

TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO E CORRELAÇÃO COM FENÔMENOS DE
DEGRADAÇÃO EM VARISTORES DE ZnO

Flávio Bittencourt Barbosa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS
PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA
METALÚRGICA E DE MATERIAIS.

Aprovada por:

Prof. Maria Cecília de Souza Nóbrega, D. Sc.

Dr. José Geraldo de Melo Furtado, D. Sc.

Prof. Célio Albano da Costa, Ph.D.

Prof. Sergio Sami Hazan, PhD

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2007

BARBOSA, FLÁVIO BITTENCOURT

Técnicas de diagnóstico e correlação com fenômenos de degradação em varistores de ZnO. [Rio de Janeiro] 2007.

VIII, 146 p., 29,7 cm, (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Metalúrgica e de Materiais, 2007).

Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

1. Varistor de ZnO
2. Caracterização elétrica
3. Degradação

I. COPPE/UFRJ II. Título (série).

DEDICATÓRIA

Às minhas filhas Letícia, Luana, Milena e Vanessa e em especial a minha esposa Ana Lúcia por seu incentivo em me fazer acreditar que seria capaz, por sua compreensão e principalmente amor e carinho durante toda essa jornada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que tiveram participação no desenvolvimento deste trabalho; ao CEPEL pela estrutura laboratorial disponibilizada; ao Fabricante Indústria Eletromecânica Balestro Ltda. pela doação das amostras de ensaio com destaque ao Eng. Adriano Dellalibera; ao Eng. Jorge Luiz De Franco por sua ajuda no desenvolvimento da idéia inicial deste trabalho; aos Eng^{os} Edegard Gomes Júnior e Orsino Borges, pelo apoio no ingresso ao curso de mestrado; às equipes de ensaios do CEPEL, com destaque para Antonio Eduardo Nascimento, José Carlos da Rocha, José Antonio Rodrigues, Jonir Rangel, Jorge Ribeiro de Mendonça, Michel Simonson, Luis Roberto Rodrigues e ao Eng^o Edson Ueti, que realizaram um serviço de grande valor; aos Eng^{os} Marcio Sens e José Geraldo Furtado e ao Físico Alexandre Neves por seus conhecimentos técnicos, interesse e grande ajuda e para o Eng. Fernando Rodrigues da Silva Júnior pelo companheirismo e ajuda durante o período do curso de mestrado.

Aos professores do Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais com destaque para Tsuneharu Ogasawara, Célio Albano da Costa e Luiz Marcelo M. Tavares, pelos ensinamentos durante os cursos tão importantes para o desenvolvimento dessa pesquisa e em especial para Maria Cecília Nóbrega minha professora e orientadora pelos ensinamentos, conselhos e principalmente compreensão diante das minhas dificuldades.

Aos colegas da COPPE pela amizade e toda a ajuda diante das minhas dificuldades com destaque para Cristiane Evelise, Shirleny, Marília Beltrão e Jéferson Capitaneo.

A todos os meus familiares e amigos pelo estímulo e ajuda.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

TÉCNICAS DE DIAGNÓSTICO E CORRELAÇÃO COM FENÔMENOS DE DEGRADAÇÃO EM VARISTORES DE ZnO.

Flávio Bittencourt Barbosa

Março/2007

Orientadora: Maria Cecília de Souza Nóbrega

Programa: Engenharia Metalurgia e de Materiais

A presente dissertação teve como objetivo relacionar resultados de ensaios elétricos e dielétricos não destrutivos e destrutivos com a capacidade de absorção de energia e às características microestruturais dos varistores de óxido de zinco (ZnO). A comparação entre os resultados antes e após degradação do varistor, mediante ensaios de polarização e de absorção de energia, tanto dos ensaios não destrutivos quanto das observações metalográficas mostraram que os aspectos estruturais mais influentes têm dimensões atômicas. Defeitos químico-estruturais presentes nas camadas intergranulares e nas camadas de depleção em todo o conjunto policristalino do corpo cerâmico do varistor são os mais determinantes para o comportamento varistor. Os resultados das análises dielétricas mostraram indícios de degradação nos varistores ensaiados porém não levaram a observação de mudanças na escala microestrutural e nem o decréscimo do desempenho puramente elétrico do dispositivo.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DIAGNOSTIC TECHNIQUES AND CORRELATION WITH PHENOMENONS OF
DEGRADATION IN ZnO VARISTORS.

Flávio Bittencourt Barbosa

March/2007

Advisor: Maria Cecília de Souza Nóbrega

Department: Metallurgical and Materials Engineering

The present dissertation had the objective to correlate results from non destructive and destructive electric and dielectric measurements with the capacity of absorption of energy and microstructural characterization of the zinc oxide varistors (ZnO). Comparison between results before and after polarization and energy absorption tests, as much as before and after non destructive diagnostic testings, lead the conclusion that the more influential structural aspects for the degradation on varistor ceramics body have atomic dimensions. Chemistry-structural defects actually present in the intergranular and depletion layers from all the polycrystalline ceramic Body of the varistor are the most determinative factor for the electrical degradation of the varistor behavior. The results of the dielectric analyses revealed indications of degradation but it was not observed changes at the microstructural dimensions or any significant decrease on the electric performance for the varistor device.

