absorção. Uma outra maneira, apenas qualitativa, consiste em observar o desenvolvimento do espectro perante os diversos ensaios realizados.

O nosso estudo, além de acompanhar o desenvolvimento do espectro, também se restringiu à comparação dessas áreas, com o intuito de se acompanhar o crescimento da concentração de

grupos carbonílicos e observar qualitativamente a degradação do polietileno de baixa densidade.

Para a realização destas observações foram escolhidas e adotadas as seguintes regiões do espectro de absorção ao infra-vermelho:

região I - 630 a 830cm^{-1} - corresponde a uma região que não sofre a influência da descarga.

região II - 1700 a 1780cm^{-1} - corresponde a região responsável pela formação de grupos carbonílicos e que se pretende analisar.

No espectro os pontos que definem as regiões foram interligados, formando uma área em cada região.

A análise dos resultados é feita obtendo-se a área de cada uma das regiões e fazendo comparações com as áreas dos diversos espectros que se deseja estudar.

Desta maneira, isto foi realizado para os espectros das amostras solicitadas a 3400 e 5600 descargas.

Obteve-se assim, duas áreas para cada espectro que foram denominadas da seguinte maneira:

- no espectro da amostra solicitada a 3400 descargas - região I=C e região II=D
- no espectro da amostra solicitada a 5600 descargas - região I=A e região II=B

As medidas das áreas foram obtidas por meio de um planímetro, cujo cursor foi percorrendo todo o perímetro da área. Desta forma, realizaram-se várias leituras para cada área na escala 1:1 e determinou-se a sua média.

De posse das áreas, foi possível realizar a comparação entre elas, ou seja: a área da região I (C) do espectro da amostra submetida a 3400 descargas foi comparada com a mesma região (A) da amostra solicitada a 5600 descargas. O índice R_1 é a razão entre estes dois resultados. O mesmo foi feito para a região II obtendo-se um outro índice R_2 .

Dessa forma, pode ser feita uma comparação dos espectros das amostras submetidas a diferentes números de solicitações de descarga.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS E DISCUSSÃO

Para facilitar a análise e discussão dos resultados experimentais obtidos, estes foram divididos em três itens:

- a) Tensão disruptiva crítica de impulso dos sistemas de eletrodos para o ar como isolante;
- b) efeito do meio isolante na tensão disruptiva crítica;
- c) influência da descarga elétrica em materiais sólidos.

A apresentação dos resultados foi colocada no final do seu respectivo item.

4.1 - TENSÃO DISRUPTIVA CRÍTICA DE IMPULSO

Para analisar os efeitos provocados por uma descarga elétrica sobre o meio dielétrico utilizado é necessário antes de mais nada conhecer o comportamento do sistema de eletrodos utilizados. Para isto, a melhor forma é utilizar um sistema de eletrodos de placas-paralelas e de ponta-placa por produzirem campos homogêneos e não homogêneos, cujos efeitos e características são definidas e bastante conhecidas.

Um sistema de eletrodos, cujas dimensões são conhecidas e definidas é caracterizado quando se conhece os valores da sua tensão disruptiva, seja em 60 Hz ou em impulso, quando o meio dielétrico é o ar.

Assim, antes de iniciarmos o estudo da degradação do material sólido, foi levantada a curva característica para os dois sistemas de eletrodos utilizados, com a tensão de impulso na sua forma padronizada (1,2/50 μ s) nas polaridades negativa e positiva.

Os resultados encontram-se nas tabelas I e II e as suas curvas nas figuras 1, 2 e 3.

Como era de se esperar o comportamento das curvas características coincidem com os resultados já clássicos, mostrando um crescimento quase linear da tensão disruptiva em relação

a distância no caso de polaridade negativa, e menos acentuado no caso positivo, tendendo a saturação a partir de uma certa distância do gap.

A origem desta diferença entre as polaridades positiva e negativa encontra-se fundamentalmente nos processos de ionização.. No caso em que o eletrodo energizado é positivo, os elétrons que partem do cátodo em direção ao ânodo, após uma certa distância do gap, não conseguem alcançar o ânodo devido a presença muito grande de íons positivos. Estes íons neutralizam os elétrons antes de alcançar o ânodo, daí a razão de apresentar uma tendência a saturação.

Naturalmente, que para o comportamento da curva característica, além desta diferença fundamental, outros fatores também influem, tais como, a geometria, condições ambientais, o material do eletrodo, o gradiente de elevação da tensão, etc.

Note-se que apesar do comportamento das curvas obtidas serem similares para ambos os sistemas de eletrodos, o de ponta-placa em termos de níveis de tensão é mais severa que o de placas paralelas. A diferença no caso advém da não homogeneidade do campo produzida no primeiro tipo de sistema de eletrodos, a qual a sua intensificação acelera o movimento dos íons e elétrons reduzindo a tensão disruptiva crítica.

TABELA I - Tensão disruptiva crítica e tensão suportável do ar para o sistema de eletrodos de placas paralelas

a) polaridade positiva

d (cm)	Vc.F.O. (KV)	V _s (KV)
1	30,96	29,76
2	47,89	46,02
3	63,65	61,17
4	72,99	70,14
5	77,45	74,42
6	82,58	79,36
7	86,82	83,44
8	85,84	82,49

b) polaridade negativa

d (cm)	Vc.F.O. (KV)	V _s (KV)
1	31,01	29,80
2	46,35	44,55
3	62,09	59,67
4	90,70	87,16
5	106,89	102,71
6	118,58	113,96
7	133,57	128,36
8	144,40	138,77

TABELA II - Tensão disruptiva crítica e tensão suportável do ar para o sistema de eletrodo ponta-placa

a) polaridade positiva

d (cm)	Vc.F.O. (KV)	V _s (KV)
1	17,79	17,06
2	34,02	32,69
3	48,80	46,90
4	52,95	50,89
5	61,65	59,24
6	66,71	64,10
7	74,70	71,80
8	78,54	75,48

b) polaridade negativa

d (cm)	Vc.F.O. (KV)	V _s (KV)
1	26,22	25,20
2	38,39	36,90
3	55,50	53,33
4	73,32	70,46
5	89,20	85,72
6	108,60	104,82
7	125,91	121,00
8	150,29	144,43

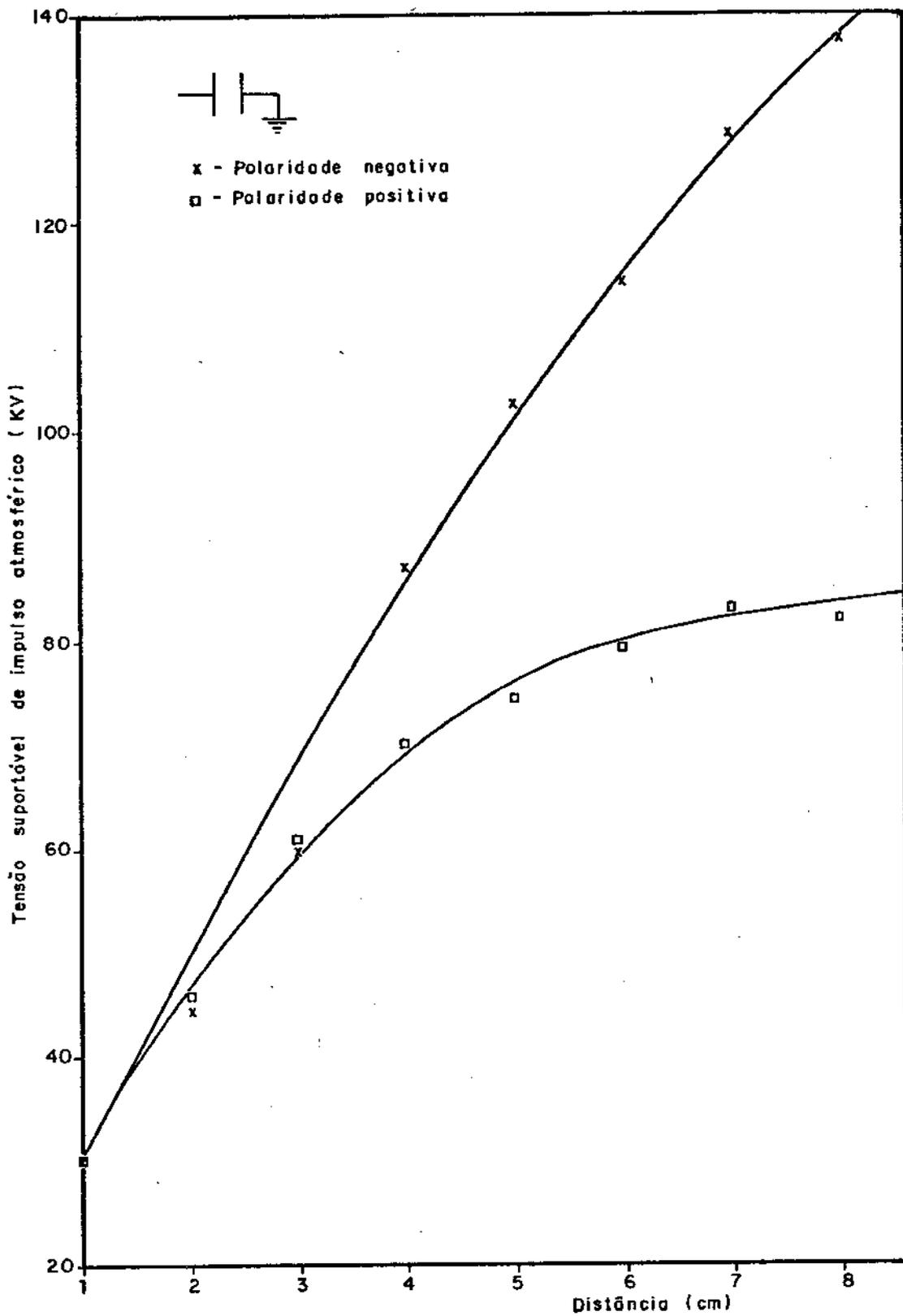


FIG.1 - CURVA CARACTERÍSTICA DO SISTEMA DE ELETRODO PLACAS PARALELAS UTILIZADO.