INDICE

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1. Termos aplicáveis	5
2.1.1. Tensão nominal (V_n).....	5
2.1.2. Corrente de fuga (I_f)	5
2.1.3. Corrente de referência (I_{ref})	5
2.1.4. Tensão de referência (V_{ref}).....	5
2.1.5. Máxima tensão contínua de operação (V_{co})	6
2.1.6. Disrupção.....	6
2.1.7. Tensão disruptiva	6
2.1.8. Tensão residual (V_{res})	6
2.1.9. Corrente de descarga.....	6
2.1.10. Corrente de descarga nominal do pára-raios (I_n)	7
2.1.11. Corrente de seguimento ou subsequente	7
2.2. Pára-raios	7
2.2.1. Tipos de Pára-raios	7
2.3. Varistores.....	10
2.4. Varistores a base de ZNO.....	12
2.4.1. Histórico	12
2.4.2. Etapas de fabricação do varistor de ZnO	14
2.4.3. Etapas de processamento e preparação dos pós.....	16
2.4.4. Microestrutura do varistor de ZnO	23
2.4.5. Propriedades básicas e Características Elétricas	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1. MATERIAIS.....	52
3.2. Equipamentos	53
3.3. Planejamento do trabalho	54
3.4. MÉTODOS.....	55
3.4.1. Ensaio da Curva Característica $V \times I$	58
3.4.2. Ensaio da Curva Característica $V \times C$	59
3.4.3. Ensaio de Tensão Residual.....	61
3.4.4. Ensaio de Tensão de Referência	62
3.4.5. Ensaio de Polarização/Despolarização	64

3.4.6. Ensaio de Degradação	66
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.1. Degradação dos varistores por ciclo de descargas atmosféricas.	78
4.1.1. Bloco varistor 05	79
4.1.2. Bloco varistor 06	84
4.1.3. Bloco varistor 16	91
4.1.4. Bloco varistor 22	95
4.2. Degradação dos varistores por impulsos de múltiplas descargas	98
4.2.1. Bloco varistor 10	99
4.2.3. Bloco Varistor 11	104
4.2.3. Bloco varistor 12	111
4.2.4. Bloco varistor 13	116
4.3. Degradação dos varistores por corrente suportável de longa duração	120
4.3.1. Bloco Varistor 20	120
4.3.2. Bloco Varistor 29	125
4.3.3. Bloco Varistor 30	132
4.3.4. Bloco varistor 08	138
4.4. Análise por difração de raio x	140
4.5. Coeficiente de não-linearidade	141
5. CONCLUSÕES	142
6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	143
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144

1. INTRODUÇÃO

O crescimento contínuo dos níveis de tensão e potência transmitida em meio a um cenário nacional de privatização das concessionárias de distribuição de energia elétrica, culminando na desregulamentação do mercado, apontam para a necessidade de aumento da confiabilidade dos sistemas elétricos, pois a sociedade contemporânea depende, em escala progressiva, da energia elétrica e exige, cada vez mais, melhorias e padrões de qualidade no fornecimento, o que torna imperativo que o produto seja entregue nas melhores condições ao consumidor final.

Como no Brasil a incidência de descargas atmosféricas é muito grande, os equipamentos instalados nos sistemas elétricos de potência das empresas devem funcionar adequadamente mesmo sob esta condição, isto é, proporcionando economia e garantindo um suprimento de energia elétrica contínuo.

Os equipamentos estão sujeitos a sobretensões que incidem sobre os sistemas elétricos de potência, podendo ser de duas formas: externa (descargas atmosféricas) e interna (operações de manobra e de ocorrências de curto circuito no sistema) [1].

Devido à grande dimensão do sistema de energia elétrica em nosso país, o efeito das sobretensões sobre os equipamentos instalados depende basicamente das suas características construtivas. Dessa forma, é necessário que as características de isolamento dos equipamentos elétricos sejam compatíveis com as sobretensões encontradas no sistema e, para isso, uma avaliação da amplitude das sobretensões é efetuada na fase de projeto. As sobretensões de origem interna apresentam uma amplitude limitada, embora ofereçam, algumas vezes, limites muito altos. Já as sobretensões originadas por descargas atmosféricas são, no entanto, ilimitadas, não se podendo garantir a não ocorrência de um valor superior a um máximo estipulado [1].

Nas sobretensões originadas por descargas atmosféricas são levados em conta:

- O estudo da propagação da descarga no sistema, ou seja, até onde e como os seus efeitos serão notados;
- A experiência acumulada da ocorrência de descargas atmosféricas e os seus parâmetros mais importantes, tais como: frequência de ocorrência, amplitude, tempo de frente, polaridade, número de descargas sucessivas, etc.

Estatisticamente, há uma grande probabilidade dessas descargas incidirem pelas linhas de distribuição e transmissão de energia elétrica, podendo causar danos em diferentes locais e equipamentos. Dessa maneira, a fim de diminuir os danos causados nos equipamentos instalados no sistema, realiza-se o estudo de coordenação de isolamento. Este tipo de estudo permite que se estabeleçam as probabilidades de ocorrência de sobretensões nos diversos pontos do sistema e nos diversos equipamentos. [1]

Em função da probabilidade de ocorrência de sobretensões obtida do estudo de coordenação de isolamento e da taxa de risco admitida na concepção do sistema, em cada ponto ou em cada equipamento, pode-se então especificar o valor de sobretensão a ser suportada. Na maior parte das vezes, o valor de sobretensão obtido é muito alto, sendo inviável, economicamente, construir equipamentos com este nível de isolamento [1].

Quando isso ocorre, faz-se necessário reduzir essas sobretensões, sendo essa uma preocupação bastante antiga. Os meios mais usados para isso são:

- Blindagem do sistema contra descarga atmosférica;
- Melhoria das características do sistema para que na propagação dos surtos de sobretensão, parte de energia seja dissipada ou desviada;
- Instalação no sistema de elementos protetores tais como centelhadores ou pára-raios para dissipar ou desviar a energia do surto [1].

A proteção de sistemas elétricos envolve técnicas bastante especializadas onde são avaliados eficiência, confiabilidade e custo da solução encontrada. Dentre os dispositivos atualmente utilizados para reduzir o efeito proveniente das sobretensões sobre os equipamentos instalados nas redes elétricas, o pára-raios tem se mostrado como o mais eficaz, em vista de sua relação custo/benefício [2]. O pára-raios tem a importante função de detectar e limitar as elevadas sobretensões transitórias nos terminais dos equipamentos por ele protegidos em níveis preestabelecidos, de tal forma que o isolamento destes equipamentos não fique com a sua característica afetada após a ocorrência de uma sobretensão, que pode ocorrer nos sistemas de transmissão e distribuição.

Até o presente momento não existem técnicas de diagnóstico de campo capazes de identificar de forma clara e objetiva pára-raios defeituosos e ineficientes. Essa dificuldade se deve, em grande parte, às características construtivas e operativas

dos pára-raios, que são equipamentos selados que não permitem a inspeção de seus componentes internos.

Na esteira do aumento da confiabilidade no monitoramento e manutenção dos pára-raios estão sendo desenvolvidas ferramentas de apoio à decisão na manutenção de pára-raios instalados no sistema, tais como, os equipamentos para monitoramento contínuo do pára-raios através de sua corrente de fuga e temperatura. Quando os pára-raios operam, os invólucros cerâmicos ou poliméricos que os compõem absorvem uma quantidade de energia elevada e suas temperaturas aumentam. Quando a dissipação de calor dessas cerâmicas ou polímeros não é satisfatória, a temperatura excede em certo limite e o pára-raios torna-se termicamente instável, podendo ocorrer o fenômeno da avalanche térmica. Essa degradação térmica dos blocos cerâmicos é de extrema importância e dependendo da sobretensão, pode ocorrer a perfuração ou até mesmo a ruptura dos blocos.

Em décadas anteriores os pára-raios eram, na sua totalidade, do tipo de carbeto de silício (SiC), constituídos basicamente pelos varistores de SiC em série com um conjunto de centelhadores. No entanto, devido à impossibilidade de se obter um aumento substancial nas suas propriedades não-lineares, a evolução tecnológica deste tipo de varistor praticamente atingiu o seu limite. No final da década de 70 os primeiros pára-raios de óxido de zinco (ZnO) desenvolvidos para os sistemas de potência foram lançados no mercado [2]. Esses eram formados somente por varistores de ZnO, sem a presença de centelhadores em série, e eram produzidos pela combinação do ZnO com vários outros óxidos aditivos, apresentando propriedades resistivas altamente não-lineares.

Desde o desenvolvimento dos primeiros pára-raios para aplicações no sistema de potência, diversas pesquisas têm sido realizadas pelos fabricantes no sentido de estudar o efeito de novos aditivos sobre as propriedades físicas e elétricas dos varistores. O objetivo é sempre o de procurar melhorar o desempenho dos varistores no que se refere às suas propriedades não-lineares, à capacidade de absorção de energia e à estabilidade e degradação devido à operação contínua nos sistemas, sob condições de regimes permanente e transitório [2].

No desenvolvimento desta Dissertação de mestrado foi realizada uma revisão dos conceitos acerca dos varistores de ZnO, dando ênfase às propriedades elétricas dos varistores, com a interpretação dos resultados de ensaios elétricos não destrutivos (ensaio de tensão de referência, tensão residual, curva característica tensão x corrente

(V x I) e tensão x capacitância (V x C) e polarização-despolarização) e destrutivos (degradação do varistor) e foram também realizadas observações metalográficas. Inicialmente foram realizadas medições nos varistores por meio de ensaios não destrutivos e observações metalográficas. Em seguida, foram realizados os ensaios de degradação nos varistores. Finalmente, os varistores foram submetidos novamente aos ensaios não destrutivos e as observações metalográficas. A comparação entre os resultados antes e após a degradação do varistor, tanto dos ensaios não destrutivos quanto das observações metalográficas mostraram que essas análises carecem de poder de resolução no nível dos defeitos químicos presentes nas camadas intergranulares em todo o conjunto policristalino do corpo cerâmico do varistor. Essa abordagem visa capacitar a produção e caracterizar a classe de materiais cerâmicos que compõem os pára-raios, auxiliando assim na solução de problemas específicos do setor elétrico.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Termos aplicáveis

Faz-se necessário conceituar os termos aplicáveis ao presente estudo.

2.1.1. Tensão nominal (V_n)

A tensão nominal de um pára-raios é o valor de freqüência industrial para o qual o pára-raios é projetado, sendo utilizada como parâmetro na especificação das características de operação dos pára-raios. Geralmente, a tensão nominal é o limite para as sobretensões dinâmicas permissíveis para o sistema, sendo permitido ultrapassar este valor, somente nas condições estabelecidas explicitamente pelo fabricante do pára-raios considerado [3].

2.1.2. Corrente de fuga (I_f)

A corrente de fuga representa a corrente de freqüência industrial que circula pelo pára-raios, quando o mesmo é submetido a uma tensão em regime permanente de freqüência industrial, seja em operação normal no sistema ou em ensaios de tensão aplicada [3].

2.1.3. Corrente de referência (I_{ref})

A corrente de referência, aplicada ao pára-raios de ZnO, consiste no valor de crista da componente resistiva da corrente de fuga de freqüência industrial, independentemente da polaridade, utilizada para determinação da tensão de referência do pára-raios. Este valor é estabelecido pelo fabricante [3].

2.1.4. Tensão de referência (V_{ref})

A tensão de referência consiste no valor de crista da tensão de freqüência industrial dividida por raiz de dois, que aplicada aos terminais do pára-raios, fornece a corrente de referência. Valores típicos para a amplitude da corrente de referência estão compreendidos na faixa de 1 mA a 20 mA [3].

2.1.5. Máxima tensão contínua de operação (V_{co})

Consiste no maior valor de tensão, que aplicado aos terminais dos pára-raios de ZnO sem centelhadores, permite que este opere continuamente. Esta tensão está na faixa de 50 a 85% da tensão de referência, dependendo do tipo e das características dos varistores de ZnO [3].

2.1.6. Disrupção

É a descarga disruptiva de todos os eletrodos do centelhador série do pára-raios. [3].