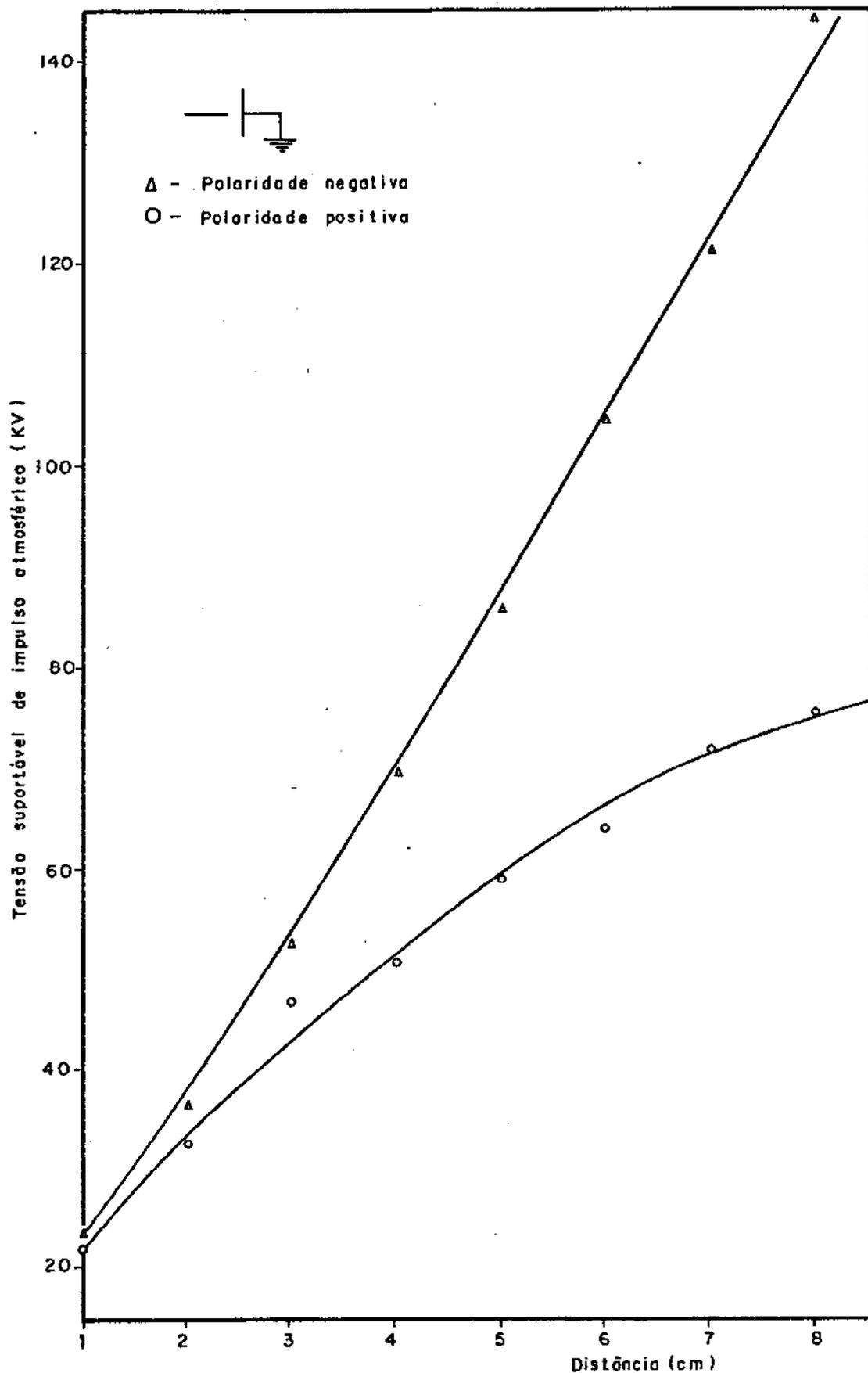


FIG. 2 - CURVA CARACTERÍSTICA DO SISTEMA DE ELETRODO PONTA-PLACA UTILIZADO.

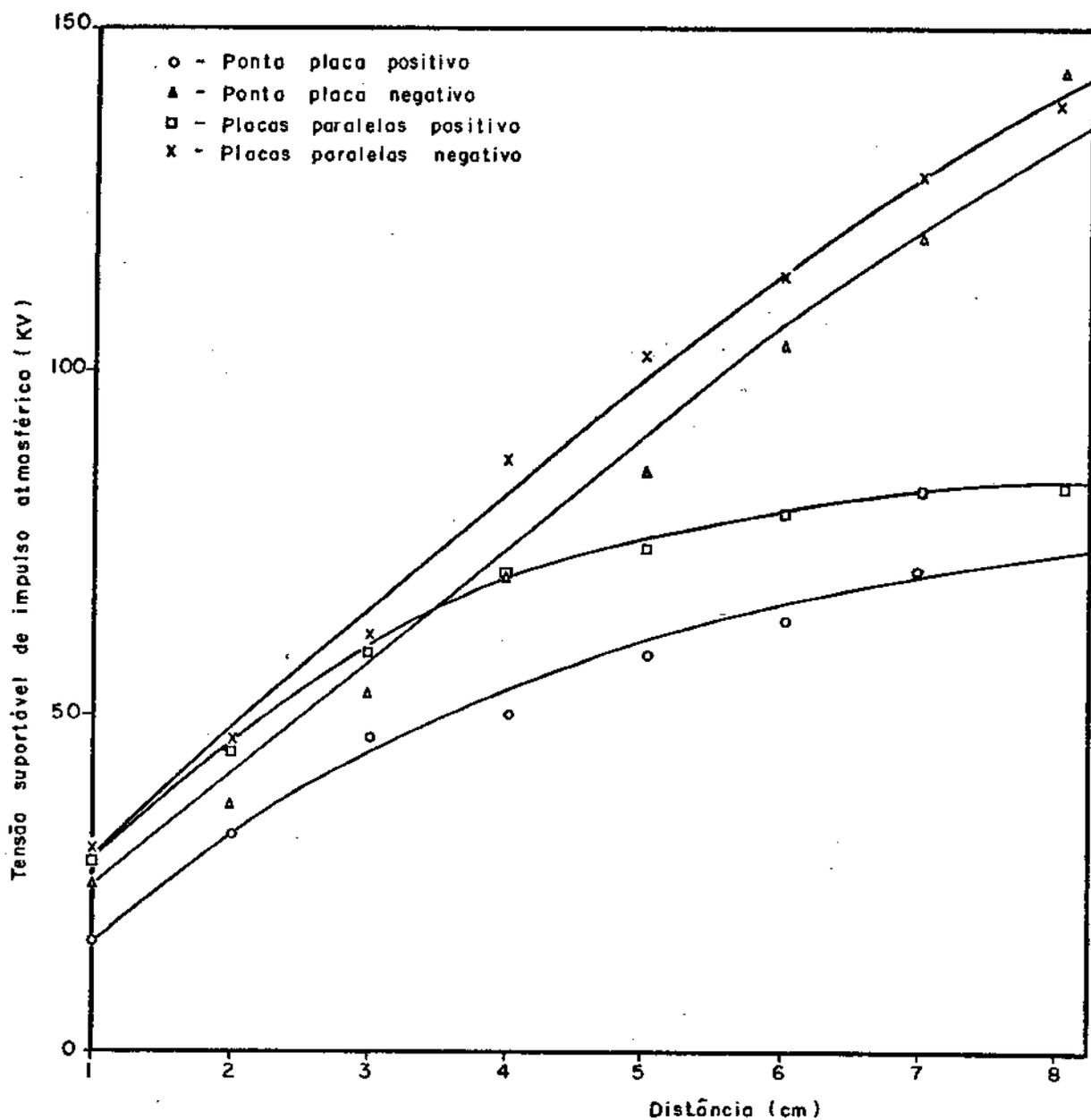


FIG. 3 - COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS CARACTERÍSTICAS OBTIDAS

4.2 - EFEITOS DO MEIO ISOLANTE NA TENSÃO DISRUPTIVA CRÍTICA

O ar é considerado um ótimo isolante quando é empregado como um único material de um sistema de isolamento. Entretanto, ao inserir outros meios, a sua tensão disruptiva crítica é alterada variando de acordo com a constante dielétrica do meio inserido. Assim, o estudo da influência da introdução de outros meios dielétricos em sistemas isolados a ar na tensão disruptiva crítica de impulso, também constitui um dos itens de primordial importância para conhecer o desempenho e os processos de deterioração desses materiais.

Para estes estudos foram utilizados os materiais: PEBD, PMMA e porcelana, cujos resultados encontram-se nas tabelas III a V e figuras 4 e 5.

Das figuras 4 e 5 observa-se que a introdução de um material sólido em um sistema isolado a ar, não altera o comportamento da curva característica obtida no item 4.1, apesar dos valores numéricos serem inferiores aos do ar no caso de polaridade positiva. Para as tensões negativas praticamente não foi observada nenhuma influência, coincidindo os pontos obtidos sobre a mesma curva do ar.

Desta forma, a partir dos resultados obtidos tem-se que dentre os materiais utilizados o material dielétrico que menos interfere no sistema isolado a ar é o PEBD ($\epsilon_r=2,25$) com tensões próximas dos valores do ar, e o que mais interfere é a porcelana elétrica ($\epsilon_r=5,9$).

TABELA III - Tensão disruptiva crítica e tensão suportável para o meio isolante composto de ar mais amostra de polietileno com 2,1mm de espessura em um sistema de eletrodos de placas paralelas .

a) polaridade positiva

d (cm)	V _{50% N} (KV)	V _{SN} (KV)
1	28,86	27,74
2	49,71	48,81
3	62,89	60,43
4	69,40	66,69
5	76,45	73,46
6	80,88	77,72
7	84,57	81,27
8	86,80	85,41

b) polaridade negativa

d (cm)	V _{50% N} (KV)	V _{SN} (KV)
1	30,36	29,18
2	46,44	44,63
3	61,97	59,55
4	87,77	84,35
5	106,89	102,73
6	117,15	112,58
7	133,58	128,37
8	145,03	136,37

TABELA IV - Tensão disruptiva crítica e tensão suportável para o meio isolante composto de ar mais amostra de PMMA com 2,1mm de espessura em um sistema de eletrodos de placas paralelas

a) polaridade positiva

d (cm)	V _{50% N} (KV)	V _{SN} (KV)
1	27,84	26,76
2	49,00	47,08
3	62,95	60,50
4	70,87	68,12
5	74,28	71,37
6	80,91	77,75
7	83,97	80,70
8	85,60	82,26

b) polaridade negativa

d (cm)	V _{50% N} (KV)	V _{SN} (KV)
1	30,33	29,14
2	46,90	45,07
3	62,36	59,92
4	56,51	83,42
5	106,33	102,19
6	117,53	112,96
7	182,65	127,47
8	142,97	137,40

TABELA V - Tensão disruptiva crítica e tensão suportável para o meio isolante composto de ar mais amostras de porcelana com 2,1mm de espessura em um sistema de eletrodos de placas paralelas

a) polaridade positiva

d (cm)	V _{50% N} (KV)	V _{SN} (KV)
1	24,75	23,78
2	44,50	42,77
3	54,56	52,43
4	71,71	68,98
5	77,15	74,14
6	52,57	79,64
7	90,03	86,52
8	89,23	85,75

b) polaridade negativa

d (cm)	V _{50% N} (KV)	V _{SN} (KV)
1	27,83	26,75
2	46,59	44,77
3	63,34	60,87
4	85,38	82,05
5	105,26	105,15
6	123,00	118,20
7	136,15	130,84
8	147,64	141,88