2.1.7. Tensão disruptiva

A tensão disruptiva de um pára-raios consiste no valor de crista da tensão de ensaio, que aplicada aos seus terminais causa a disrupção do centelhador série. A tensão disruptiva está relacionada aos ensaios de frequência industrial, ao impulso atmosférico e ao impulso de manobra, sendo aplicada somente a pára-raios que apresentem centelhadores em série [3].

2.1.8. Tensão residual (V_{res})

Entende-se por tensão residual o valor de crista da tensão observada entre os terminais do pára-raios durante a passagem da corrente de descarga. No caso de pára-raios com centelhadores, a tensão residual consiste na tensão total observada sobre os seus terminais, após a disrupção dos centelhadores (queda de tensão sobre os varistores acrescida da queda de tensão nos centelhadores). No caso de pára-raios de ZnO sem centelhadores, a tensão residual refere-se quase que exclusivamente a queda de tensão sobre os varistores [3].

2.1.9. Corrente de descarga

Consiste na corrente de impulso que flui através do pára-raios, sendo caracterizada pela forma de onda, amplitude e polaridade [3].

2.1.10. Corrente de descarga nominal do pára-raios (I_n)

Valor de crista da corrente de descarga, com forma 8/20 μ s, que é utilizada para classificar o pára-raios [3].

2.1.11. Corrente de seguimento ou subsequente

Consiste no valor de crista da corrente de frequência industrial, que flui através do pára-raios após a passagem da corrente de descarga, quando o mesmo está submetido a uma tensão de frequência industrial. A amplitude desta corrente está diretamente relacionada com a tensão de frequência industrial aplicada e com a impedância dos varistores, no instante da passagem desta corrente. [3].

2.2. PÁRA-RAIOS

O pára-raios tem como função principal limitar as sobretensões nos terminais dos equipamentos por ele protegidos a níveis aceitáveis, de tal modo que a isolação desses equipamentos não fique com as suas características comprometidas, após a ocorrência de uma sobretensão. A operação adequada do pára-raios está intimamente ligada ao compromisso de confiabilidade do sistema [4].

Para se garantir a eficiência e a confiabilidade de um determinado projeto de pára-raios, em relação às características de proteção e operação requeridas ao bom desempenho desse equipamento nos sistemas elétricos, são realizados, inicialmente, ensaios de tipo em protótipos desse projeto desenvolvido. Uma vez aprovado o projeto, todas as unidades de pára-raios produzidas são submetidas aos ensaios de rotina, definidos em norma. Durante a fase de aquisição de lotes de fornecimento, algumas unidades de pára-raios são submetidas a ensaios de aceitação ou recebimento, normalizados ou não. Estes ensaios têm por finalidade avaliar às características de proteção e de operação do lote de pára-raios novos produzidos, em relação às características de projeto, obtidas nos ensaios de tipo [4].

2.2.1. Tipos de Pára-raios

Atualmente, existem disponíveis nos mercados nacional e internacional, três tipos de pára-raios.

- ↪ Pára-raios de carbeto de silício (SiC) com centelhadores série e invólucro de porcelana;
- ↪ Pára-raios de óxido de zinco (ZnO) sem centelhadores série e com invólucro de porcelana ou de material polimérico;
- ↪ Pára-raios de óxido de zinco com centelhadores série e invólucro de porcelana.

2.2.1.1. Pára-raios de Carbeto de Silício (SiC)

O pára-raios de carbeto de silício (SiC), Figura 1, também conhecido como pára-raios convencional, é formado basicamente por resistores não-lineares (varistores), a base de carbeto de silício, em série com um conjunto de centelhadores limitadores de corrente, tendo como invólucro um isolador de porcelana [2, 4].

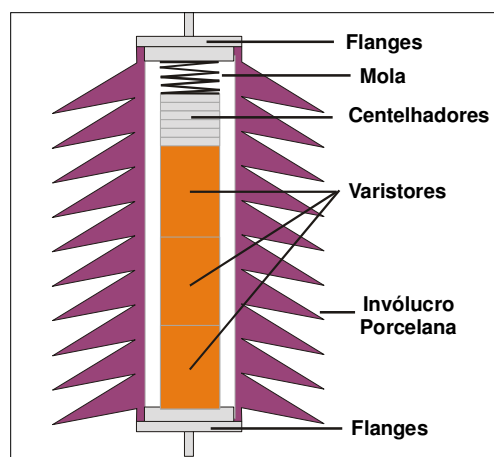


Figura 1 - Pára-raios de SiC [4].

Neste tipo de pára-raios, os centelhadores têm duas funções principais:

- A primeira é a de “isolar” o pára-raios do sistema sob condições de regime permanente, uma vez que sem esses centelhadores tem-se, para condições normais de operação, uma alta amplitude de corrente de frequência industrial, provocando um aquecimento excessivo nos varistores de SiC. Essa condição irá provocar a destruição dos varistores em poucos ciclos.
- A segunda é a de auxiliar a extinção da corrente subsequente que flui através dos varistores, quando da passagem da corrente pelo zero [2].

2.2.1.2. Pára-raios de Óxido de Zinco (ZnO) sem centelhadores

Os pára-raios de óxido de zinco sem centelhadores, Figura 2, foram introduzidos no mercado no final da década de 70. O pára-raios de óxido de zinco sem centelhadores é constituído basicamente por varistores a base de ZnO, montados em série. Devido à alta não-linearidade observada na característica “tensão x corrente” desse varistor, este tipo de pára-raios dispensa a utilização de centelhadores. Este fato simplifica a montagem destes projetos, além de oferecer ao sistema inúmeras vantagens em relação aos aspectos protetivos e operativos. No entanto, pelo fato de não apresentar centelhadores série, este tipo de pára-raios além de atuar para solicitações transitórias, se mantém continuamente solicitado pela tensão de operação do sistema. Esta condição propicia a degradação ou deterioração dos varistores de ZnO ao longo do tempo de energização [2].