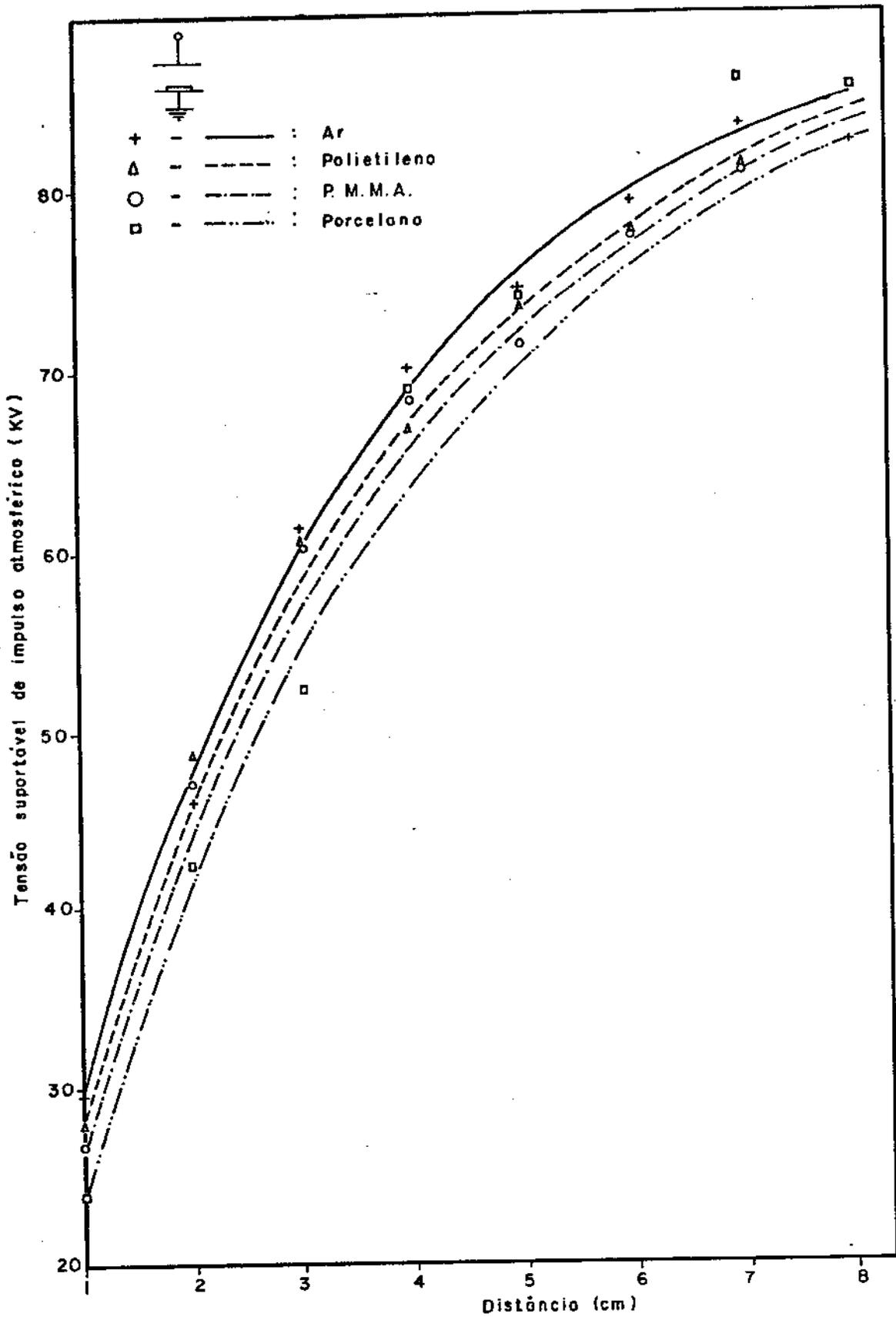


FIG. 4 - INFLUÊNCIA DO MEIO ISOLANTE NA TENSÃO DISRUPTIVA CRÍTICA (ELETRODO PLACAS PARALELAS - POLARIDADE POSITIVA).

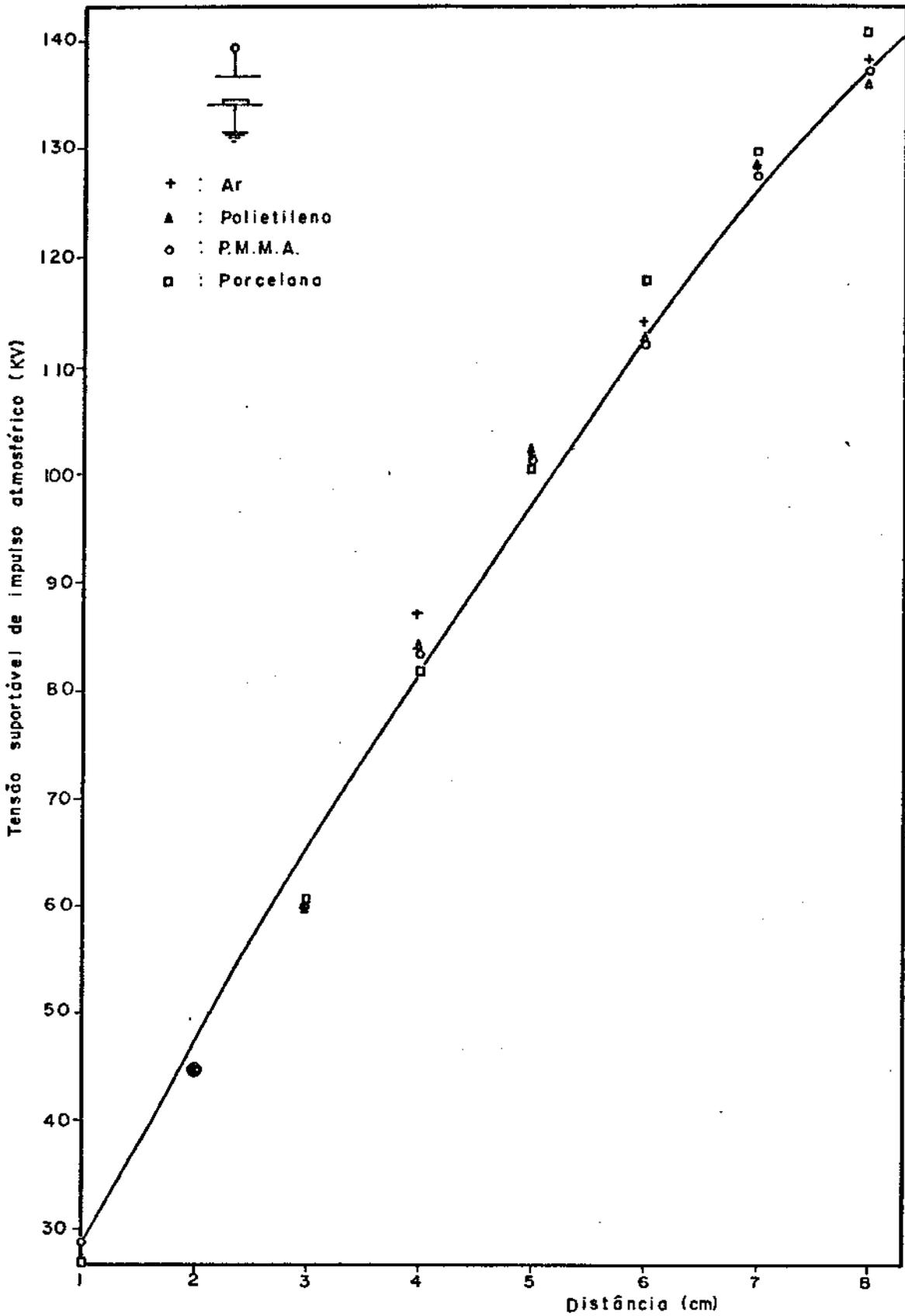


FIG. 5 - INFLUÊNCIA DO MEIO ISOLANTE NA TENSÃO DISRUPTIVA CRÍTICA.
(ELETRODO PLACAS PARALELAS - POLARIDADE NEGATIVA).

4.3 - INFLUÊNCIA DA DESCARGA ELÉTRICA EM MATERIAIS ISOLANTES SÓLIDOS

4.3.1 - Influência da descarga elétrica em polietileno de baixa densidade (PEBD)

Quando uma descarga atinge um material em sua superfície, ela desenvolve um percurso. O desenvolvimento deste percurso tem sido utilizado no estudo das propriedades dos diversos materiais isolantes quando submetidos ao esforço elétrico. Estas propriedades - tensão de início de descarga superficial, rigidez dielétrica, durabilidade e tolerância a descarga - são estudadas principalmente quando se deseja fazer um processo de revestimento nesses materiais.

Existem diversos métodos usados no estudo desse desenvolvimento, seja por meio de uma camada de pó fotossensível, seja através de uma câmara ou filme fotográfico.

O desenvolvimento deste percurso foi observado em nosso estudo em amostras de PEBD (com 2,1mm de espessura), recobertas com uma fina camada de enxofre em pó, pincelado sobre a superfície. A sequência de fotos dos quadros 33 e 34, mostra a evolução destes percursos. O método empregado, uma camada fina de enxofre em pó sobre a superfície do polietileno, pode não ser o mais indicado quando se deseja um estudo qualitativo sobre as propriedades. Entretanto, isto não ocorre neste caso, pois pretende-se estudar o comportamento do desenvolvimento em função do número de descargas.

A. Kawahima e colaboradores⁽⁴⁷⁾ estudaram o desenvolvimento das figuras de Lichtenberg (percurso de descarga) em vários tipos de materiais isolantes submetidos a tensões de impulso. Utilizaram para isto o método da câmera. Observaram que a evolução do processo é causada por fenômenos físicos e elétricos que dependem de fatores do próprio material: espessura, permissividade relativa, resistência superficial e outros fatores externos como polaridade, tensão aplicada, entre outros.

O nosso trabalho difere do estudo acima comentado, em relação ao método e tipos de materiais empregados e ao número de solicitações. Assim, observou-se que a evolução das ramificações em função do aumento do número de solicitações elétricas não teve um percurso predominante. As ramificações se espalharam radialmente por toda a superfície do polietileno. Como as condições do ensaio e da amostra (espessura, material, etc) foram mantidas constantes, tais amostras podem ser consideradas homogêneas, isto é, com resistência superficial constante; pois caso contrário, as ramificações da descarga escolheriam um caminho predominante.

O efeito que o número de descargas produz sobre a superfície do material pode ser notado visualmente nas amostras de polietileno. Para este estudo, fixou-se a espessura da amostra em 1,4mm e todas as observações foram realizadas no microscópio ótico.

Como pode ser notado no quadro 35, a superfície da amostra com 2.250 descargas (foto 1) apresentou pontos de carbonização, ao passo que a superfície da amostra exposta a 3.400 (foto 2) apresentou regiões inteiras carbonizadas. Esta observação se tornou mais intensa quando o material foi exposto a 5.600 descargas (foto 3). Pelo resultado obtido observou-se que com o aumento do número de solicitações, as amostras se apresentaram carbonizadas ou oxidadas, indicando aparentemente que houve degradação no polietileno.

Um estudo de espectroscopia de absorção ao infra-vermelho, que permite comparar qualitativamente a influência que a descarga elétrica produziu no polietileno, foi realizado nestas amostras com o intuito de se verificar se realmente houve degradação no material. Para realizar este estudo a amostra solicitada a 3.400 descargas foi reprocessada para uma espessura de 0,05mm e a solicitada a 5.600 para 0,15mm. Os resultados obtidos foram ilustrados nas figuras 6 e 7.

Uma comparação entre os espectros de uma amostra sem solicitação e outras amostras com 3.400 e 5.600 descargas, pode ser feita através da figura 8.

Y. Toriyama e colaboradores⁽²⁷⁾ estudaram a degradação do polietileno por descarga parcial em corrente alternada através desta análise de espectroscopia. Seus resultados verificaram que a variação das absorbâncias dos diversos radicais deste material é mais acentuada para o grupo carbonila (1.715cm^{-1}). Tal grupo caracteriza a degradação dos polímeros, conforme descrito anteriormente no item 3.6. O PEBD (segundo item 2.5.2) é composto de cadeias de carbono e hidrogênios. Quando uma descarga atinge o PEBD pode haver quebra dessas cadeias de carbono, criando radicais livres que podem reagir com o oxigênio do ar, produzindo grupos carbonilas ($\text{C}=\text{O}$), os quais indicarão a degradação do material.

Apesar de ter sido empregado um tipo diferente de tensão, os resultados obtidos com o PEBD foram semelhantes aos obtidos por esses pesquisadores. Assim, os espectros obtidos apresentaram variações nas bandas de absorção na região de 1.720cm^{-1} a 1.780cm^{-1} , referentes ao aumento da concentração de grupos carbonilas. Tal aumento foi caracterizado no espectro por picos mais agudos. Os espectros obtidos variaram de acordo com a intensidade da solicitação elétrica, sendo mais intensa para o caso de 5.600 descargas elétricas.

Uma medida da quantidade de grupos carbonilas presentes na amostra formados durante a degradação foi realizada através da comparação das áreas formadas pelos espectros das bandas de absorção do grupo carbonílico com outro radical que não sofre alteração.

O quadro 36 ilustra este estudo de comparação de áreas, conforme procedimento descrito no item 3.6, para as amostras solicitadas a 3.400 e 5.600 descargas. Observa-se que a relação dois (R_2) é maior que a relação um (R_1), aproximadamente 60%, indicando, portanto, que a amostra solicitada a 5.600 descargas se degradou 60% a mais que a solicitada a 3.400 descargas.

Deste modo, a observação nas variações dos espectros na região de 1720cm^{-1} e o estudo de comparação das áreas formadas pelas regiões do espectro, as quais contêm os picos dos

radicais que se pretende analisar, podem ser consideradas como bons indicadores para o acompanhamento da degradação do material.

Na tentativa de melhor ilustrar a influência da descarga elétrica no material, realizaram-se os experimentos em amostras com espessuras que variaram de 0,15 a 0,2mm que foram solicitadas a 100 aplicações de descarga. Os resultados obtidos foram apresentados no quadro 37 e 38.

A foto 1 do quadro 37 registra uma amostra que não sofreu solicitação elétrica. Nota-se que o material ao ser processado, reproduziu as imperfeições do molde (riscos).

A descarga elétrica, ao atingir a superfície do material, provocou uma fusão superficial, evidenciada na foto 2 e 3 pela eliminação desses riscos ou imperfeições. Observa-se através destas fotos que com o aumento do número de descargas, houve a formação de aglomerados de material, indicando que provavelmente ocorreu uma recristalização.

Este processo de recristalização depende principalmente da regularidade da estrutura do polímero. No polietileno, isto ocorre porque este é formado de unidades idênticas que se repetem. Uma característica morfológica geral em polímeros que se cristalizam a partir do estado fundido é a formação de esferolitos (apêndice 1). Segundo os resultados obtidos, houve formação destes esferolitos, inclusive o surgimento de outro plano de cristalização, evidenciado pela "desfocalização" da foto 3 do quadro 37. No entanto sem um estudo mais detalhado, realizado através de análises em microscópio de luz polarizada e microscópio eletrônico com amostras mais finas (filmes), nada disso pode ser afirmado categoricamente. Inclusive deve ser estudada também a região perfurada da amostra apresentada nas fotos do quadro 39. Tais fotos sugerem que os esferolitos se apresentam deformados ou mesmo danificados.



FOTO 1
SEM SOLICITAÇÃO



FOTO 2
UMA DESCARGA

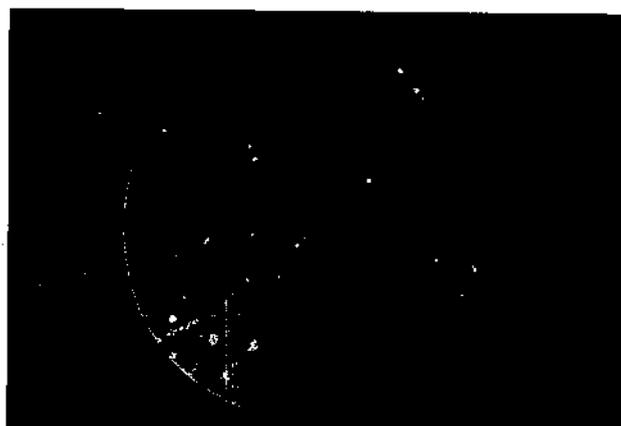


FOTO 3
DUAS DESCARGAS

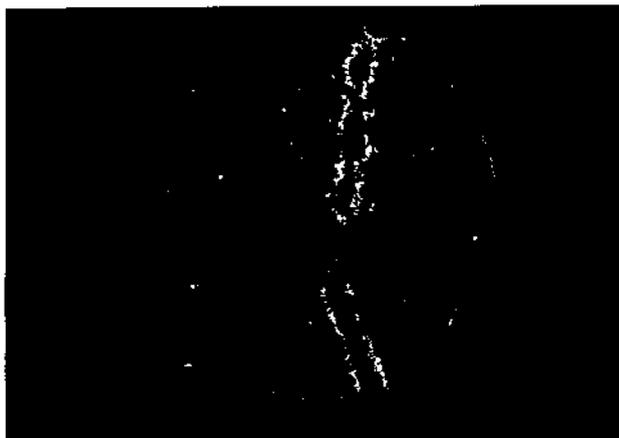


FOTO 1
TRÊS DESCARGAS

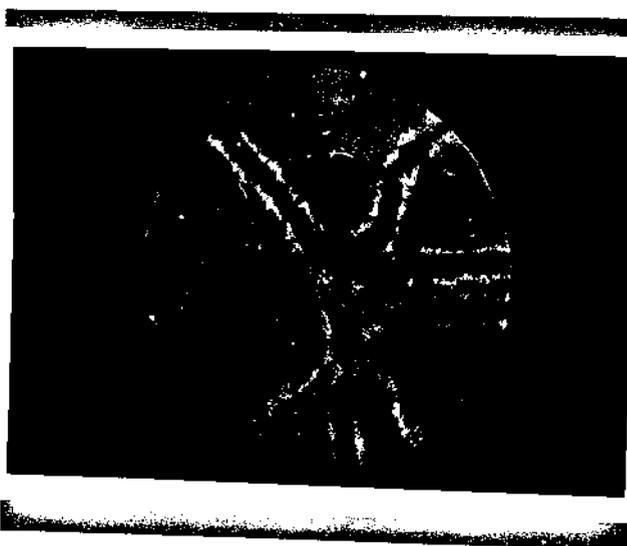


FOTO 2
DEZ DESCARGAS



FOTO 3
VINTE DESCARGAS

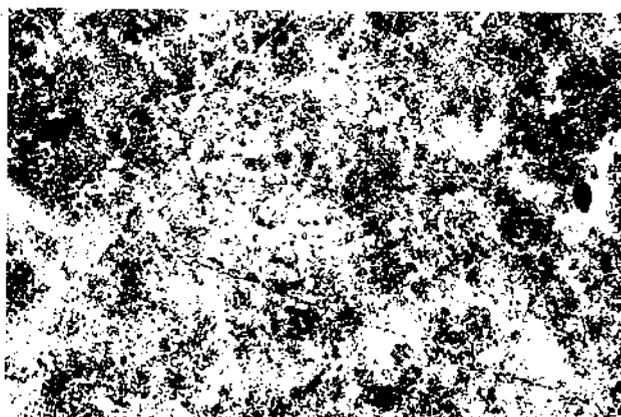


FOTO 1
2 250 DESCARGAS

FOTO 2
3 400 DESCARGAS

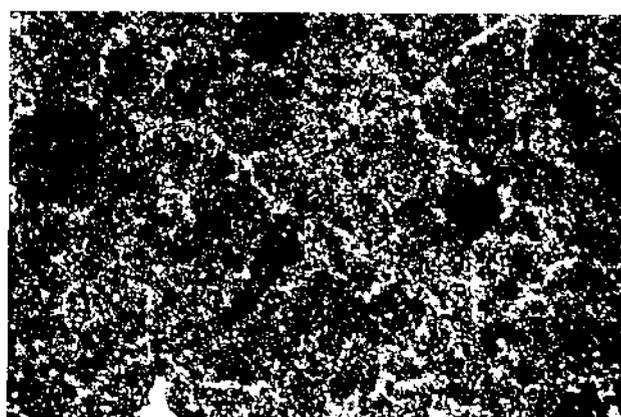


FOTO 3
5 600 DESCARGAS

QUADRO 35 - EFEITO QUE O NÚMERO DE DESCARGAS PROVOCA NA SUPERFÍCIE DE P.E.B.D. (AUMENTO 100 X)

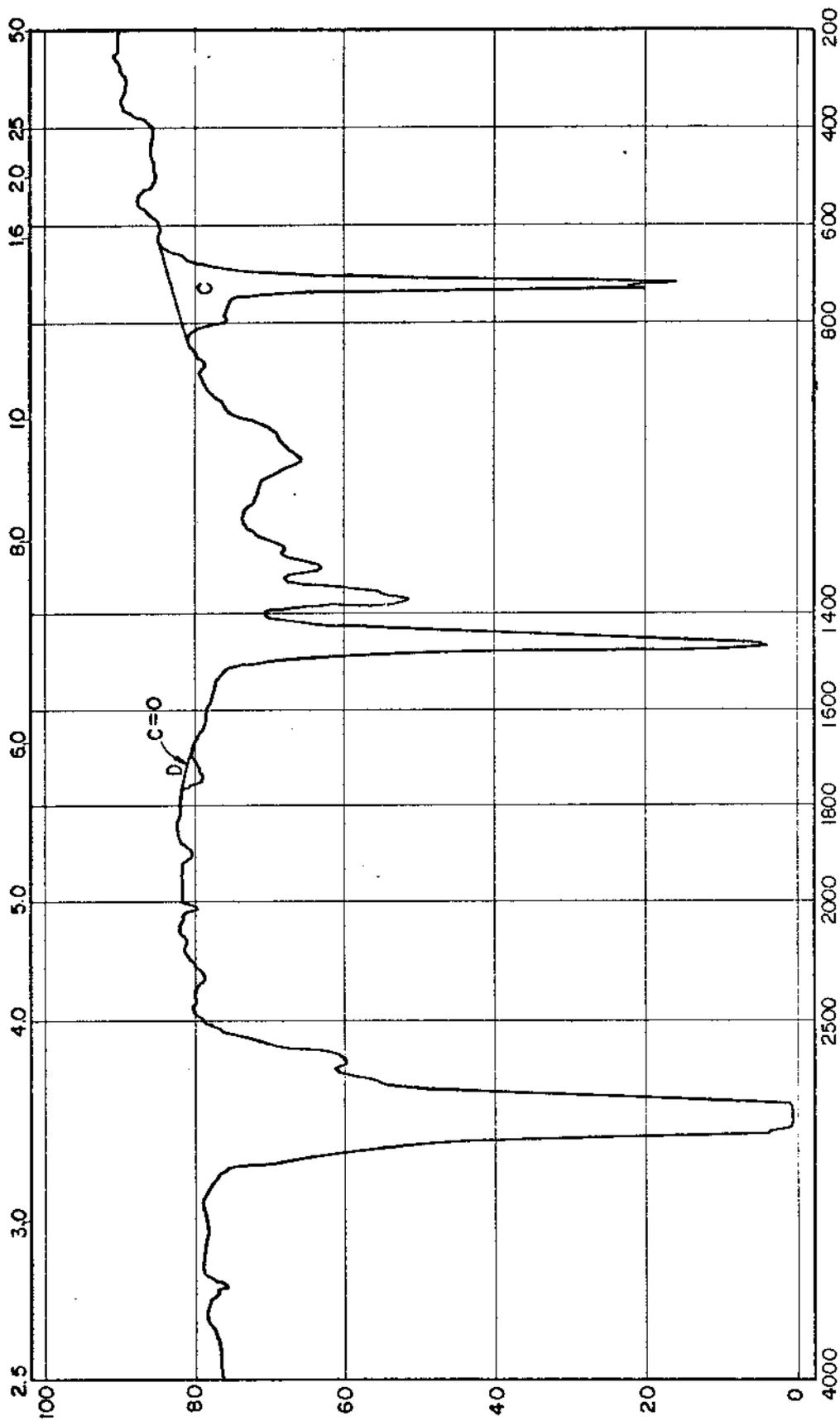


FIG. 6 - ESPECTRO DE ABSORÇÃO DE INFRA-VERMELHO DO P. E. B. D. SUBMETIDO A 3400 DESCARGAS.