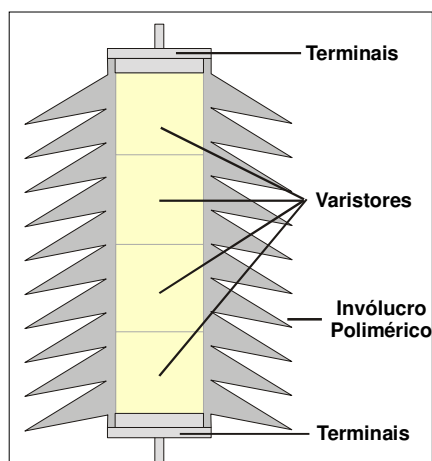


Figura 2 – Pára-raios de ZnO sem centelhador [4].

Este tipo de pára-raios vem sendo largamente utilizado para proteção dos sistemas de transmissão. Em alguns países, como por exemplo o Japão quase a totalidade dos pára-raios instalados nos sistemas de transmissão são a base de ZnO. No Brasil as empresas concessionárias, bem como as grandes indústrias, vêm adquirindo pára-raios de ZnO em substituição aos pára-raios de SiC. No entanto, nos sistemas de distribuição, face à grande quantidade de pára-raios instalados, apesar da maior parte das aquisições serem a base de ZnO, ainda existe uma quantidade bastante significativa de pára-raios de SiC [2].

2.2.1.3. Pára-raios de óxido de zinco (ZnO) com centelhadores

O pára-raios de óxido de zinco com centelhadores apresenta aplicação restrita a sistemas de distribuição. Neste tipo de projeto, além dos varistores de ZnO, são introduzidos centelhadores em série. Estes centelhadores têm como função principal

“isolar” o pára-raios do sistema sob condições de regime permanente, reduzindo a degradação dos varistores de ZnO. Cabe destacar que estes varistores apresentam características superiores aos projetos a base de varistores de SiC e características inferiores aos projetos a base de varistores de ZnO sem centelhadores. Desta forma, para esta aplicação, os centelhadores podem apresentar projeto simplificado em relação aos utilizados em projetos de pára-raios de SiC [4]

Alguns fabricantes nacionais e internacionais, apontam este tipo de pára-raios, como o mais adequado, sob o ponto de vista técnico-econômico, para aplicações em sistemas de distribuição. O argumento apresentado por estes fabricantes se deve ao fato de quando comparados aos pára-raios de SiC, apresentam maior não-linearidade na característica “tensão x corrente”, menores valores de tensão residual e valores muito baixos de corrente subsequente. Em relação aos pára-raios de ZnO sem centelhadores, o argumento restringe-se ao suposto menor custo de aquisição dos pára-raios de ZnO com centelhadores. Contudo, face aos desenvolvimentos implementados no processo de fabricação de pára-raios de ZnO sem centelhadores, e a conseqüente redução no custo de aquisição, as concessionárias optaram pelos pára-raios de ZnO sem centelhadores. O uso de pára-raios de ZnO sem centelhadores evidencia a utilização de blocos varistores de alta qualidade, visto que este tipo de bloco não necessita de centelhadores [2].

2.3. Varistores

O nome varistor foi derivado da expressão inglesa “*variable resistor*”, sendo um dispositivo cerâmico semiconductor caracterizado por apresentar propriedades resistivas altamente não-lineares, dependente da tensão elétrica que existe entre seus terminais; sendo também conhecido como resistor não-linear, resistor dependente da tensão elétrica (do inglês, *voltage dependent resistor*, VDR), supressor de surtos elétricos, limitador de sobretensões, entre outros sinônimos [5].

Existem atualmente dois tipos de varistores em escala industrial: os varistores de Óxido de Zinco (ZnO) e os varistores de Carbetto de Silício (SiC). Esses tipos de varistores apresentam características de não-linearidade essenciais para um bom desempenho dos pára-raios, que são dispositivos utilizados para limitar a amplitude das sobretensões nos sistemas elétricos e reduzir os efeitos dessas sobretensões nos equipamentos instalados. Assim varistores são dispositivos cuja função é restringir

surtos de tensão elétrica e, ainda que fazendo isto repentinamente, não sejam destruídos [2, 5].

Um varistor em operação normal, num circuito ou rede elétrica, é semelhante a um circuito aberto. Quando ocorre uma sobretensão, que ultrapassa a tensão de ruptura dielétrica¹ (que é a tensão necessária para a sua entrada em condução), o varistor passa a se comportar como um condutor, sua resistência elétrica decai rapidamente, dando vazão à corrente elétrica excessiva, que é então desviada para a terra, impedindo que a tensão nos seus terminais ultrapasse um determinado valor, de forma a não danificar os equipamentos ou circuitos por ele protegidos. Quando, após o surto, a tensão retorna ao seu patamar normal de operação, o varistor volta a se comportar como um circuito aberto. Esta alternância de comportamento elétrico ocorre, em geral, com pequena histerese, dependendo do grau de degradação do varistor [5]. Na Figura 3, um circuito elétrico simples mostra uma configuração típica de ligação de um varistor no sistema elétrico (geralmente ligado em paralelo ao sistema de alimentação de energia e ao equipamento).

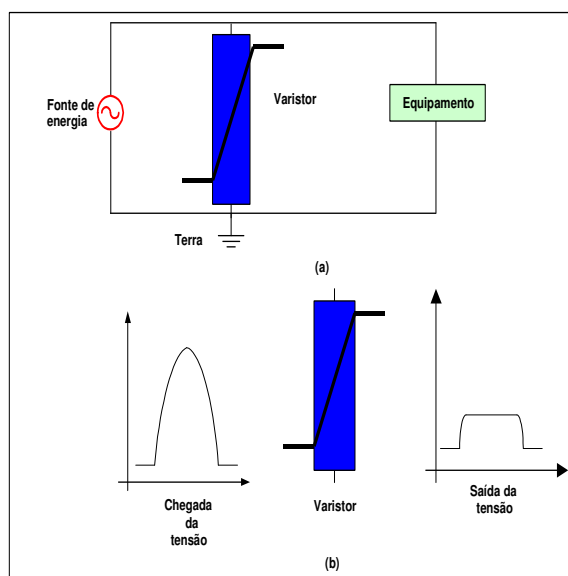


Figura 3 – Configuração típica da ligação de um varistor.

Assim, podemos afirmar que um varistor é um resistor que apresenta uma elevada resistência elétrica em baixas tensões e uma baixa resistência elétrica em altas tensões.

¹ Também conhecida pelos termos “tensão de chaveamento” ou “tensão não-linear”.

2.4. Varistores a base de ZNO

2.4.1. Histórico

O mais antigo dispositivo construído para proteção contra sobretensões foi o retificador de selênio², utilizados para proteção dos sistemas de telefonia e outras aplicações envolvendo a supressão de surtos de baixa tensão. Mais tarde, este dispositivo foi substituído pelo diodo Zener³. Com a contínua necessidade de busca de dispositivos que apresentassem melhor desempenho, surgiram os varistores cerâmicos à base de carbeto de silício (SiC), que ainda hoje são largamente utilizados em redes de alta tensão (em pára-raios de linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica) [5, 6]. No entanto, devido à impossibilidade de se obter um aumento substancial nas propriedades não-lineares dos varistores cerâmicos à base de carbeto de silício (SiC), a evolução tecnológica deste tipo de varistor praticamente atingiu o seu limite. Com a procura das novas tecnologias foram iniciadas pesquisas no sentido de substituir o varistor de SiC, e atualmente o composto semiconductor à base de ZnO está sendo cada vez mais utilizado.

Os primeiros relatos dos compostos semicondutores cerâmicos a base de ZnO, vieram da antiga União Soviética, porém, sem nenhuma repercussão no mundo industrial. Entretanto, no final da década de 60, com o desenvolvimento tecnológico que introduziu o que hoje conhecemos com o advento dos Novos Materiais, propiciou o surgimento de estudos mostrando que a cerâmica à base de ZnO poderia ser utilizada como varistor, apresentando melhor desempenho que os resistores não-lineares baseados no SiC [5, 7, 8].

Inicialmente destinados à proteção de circuitos eletrônicos, os varistores a base de ZnO foram desenvolvidos por Matsuoka [9] e seu grupo de pesquisa, caracterizados por baixos valores de tensão e de energia, a partir de 1968, e comercializado já em 1970, pela Matsushita Electrical Co. Ltda. Na primeira década após sua invenção, vários aditivos foram utilizados para incrementar o desempenho destes dispositivos como supressores de sobretensões, chegando-se a clássica

² Um retificador de selênio é composto de uma fina camada de selênio depositada num só lado de uma placa de alumínio e um metal altamente condutor sobre esta. Os elétrons movimentam-se mais livremente da camada condutiva ao selênio que no sentido oposto, realizando, assim, a retificação.

³ Um diodo Zener é um diodo de junção destinado a efetuar uma ruptura não destrutiva de uma resistência muito alta a outra muito baixa em um nível predeterminado de tensão. Esta característica permite manter uma tensão de referência muito estável através do diodo, mesmo com uma ampla faixa de corrente através do dispositivo.

formulação proposta por Matsuoka [9], que é mostrada na Tabela 1. A partir deste desenvolvimento, diversas empresas, sob licença da Matsushita, iniciaram estudos visando o desenvolvimento de varistores que pudessem ser utilizados em sistemas elétricos de potência.

Tabela 1 – Composição química típica de um varistor de ZnO convencional [4,10].

Componente	% molar
ZnO	96,5
Bi ₂ O ₃	0,5
Sb ₂ O ₃	1,0
CoO	1,0
MnO	0,5
Cr ₂ O ₃	0,5

Assim, varistores a base de ZnO têm se tornado de particular interesse para a moderna proteção contra surtos elétricos, pelo fato de que suas características elétricas não-lineares, as faixas de tensão (de cerca de 5 V até dezenas de kV) e corrente elétrica (de μ A até kA, em circuitos de corrente contínua ou alternada) sob as quais o dispositivo pode ser usado, além de sua capacidade de absorver energia (desde poucos joules à milhares de joules) do pulso transitório, são bastante superiores àquelas dos varistores baseados no SiC [5, 9, 10]. Esse dispositivo, formado por varistores cerâmicos a base de óxido de zinco (ZnO) e pequenas quantidades de outros óxidos, apresentou um alto grau de não-linearidade na sua característica “tensão x corrente”, proporcionando baixos valores de corrente na região de operação associado a uma boa estabilidade quando continuamente solicitados pela tensão normal de operação [2].

Os varistores a base de ZnO são hoje em dia mundialmente utilizados, com um vasto campo de aplicação que vai desde a proteção de circuitos eletrônicos até a aplicação em sistemas de extra alta tensão, como mostrado na Figura 4.