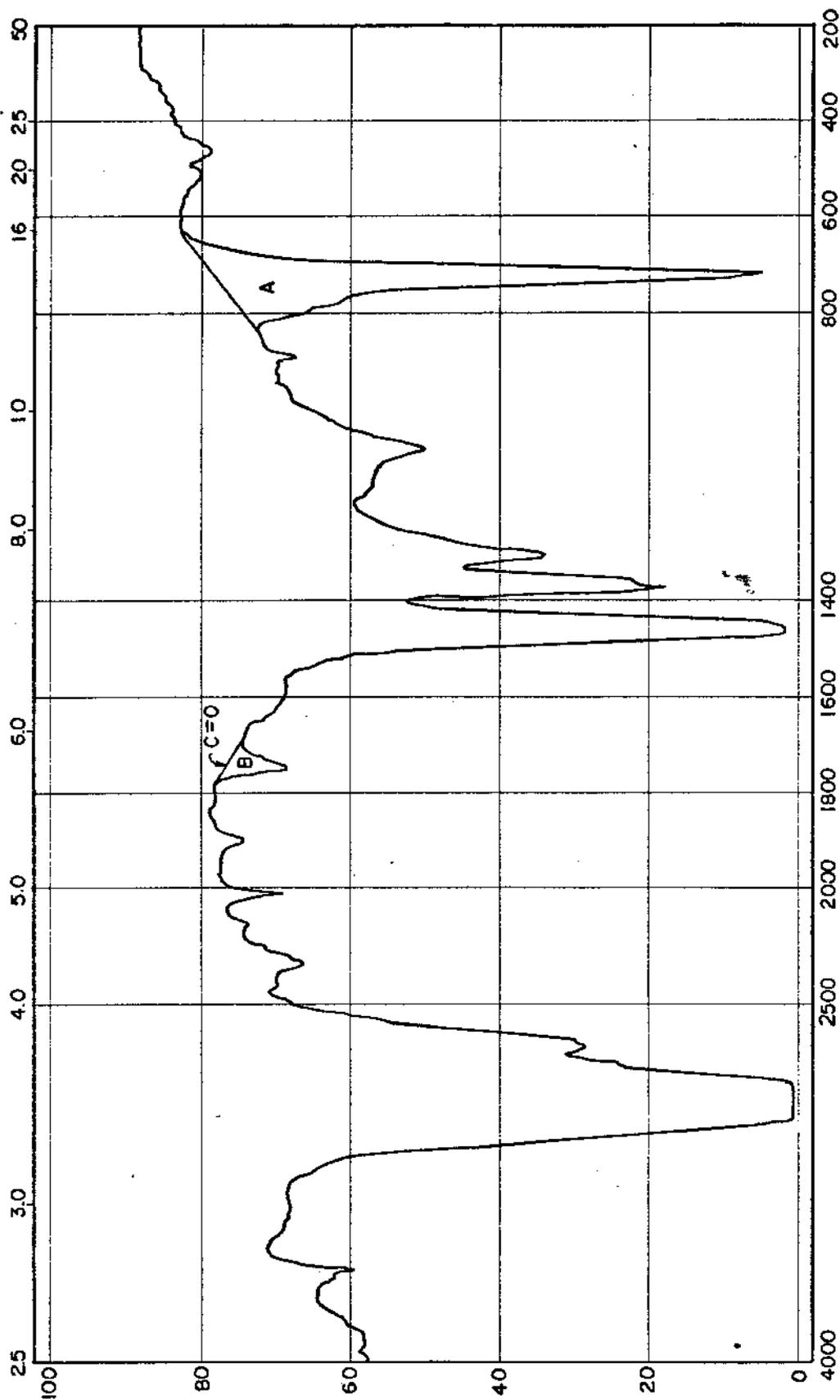


FIG. 7 - ESPECTRO DE ABSORÇÃO DE INFRA-VERMELHO DO P. E. B. D. SUBMETIDO A 5600 DESCARGAS.

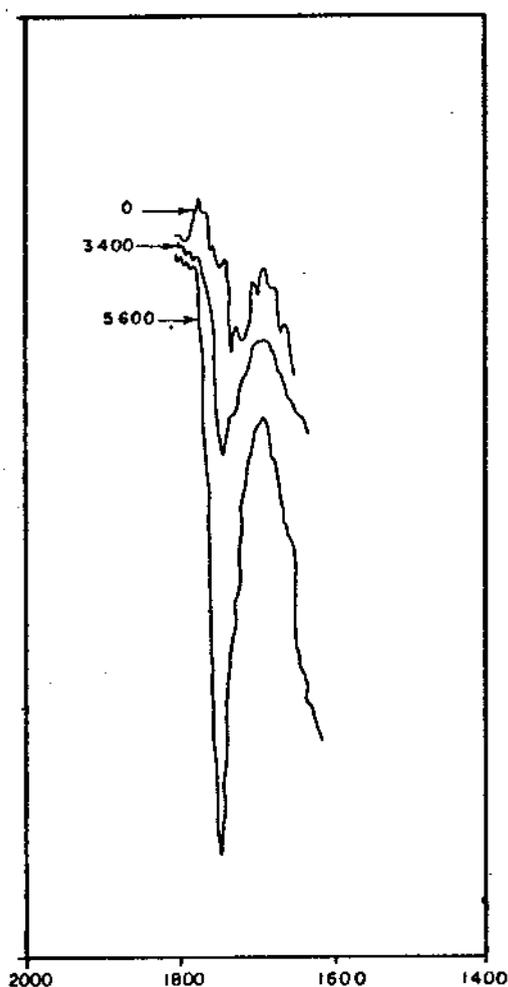


FIG. 8 - TRANSMITÂNCIA DE FILMES DE P.E.B.D., NA FAIXA DE INFRA-VERMELHO, NA BANDA DE ABSORÇÃO DE GRUPOS CARBONÍLICOS (1715 cm). OS NUMEROS INDICAM O NUMERO DE DESCARGAS APLICADAS.

- . C - área da região não afetada (630 a 830cm⁻¹)-amos-
tra com 3.400 descargas = 57μ.a.
- . A - área da região não afetada (630 a 830cm⁻¹)-amos-
tra com 5.600 descargas = 124,7μ.a.
- . D - área da região afetada (1700 a 1780cm⁻¹) - amostr
tra com 3.400 descargas = 3μ.a.
- . B - área da região afetada (1700 a 1780cm⁻¹) - amostr
tra com 5.600 descargas = 11μ.a.

. Comparação:

$$R_1 = \frac{A}{C} = 2,18$$

$$\frac{R_1}{R_2} = 0,6$$

$$R_2 = \frac{B}{C} = 3,66$$

$$R_2 > R_1 \rightarrow \text{degradação}$$

QUADRO 36 - RELAÇÃO DAS ÁREAS DOS ESPÉCTROS DE ABSORÇÃO
DE INFRA-VERMELHO PARA AS AMOSTRAS SUBMETIDAS
A 3400 E 5600 DESCARGAS.

FOTO 1



FOTO 2

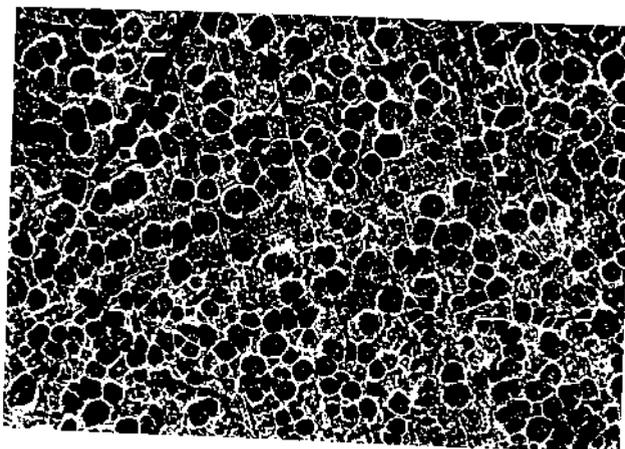
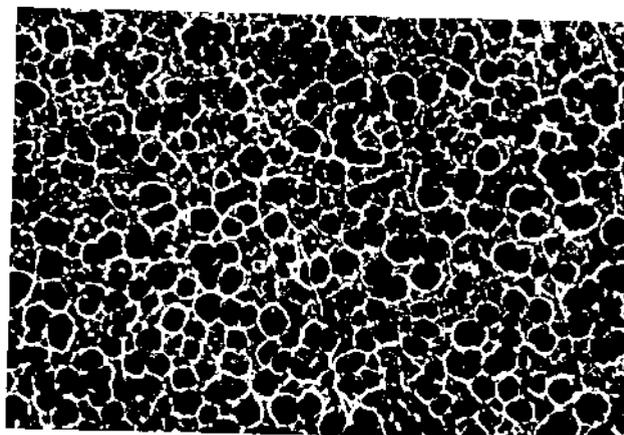


FOTO 3



QUADRO 37 - INFLUÊNCIA DA DESCARGA ELÉTRICA EM AMOSTRAS DE R.E.B.D. (FOTO 1) AMOSTRA NÃO ATACADA, (FOTO 2 E 3) AMOSTRAS ATACADAS. (AUMENTO 100X).

FOTO 1

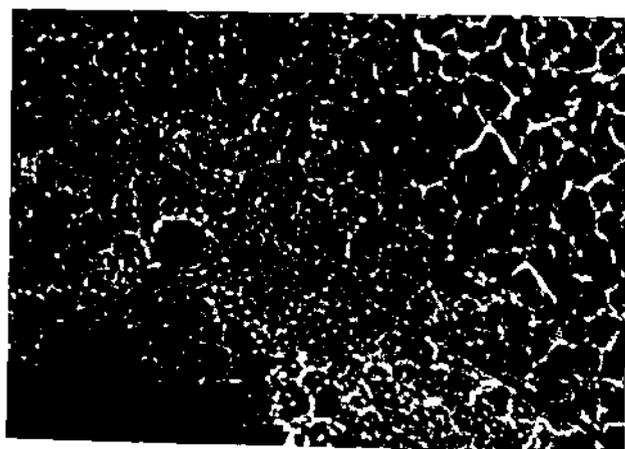
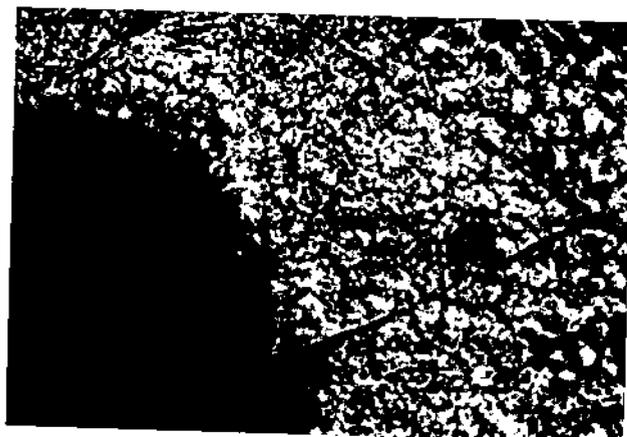


FOTO 2



QUADRO 38 - ASPECTO DA REGIÃO ONDE A AMOSTRA DE P.E.B.D. PERFUROU DEVIDO ÀS DESCARGAS ELÉTRICAS. (AUMENTO 100 X).

4.3.2 - A influência da descarga elétrica em porcelana

A influência que a descarga de impulso atmosférico provocou na porcelana apresentou um comportamento diferente do polietileno, como pode ser observado através do quadro 39. Tal influência, observada a olho nũ, variou desde nenhuma influência aparente até a ruptura do material, passando por um escurecimento da região central da amostra.

O desenvolvimento de trincas foi observado a olho nũ em algumas amostras e os resultados obtidos foram esquematizados nos quadros 40 e 41. Observa-se que o surgimento da trinca ocorreu a partir da terceira descarga e que os pontos de perfuração se desenvolveram nas regiões escurecidas.