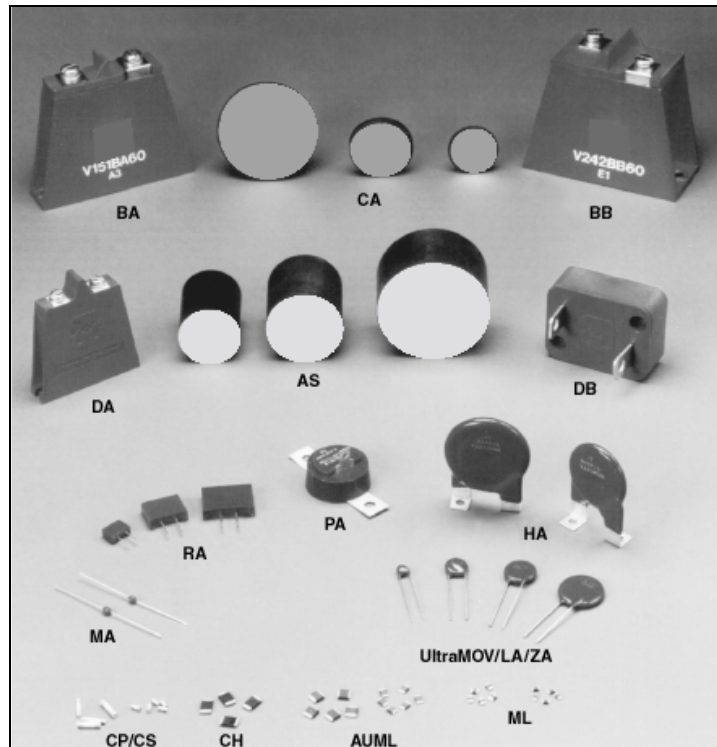


Figura 4 – Principais tipos de varistores.

2.4.2. Etapas de fabricação do varistor de ZnO

Os varistores a base ZnO são industrialmente produzidos por processamento cerâmico convencional. O principal componente utilizado para a produção de varistores de ZnO é o óxido de zinco com alto grau de pureza. Em adição ao ZnO, pequenas quantidades de outros óxidos são introduzidas nas composições dos varistores, tais como os óxidos de Bismuto, Silício, Gálio, Lítio, Praseodímio, dentre outros [2].

Varistores produzidos em escala industrial apresentam uma proporção de concentração total de aditivos na faixa de aproximadamente 10% da concentração total. Várias pesquisas têm sido realizadas para avaliar o comportamento de cada agente no processo. Sabe-se atualmente que cada um desses óxidos tem uma propriedade importante dentro do processo de fabricação dos varistores de ZnO. As características dos varistores dependem em muito do processo de fabricação. A pureza, concentração dos dopantes e a homogeneidade da mistura são de importância fundamental para a qualidade do produto final [2].

As características do varistor são determinadas pela aplicação requerida. O pó é prensado em uma forma de dimensões predeterminadas para obter um valor desejado de tensão nominal. Para obter características compatíveis com os impulsos de corrente e a capacidade de absorção de energia requerida, a área de eletrodo e a massa do varistor são variadas [6].

O material de iniciação do processo pode diferir dependendo da composição dos óxidos a serem aditivados no composto. Esta ação tem por objetivo cobrir as tensões requeridas às aplicações dos varistores [2].

Os problemas surgidos em qualquer uma das etapas podem afetar as seguintes e, em última instância, afetar a qualidade e o desempenho da peça cerâmica final. Assim, as características das etapas de um processo produtivo devem ser analisadas em relação aos conseqüentes efeitos ao processo como um todo. Na Figura 5 é apresentada uma representação esquemática de um processo simplificado de produção de varistores e esse processo de produção industrial do varistor pode ser dividido em oito etapas:

- a. Dispersão, homogeneização e moagem;
- b. Spray-Dryer;
- c. Conformação;
- d. Sinterização;
- e. Isolação;
- f. Acabamento;
- g. Ensaio Elétrico e classificação;
- h. Varistores prontos para montagem.

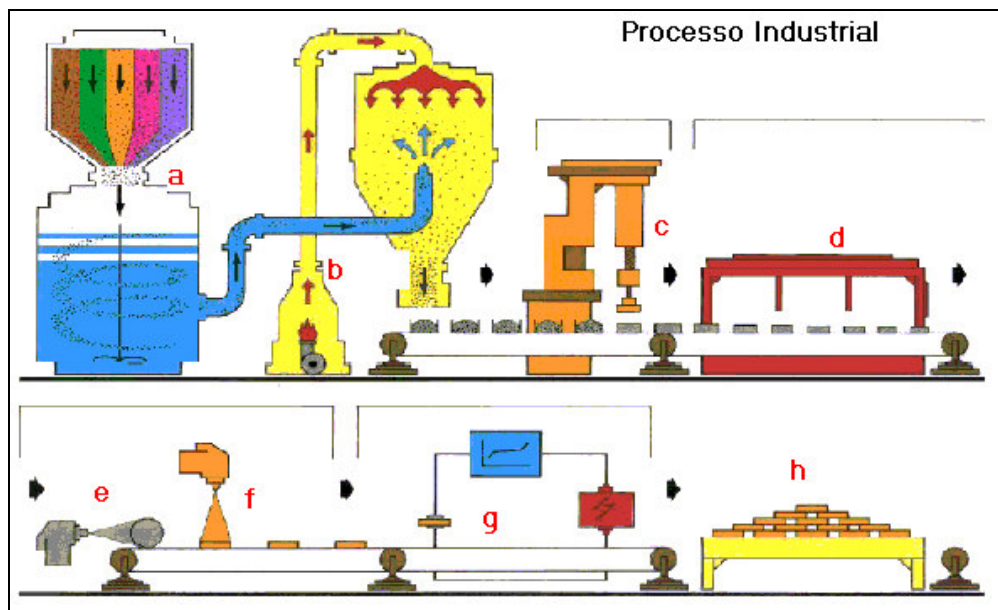


Figura 5 - Representação esquemática de um processo simplificado de fabricação de Varistores Cerâmicos [6].

2.4.3. Etapas de processamento e preparação dos pós

Um dos pontos críticos do processo de fabricação dos varistores é a obtenção de uma mistura adequada de componentes, que consiste em um parâmetro importante para a obtenção de uma homogeneidade por todo o varistor. Os componentes utilizados na produção dos varistores devem ser cuidadosamente selecionados. A sua natureza química, pureza, reatividade química e repartição granulométrica devem ser medidas. Para a produção em escala industrial é exigido que os óxidos atendam às especificações de fabricação. A pureza dos óxidos utilizados é imprescindível para a produção de varistores de boa qualidade. A presença de pequenas quantidades de óxido de cobre, por exemplo, afeta o desempenho elétrico dos varistores. Para a produção em escala industrial utilizam-se normalmente partículas com grau de pureza iguais ou maiores a 99,9% [2].