Um estudo microscópico do estado que a amostra 1 de porcelana apresentou após o desenvolvimento de trinca foi ilustrado nas sequências das fotos do quadro 42. A foto 1 mostra a trinca pela face onde foi efetuada a descarga. Observa-se nesta foto a região onde a amostra escureceu e se abriu, caracterizando uma primeira perfuração. A foto 2 apresenta a outra face da amostra na região da primeira perfuração. Observa-se que ao longo da trinca, tanto em uma face quanto noutra, há surgimento de traços embranquecidos e brilhantes. A foto 3 apresenta a região do final da trinca na de descarga e a foto 4, a região do final da trinca nas bordas da amostra.

Com o intuito de acompanhar o desenvolvimento de trincas a partir de um defeito provocado, duas amostras de porcelana (uma com 1,3mm de espessura e outra com 2,6mm) foram elaboradas. O defeito provocado por intermédio de uma lâmina comum apresentou com formato de fenda, a qual foi localizada na borda de cada amostra, antes do processo de queima. Expondo estas amostras a solicitação de descarga, observou-se que a fenda não se desenvolveu. A amostra mais fina foi solicitada a 1.400 descargas e aparentemente se apresentou toda escura, principalmente na região central e em volta de toda a sua borda (quadro 43). Observado ao microscópio óptico, notou-se o surgimento de superfícies embranquecidas e brilhantes ao longo de toda a face exposta à descarga elétrica (quadro 44).

As amostras que aparentemente se escureceram na região central devido a solicitação à descarga elétrica, quando

analisadas no microscópio óptico, apresentaram superfícies embranquecidas e brilhantes ao longo de toda a região escura (foto 1 do quadro 45).

As amostras que não sofreram nenhuma influência aparente no seu aspecto superficial, quando analisadas microscopicamente, apresentaram pontos escuros e embranquecidos (foto 2 do quadro 45) ou ainda um aumento dos pontos embranquecidos (foto 3 deste quadro).

De um modo geral, não se pode afirmar que as espessuras das amostras influenciaram no efeito que a descarga de impulso provocaram na porcelana. No entanto, as amostras mais finas (com 1,3mm de espessura) foram as que mais sofreram mudanças no seu aspecto, com surgimento de trincas e pontos de ruptura. Provavelmente isto foi devido a grande dificuldade em processar amostras com espessuras muito finas, o que implica no surgimento de defeitos de fabricação.

Ao que parece, o processo de fabricação dessas amostras de porcelana apresentou dois fatores que interferiram no seu desempenho:

- a) o molde utilizado: este molde apresentou dois orifícios de escoamento de material excedente que provocaram, depois do processo de queima, o surgimento de duas marcas na superfície da amostra em contacto com os orifícios. Estas marcas foram produzidas devido a diferença de empacotamento que existiu entre a superfície que permaneceu em contacto com o gesso e aquela do orifício. O gesso determina a orientação das partículas através de secagem lenta e constante. Com o ressecamento, o material excedente aderiu na região dos orifícios, de modo que no momento da retirada da amostra, esta teve que ser também forçada por meio destes orifícios para se desprender. Dessa maneira, esta região da marca provavelmente é uma região propagadora de defeitos, pois além de possuir um empacotamento diferente, recebeu esforço no momento da retirada da amostra. Como a descarga foi aplicada do outro lado que não apresentava as marcas do orifício, as amostras mais grossas não sofreram grande influência destes defeitos, pois estes, devido a espessura, não atingiram o outro lado.

b) temperatura de queima: a temperatura de queima utilizada (1250°C) provavelmente foi muito elevada para este tipo de massa, pois as amostras mais finas apresentaram sua superfície retorcida.

A presença destes defeitos produzidos durante o processamento provocou o aceleramento do defeito de descarga, de tal modo que o desenvolvimento de trincas nas amostras de 1,3mm de espessura provavelmente surgiu a partir da primeira descarga. No entanto, como todas as observações foram realizadas a olho nũ, não foi possível registrar a evolução das trincas desde o início.

Assim, a amostra que propositadamente recebeu uma fenda lateral com o objetivo de acompanhar o desenvolvimento de trinca não sofreu interferência dos defeitos de fabricação, pois com o aumento do número de descargas (atê 1.400 aplicações) essa fenda não evoluiu, mas a descarga danificou completamente a superfície, tornando-a escura e, observada ao microscópio, apresentou regiões completamente carbonizadas, embranquecidas e brilhantes. Isto mostra que esta fenda não pode ser interpretada como defeito, pois provavelmente não interferiu na distribuição interna de forças da amostra.

Da mesma forma, as amostras mais espessas tiveram também o seu aspecto superficial alterado após serem submetidas as descargas de impulso.

Essas mudanças foram caracterizadas pelo surgimento de pontos e regiões embranquecidas e brilhantes ao longo da superfície atingida pelas descargas. Provavelmente estas se originaram pela fusão do material cerâmico e consequente formação de fase vítrea, constatada em todas as amostras, mesmo naquelas que aparentemente não apresentaram nenhuma influência. Isso torna-se mais evidente nas amostras que durante o ensaio sofreram ruptura, onde a presença de vidro pode ser constatada a olho nũ.

A formação dessa nova fase foi provocada pela ocorrência de altas temperaturas (desde alguns milhares de graus centígrados até algumas dezenas de milhares de graus), mesmo que instantaneamente, durante a descarga de impulso.

Desse modo, a fusão que provavelmente ocorreu na porcelana originou outra fase cerâmica com característica diferente do restante do material e que pode interferir em suas propriedades de isolação como um todo.

Dessa maneira, com o aumento do número de descargas, constatou-se um aumento gradativo da presença de fase vítrea nas amostras de porcelana. Com isso, é de se esperar que as propriedades elétricas, mecânicas e térmicas do material vão se modificar, de modo que seria importante estudar a variação destas propriedades com o aumento do número de descargas. Sobretudo em relação às propriedades elétricas e especificamente no tocante à resistividade superficial, tal estudo poderia determinar em que grau as alterações sofridas pelo material se restringiram a sua superfície.

nº de amostras	ESPESSURAS					OBSERVAÇÕES
	1,3	1,9	2,1	2,6	3,1	
2	X					trinca e furo
3	X					trinca e quebra em 2 partes
1	X					furo
1		X				escurecimento da região central
1			X			escurecimento da região central
1				X		escurecimento da região central
2					X	escurecimento da região central
1	X					nenhuma influência aparente
1		X				nenhuma influência aparente
4			X			nenhuma influência aparente
3				X		nenhuma influência aparente
5					X	nenhuma influência aparente

QUADRO 39 - EFEITO DA DESCARGA ELÉTRICA EM PORCELANA ELÉTRICA.

nº de descarga	Descrição da observação
1-2	nada apresentou
3	surgimento de trinca de 18mm de comprimento
4	aparentemente não desenvolveu a trinca
5	a trinca se desenvolveu para 24mm de comp.
7	a trinca se desenvolveu para 30mm de comp.
8-15	a trinca aparentemente se estacionou e surgiram dois pontos de perfuração em cima da trinca, caracterizados por regiões escurecidas

QUADRO 40 - DESCRIÇÃO DAS OBSERVAÇÕES EFETUADAS NA AMOSTRA 1 DE PORCELANA EXPOSTA A DESCARGAS.

nº de descarga	Descrição da observação
1-2	nada apresentou
3	surgimento de trinca de 6,8mm a partir da região central para a borda
4-8	face oposta a descarga surgiram pontos escurecidos ao longo da trinca
9	a trinca se desenvolveu para 11,9mm de comprimento atingindo a borda
10	os pontos escurecidos aumentaram de tamanho dando idéia de uma mancha onde a amostra perfurou

QUADRO 41 - DESCRIÇÃO DAS OBSERVAÇÕES EFETUADAS NA AMOSTRA 2 DE PORCELANA EXPOSTA A DESCARGAS.



FOTO 1

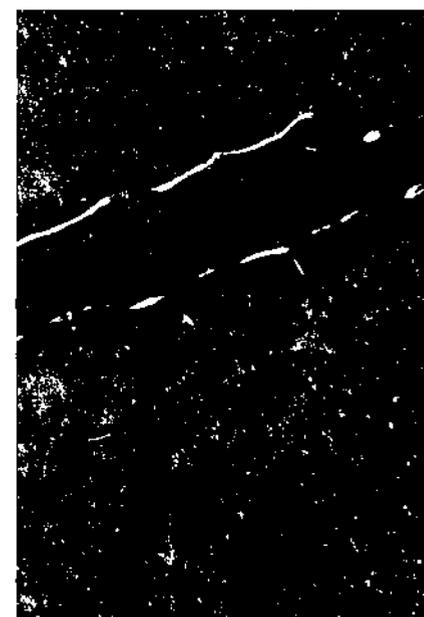


FOTO 2



FOTO 3

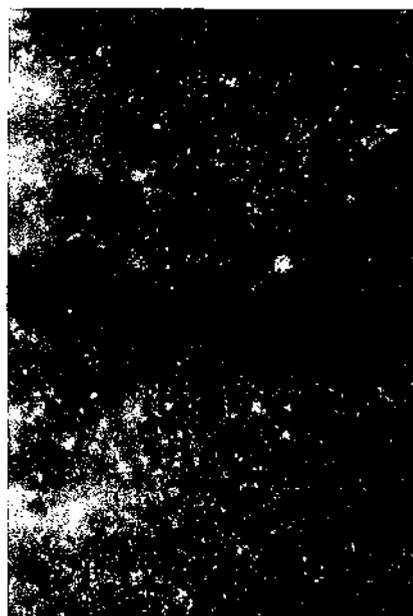


FOTO 4

QUADRO 42 - ESTADO DA AMOSTRA 1 DE PORCELANA APÓS O DESENVOLVIMENTO DA TRINCA E PERFURAÇÃO . (AUMENTO 100 X)

FOTO 1

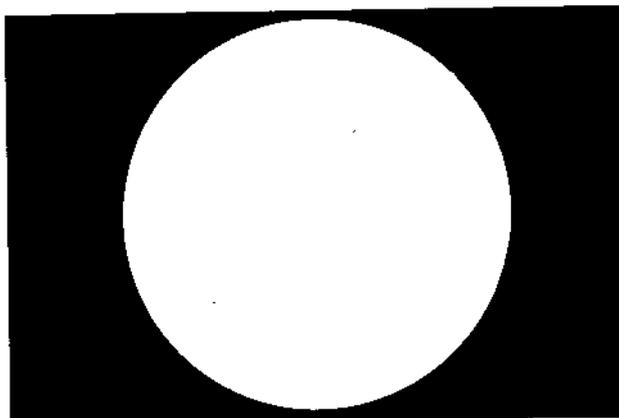
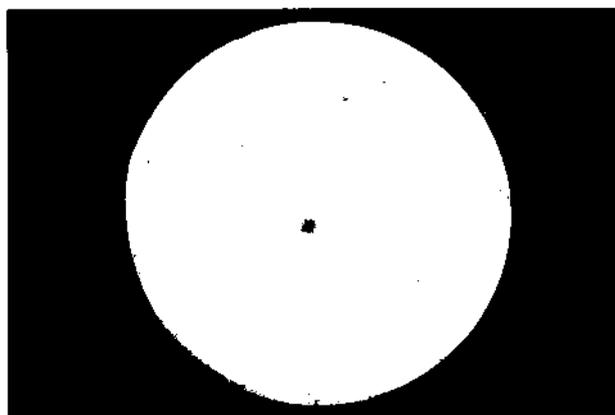


FOTO 2



QUADRO 43 - ESTADO APARENTE DA AMOSTRA DE PORCELANA ANTES DE SER SOLICITADA (FOTO 1), E APÓS 1400 DESCARGAS (FOTO 2)

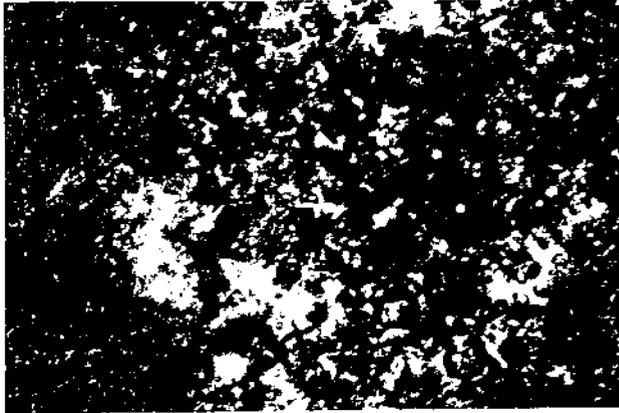


FOTO 1

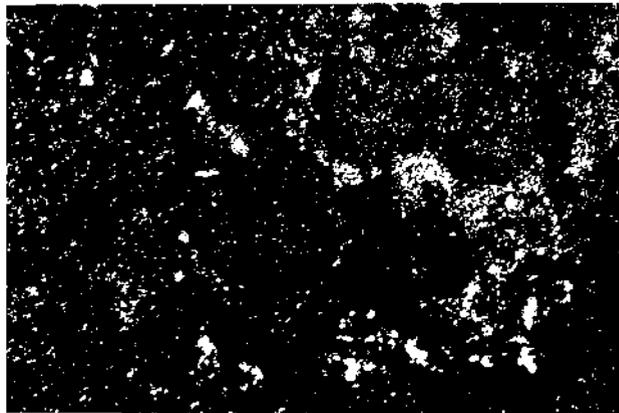


FOTO 2

QUADRO 44 - ESTADO DA AMOSTRA DE PORCELANA DE 1,3 mm DE ESPESSURA APÓS 1400 DESCARGAS. (AUMENTO 150 X).

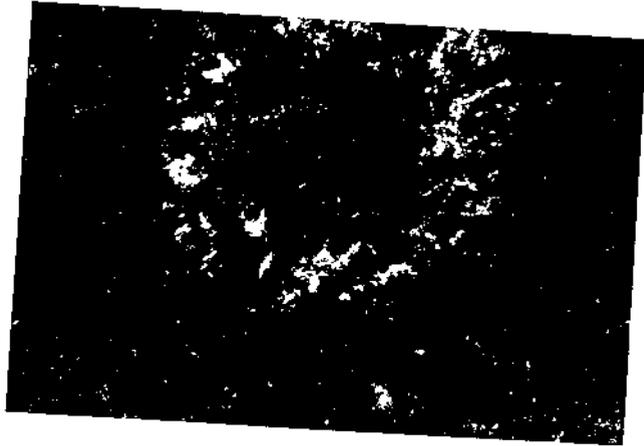


FOTO 1

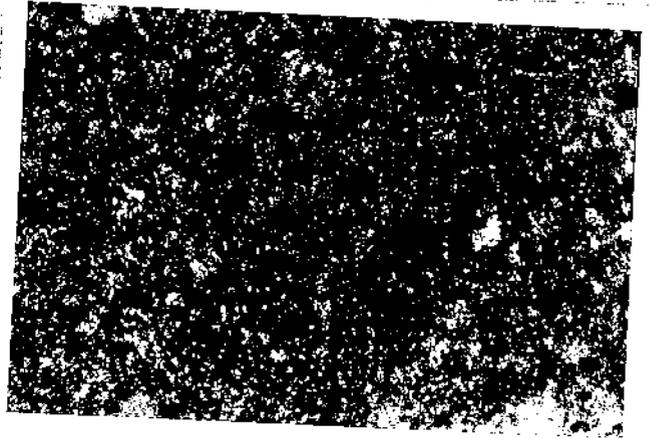


FOTO 2

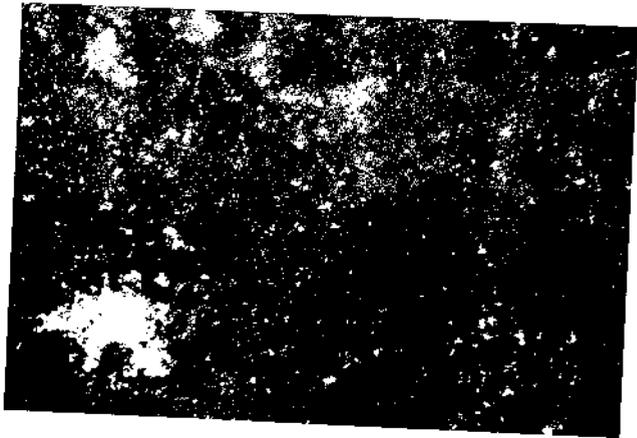


FOTO 3

QUADRO 45 - ESTADO DA SUPERFÍCIE DAS AMOSTRAS DE PORCELANA APÓS SEREM SOLICITADAS A 30 DESCARGAS ELÉTRICAS.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Bc/5390

A partir dos resultados apresentados e discutidos no capítulo 4, pode-se obter as seguintes conclusões:

- Quanto maior a permissividade relativa do material sólido inserido em sistemas de isolamento, que também contém ar, menor é a tensão disruptiva crítica, desta maneira, os materiais sólidos utilizados nestes sistemas devem ser convenientemente escolhidos, de modo a não causar muita interferência na tensão disruptiva do ar, que é a mais alta quando o meio isolante é constituído somente por êle. Para tanto estes materiais devem possuir permissividade relativa mais próxima da permissividade do ar ($\epsilon_r=1$).

- O polietileno (PEBD) quando submetido à ação das descargas elétricas sofre um processo de degradação, que foi constatado pelo aumento do número de grupos carbonílicos, detectados pelo espéctro de absorção de infra-vermelho. Esta degradação atingiu índices da ordem de 60% nos estudos realizados. Um estudo mais preciso sobre a formação de radicais livres poderia ser feito através de espectroscopia de "electron spin resonance".

- O polietileno (PEBD) possui normalmente um grau de cristalinidade que varia entre 45 e 50%. Pelos resultados obtidos observou-se que houve uma alteração desta cristalinidade, cuja variação não se pode afirmar se aumentou ou reduziu, pois para isto, seria necessário medir quantitativamente este índice (através de difração de raio X), antes e após a solicitação elétrica. Para futuras pesquisas seria interessante considerar também o estudo da variação da cristalinidade deste polímero sobre a influência das descargas elétricas.

- A presença de defeitos nas amostras de porcelana provocou um aceleração do efeito da descarga. Tais defeitos podem ser minimizados, através da mudança de localização do orifício de escoamento de material do molde. Este devia ser feito em uma região do molde que atingisse a lateral da amostra ao invés da superfície, como foi realizado. Uma outra forma para se eliminar estes defeitos seria a de utilizar um outro método de conformação, por exemplo prensagem ou extrusão. Além dessa mudança, seria necessário também estudar qual temperatura é a mais indicada para queimar este tipo de massa quando utilizada em peças com espessuras finas.

- A porcelana quando submetida à ação das descargas elétricas apresentou a formação de uma nova fase. Com o aumento do número de descargas a presença desta fase vítrea teve um aumento gradativo. Tal efeito pode interferir em todas as propriedades do material, desta maneira, seria de fundamental importância um estudo da influência deste efeito nas propriedades do material, em específico nas suas propriedades de isolamento, em função do aumento do número de descarga aplicado.

Devido aos diversos fatores que interferem no fenômeno das descargas elétricas, o desenvolvimento de pesquisas nesta área necessita ser discutido sob o ponto de vista dos fenômenos físicos e químicos que ocorrem e da sua interferência nas aplicações de engenharia. Desta maneira esses estudos não podem ser examinados por um único campo científico, necessitando assim a cooperação de diversos profissionais; químicos, físicos e engenheiros eletricitistas.

APÊNDICE 1

ESFEROLITOS

Atualmente, existe muitas discordâncias sobre a morfologia dos esferolitos em alguns polímeros. É de consenso que a sua formação é uma característica morfológica geral em polímeros que se cristalizam a partir do estado fundido. Segundo T. Alfrey⁽⁴⁸⁾, quando a cristalização é nucleada em um polímero fundido super-resfriado, uma região esférica, crescendo continuamente e contendo material cristalino, invade o material amorfo que a envolve. A orientação do cristalito, dentro do esferolito, é na direção radial.

Existem diversas formas para definir a constituição do esferolito. Uma primeira definição é que um esferolito é um aglomerado policristalino, constituído por milhares de cristalitos únicos, interligados e dispersos em material amorfo.

Uma alternativa a essa definição é a que considera o esferolito como um cristal único alterado, resultante da divisão ou ramificação repetida de um cristalito durante o crescimento. A figura 9 ilustra uma fotografia feita em microscópio de luz polarizada de esferolitos desenvolvidos em polietileno.

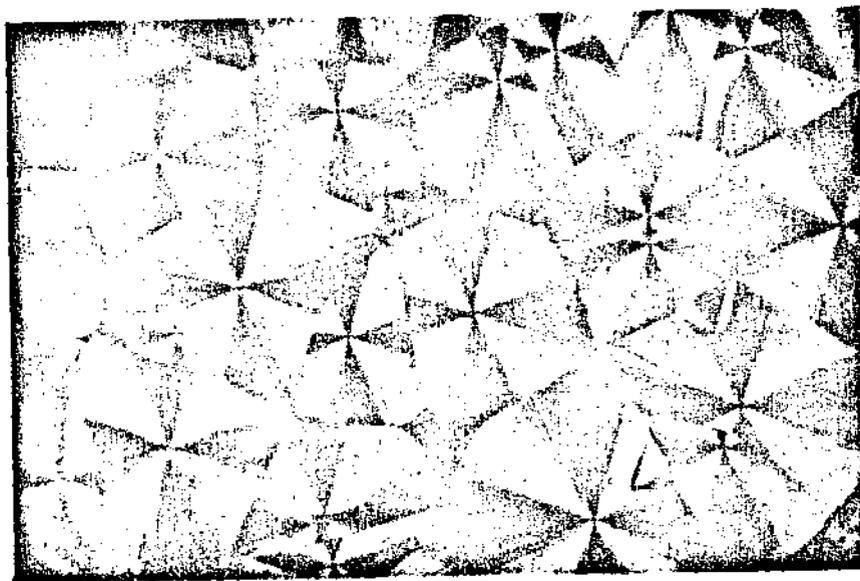


FIG. 9 - ESFEROLITOS EM POLIETILENO SOB LUZ POLARIZADA
(Segundo ref. 55 pg. 11)

Segundo T. Alfrey⁽⁴⁸⁾ se um esferolito for considerado como um cristal único, devemos reconhecer que êle é um cristal altamente desordenado, com um número tão grande de imperfeições, que a orientação dos eixos cristalográficos não é mantida paralela aquela do cristalito-gêrmen nucleante. Por outro lado, se preferirmos considerar um esferolito como um aglomerado de cristalitos únicos pequenos, devemos reconhecer que êle é um aglomerado altamente ordenado, havendo elevado grau de correlação local entre a orientação de um cristalito e os seus vizinhos próximos, dentro do esferolito.

Ainda sobre a origem e desenvolvimento dos esferolitos, é possível encontrar na literatura especializada no tema diversos trabalhos a respeito (vide referências 49 e 50).

APÉNDICE 2

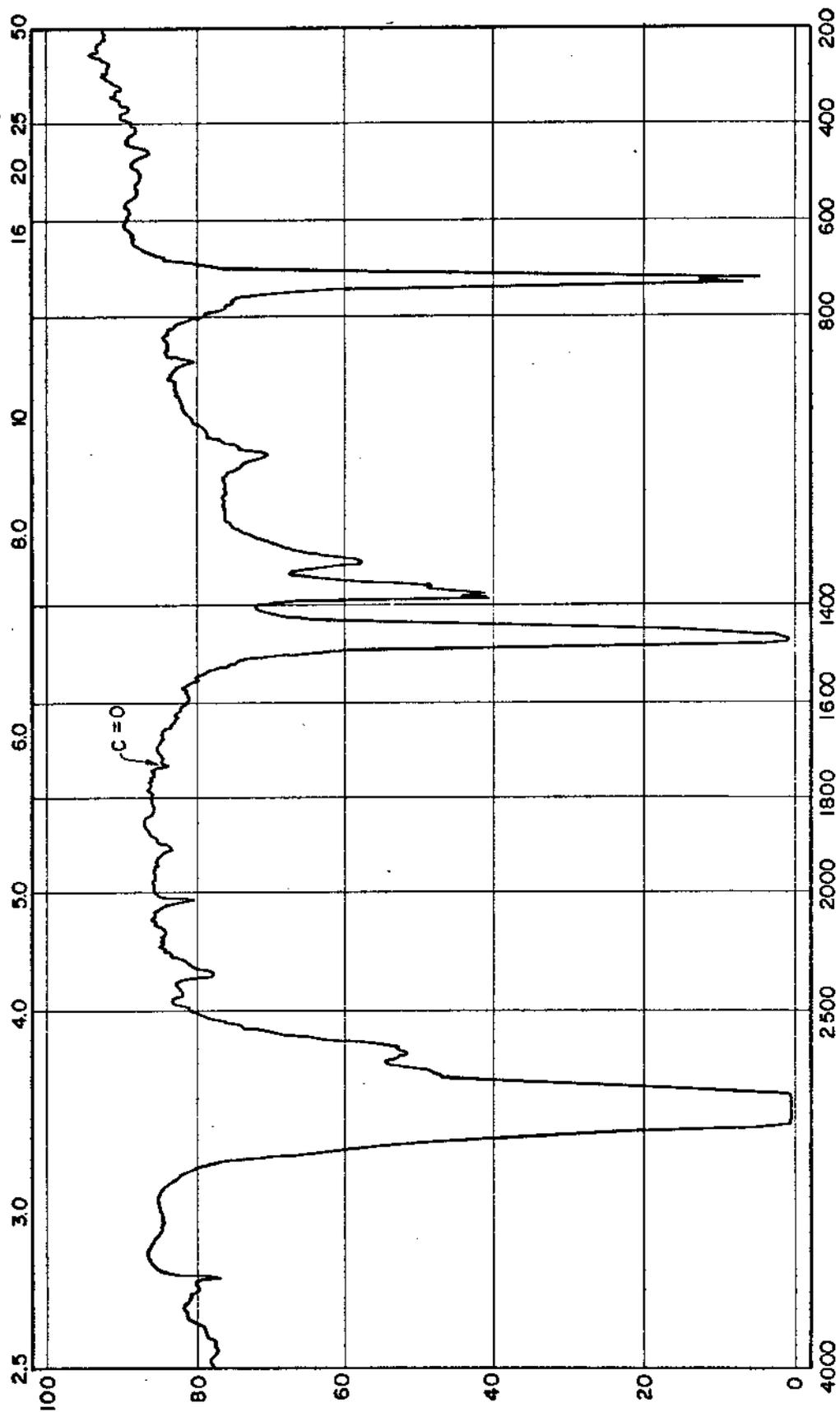


FIG. 10 - ESPECTRO DE ABSORÇÃO DE INFRA-VERMELHO DO P.E.B.D. SEM SOLICITAÇÃO ELÉTRICA.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) VÁZQUEZ, J.R. - *Materiales eletrotécnicos*. 1 ed. Barcelona, Ediciones CEAC, 1977. p. 81-142.
- (2) REZENDE, E.M. - *Materiais usados em eletrotécnica*. 1 ed. Rio de Janeiro, Livraria Interciência, 1977. p.31-46.
- (3) SENNER, A. - *Princípios de eletrotécnica*. 10 ed. Barcelona, Editorial Reverté S.A., 1978. p. 373-419.
- (4) HIPPEL, A.R. von - *Dielectric materials and applications*. Cambridge, The M.I.T. Press, 1974.
- (5) BOGORODITSKI, N.P. - *Materiales eletrotécnicos*. 6 ed. URSS, Editorial Mir Moscú, 1979. p. 116-232.
- (6) BRANGATO, E.L. - *Insulation aging. A historical and critical Review*. I.E.E.E. Trans., EI-13, nº 4, agosto 1978.
- (7) BOSSI, A. & SESTO, E. - *Instalações elétricas*. 6 ed. São Paulo, Hemus Livraria Editora Ltda, 1978. 1071 p.
- (8) O'DWYER, J.J. - *Breakdown in solids dielectrics*. I.E.E.E. Trans, EI-17, nº 6, dezembro 1982.
- (9) WOLTER, K.D.; JOHNSON, J.F.; TANAKA, J. - *Degradation product analysis for polymeric dielectric materials exposed to partial discharges*. I.E.E.E. Trans, EI-13, nº 5, outubro 1978.
- (10) DAKIN, T.W. - *High voltage insulation applications*. I.E.E.E. E. Trans, EI-13, nº 4, agosto 1978.
- (11) LYNCH, A.C.; WATSON, J.F.; MASON, J.H. - *Monitoring partial discharges in successive voltage cycles*. Diel. Mat., Measur. Appl. Conf. on I.E.E., setembro 1979. p. 89-92.

- (12) ALSTON, L.L. - *High voltage technology*. Oxford, University Press, 1978. p. 1-183.
- (13) FONSECA, J.R. - *Comportamento dos isolamentos em ar e isolamentos internos a solicitações de tensão*. Curso de sobretensões de manobra na CHESF, abril 1981.
- (14) HEDMAN, D.E. - *Coordenação de isolamento*. Curso de Engenharia em sistemas elétricos de potência. Univers.Fed.Sta. Maria, 1979.
- (15) BEEREN, H. von - *Técnica de la alta tension*. 3 ed. Barcelona, Editorial Labor, 1956.
- (16) DIB, W.M. - *Contribuição ao estudo de sobretensões em subestações convencionais e isoladas a SF₆*. Campinas, 1983. (Tese de mestrado. Unicamp)
- (17) WELLAUER, M. - *Introdução a técnica das altas tensões*. 1 ed. São Paulo, Polígono, 1973. p. 145-271.
- (18) PISSOLATO FILHO, J. - *Cálculo de campo em alta tensão com dois meios dielétricos pelo método numérico de simulação de cargas*. Campinas, 1982. (Tese de mestrado. Unicamp)
- (19) WHITEHEAD, S. - *Dielectric breakdown of solids*. 1 ed. Oxford, Claredon Press, 1951. p. 163-235.
- (20) KREUGER, F.H. - *Discharge detection in high voltage equipment*. New York, American Elsevier Publishing Company, 1964.
- (21) MASON, J.H. - *Discharges*. I.E.E.E. Trans, EI-13, nº 4, agosto 1978.

- (22) PARR, D.J. & SCARISBRICK, R.M. - *Performance of synthetic insulator materials under polluted conditions.* Proc. I.E.E. (London). vol. 112, p. 1625, 1965 (referência de M.J. Billings(38)).
- (23) BARTINIKAS, R. - *Engineering dielectrics.* Philadelphia, A.S.T.M. Publications, 1979.
- (24) LAURENT, C. et alii - *Electrical breakdown due to discharges in different types of insulation.* Trans. E.I.-16, nº 1, fevereiro 1981.
- (25) ROTH, A. - *Técnicas de la alta tension.* Barcelona, Editorial Labor S.A., 1966.
- (26) LEROY, G.; LACOSTE, R.; BUI, A. - *Analytical study of the degradation of solid insulation material through ionizing discharges.* Elec. Dischg. Gas. Sup. Ind. Conf. on E.I. p. 393-403, 1962.
- (27) TORIYAMA, Y. et alii - *Degradation of polyethylene by partial discharges.* I.E.E.E. Trans. E.I-2, nº 2, agosto 1967.
- (28) HARROLD, R.T. & SLETTEN, A.M., Trans. I.E.E.E. PAS 89. p. 1584, 1970. (referência de J.H. Mason(21)).
- (29) DAKIN, T.W. & MALINARIC, P.J., Trans. A.I.E.E. 79 - III p. 648, 1960 (referência de J.H. Mason(21)).
- (30) DAKIN, T.W.; JOHNSON, J.S.; WORKS, C.N., Trans. I.E.E.E. PAS 88 p. 251, 1969. (referência de J.H. Mason(21)).
- (31) MASON, J.H. & WATSON, J.F. - *Some factors which affect the tracking and erosion resistance of organic materials.* Diel. Mat., Measur. Appl. Conf. on I.E.E. setembro 1979. p. 278-281.

- (32) BILLINGS, M.J.; SMITH, A.; WILKINS, R. - *Tracking in polymeric insulation*. I.E.E.E. Trans. EI-2, nº 3, dezembro 1967.
- (33) NORTON, F. - *Introdução a tecnologia cerâmica*. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1973.
- (34) VAN VLACK, H.L. - *Propriedades dos materiais cerâmicos*. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1973.
- (35) NORTON, F.H. - *Fine Ceramics - technology and applications*. New York, McGraw Hill, 1970. p. 387-407.
- (36) AGNELLI, J.A.M. - *Efeito do emprego de fibras de vidro curtas como reforço de resinas termofixas*. Campinas, 1978. (Tese de mestrado, Unicamp).
- (37) BILLMEYER, F.W. - *Textbook of polymer science*. New York, J. Wiley, 1971.
- (38) MANRICH, S. - *Propriedades mecânicas de compostos de polietileno de baixa densidade mais terra diatomácea modificada superficialmente*. São Carlos, 1983. (Tese de mestrado, UFSCar).
- (39) BRYDSON, J.A. - *Plastics materials*. London, Butterworths, 1969.
- (40) LAS MARIAS, P.M. de - *Química e física de los altos polímeros y materias plasticas*. Madrid, Editorial Alhambra S. A., 1972.
- (41) COBINE, J.D. - *Gaseous conductors - theory and engineering applications*. New York, Dover Publication, 1958. p. 177-185.

- (42) A.S.T.M. D-149 - *Dielectric breakdown voltage and dielectric strength of electrical insulating materials at commercial power frequencies.* 1970.
- (43) NBR-5389 - *Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão.* março 1979.
- (44) IEC-168 - *Essais des supports isolants d'intérieur et d'extérieur, en matière céramique ou en verre, destinés à des installations de tension nominale supérieure à 1000 V.* 1979.
- (45) IEC-60.1 - *Techniques des essais à haute tension - part 1: General definitions and test requirements.* 1973.
- (46) ALPERT, N.L.; KEISER, W.E.; SEYMANSKI, H.A. - *I.R. theory and practice of infrared spectroscopy.* 2 ed. New York, Plenum Press, 1970. 380 p.
- (47) KAWASHIMA, A. & HOH, S. - *Lichtenberg figures on various electrical insulating materials.* I.E.E.E. Trans. E.I. - 13, nº 1, fevereiro 1978.
- (48) ALFREY, T. & GURNEE, E.F. - *Polímeros orgânicos.* 1 ed. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda, 1971. p. 1-20.
- (49) TRELOAR, L.R.G. - *The physics and chemistry of rubber.* Oxford, Clarendon Press, 1958.
- (50) FOX, D.; LABES, M.M.; WEISSBERGER, A. - *Physics and chemistry of the organic solid state.* New York, Interscience Publishers, 1963.