Um dos processos para produção do óxido de zinco utilizado na fabricação dos varistores consiste na obtenção destes a partir da oxidação do vapor de zinco metálico puro, e, por isso, o seu nível de impureza é baixo. O tamanho das partículas é importante para o processo de formação dos varistores. Dentre outros aspectos, é importante que as partículas apresentem tamanhos pequenos e uniformes, pois isso

possibilita uma melhor mistura e evita sedimentação excessiva de materiais durante as primeiras etapas do processo. Pequenas variações no tamanho inicial destas partículas alteram as propriedades não-lineares dos varistores. O tamanho do grão do produto sinterizado aumenta com a redução do tamanho das partículas. O tamanho médio das partículas de óxido de zinco utilizadas é geralmente da ordem de 0,3 μm , enquanto que os demais óxidos metálicos utilizados como aditivos apresentam partículas com tamanho médio aproximadamente 10 vezes maior. Devido a diferença verificada na densidade e no tamanho das partículas dos diversos aditivos e do ZnO, é necessário que as partículas maiores sejam moídas antes de serem utilizadas [2].

A Tabela 2 apresenta as principais características de alguns componentes empregados na fabricação de varistores.

Tabela 2 – Características de alguns óxidos empregados utilizados na fabricação de varistores de ZnO [2].

Óxido	Fórmula	Peso molecular	Densidade (g/cm^3)	Ponto de Fusão ($^{\circ}\text{C}$)	Pureza (%)	Tamanho médio das partículas (μm)
Zinco	ZnO	81,37	5,61	1975	99,9	0,1 - 0,5
Bismuto	Bi_2O_3	465,96	8,90	825	99,9	5 - 10
Cobalto	Co_2O_3	165,86	5,18	895 (decomposto)	99,9	1 - 5
Manganês	MnO_2	86,94	5,03	535 (decomposto)	99,9	5 - 10
Antimônio	Sb_2O_3	291,50	5,20	656	99,9	1 - 5
Níquel	NiO	74,71	6,67	1984	99,9	1 - 5
Cromo	Cr_2O_3	151,99	5,21	2266	99,9	1 - 5

O procedimento utilizado nos estágios de mistura e secagem depende da quantidade total de matéria prima. Durante esta etapa de mistura, a homogeneidade e a viscosidade da pasta devem ser cuidadosamente controladas. Para pequenas quantidades, menores do que 1 kg de material seco, a mistura normalmente é feita em uma quantidade de álcool etílico aproximadamente igual a 50% do peso sólido do material. Para dispersar as aglomerações e obter uma distribuição uniforme de dopantes e do óxido de zinco, o material é misturado por um período de aproximadamente 10 a 15 minutos, utilizando um misturador de alta velocidade, o que

proporciona uma excelente mistura dos componentes. Após a mistura, o álcool é removido por um filtro de vácuo através da evaporação com agitação da mistura. Alguma quantidade de álcool restante é removida por secagem em forno a aproximadamente 110°C. Antes da prensagem o material é pulverizado e misturado a seco, com aproximadamente 5% de uma solução de água-aglutinante. A concentração de aglutinante, PVA (álcool polivinílico), na solução aquosa deve ser de aproximadamente 5%, a fim de proporcionar uma rigidez suficiente no varistor de ZnO [2].

Para quantidades maiores, os dopantes e o óxido de zinco são misturados em uma quantidade de água deionizada igual a aproximadamente 60% do peso sólido do material. Nesse caso, o aglutinante PVA (álcool polivinílico) é adicionado durante a mistura. Depois que todos os materiais forem adicionados, a mistura é feita durante cerca de meia a uma hora num misturador com hélices. Após a mistura, a água é removida da substância pastosa resultante por um processo de atomização. Este processo consiste em injetar a mistura através de um bocal atomizador em uma câmara aquecida, dentro da qual circula ar forçado pré-aquecido em direção oposta, que proporciona uma rápida remoção da umidade presente nas partículas atomizadas. O composto homogêneo e de granulometria controlada obtida deste processo de secagem encontra-se neste momento em uma forma de pó adequada para a prensagem imediata [2].

A umidade remanescente é crítica para a etapa de prensagem, sendo desejada uma faixa máxima compreendida na ordem de 0,1 a 0,5% [3].

A mistura resultante do processo anterior é então prensada em seções cilíndricas que dependem, dentre outras coisas, do nível de tensão e da faixa da corrente de descarga do varistor produzido. A densidade típica do elemento prensado é da ordem de 2,8 g/cm³. No entanto, esta densidade depende muito da umidade presente na mistura do pó. Altos níveis de umidade resultam em maior densidade, criando problemas na prensagem [2].

O estágio de sinterização é a etapa do processo de fabricação dos varistores que provoca as maiores variações nas suas propriedades elétricas e dielétricas. A sinterização é uma fase do processo na qual o bloco prensado é transformado em um elemento de material cerâmico denso [2].

O processo de sinterização consiste no aquecimento do elemento em etapas, desde a temperatura ambiente até a temperatura de sinterização desejada, mantendo-se esta temperatura constante por um determinado período de tempo e resfriando-se em seguida. Um exemplo do processo é apresentado a seguir; inicialmente, a temperatura é aumentada em degraus bem definidos, na razão de aproximadamente 100°C por hora, até atingir a temperatura de 700°C. De 700°C a 900°C, esta razão é reduzida para aproximadamente 25°C por hora, de modo a evitar possíveis ocorrências de trincas no interior do elemento, devido à compressão que é crítica nesta faixa. Acima de 900°C a razão de aquecimento volta a ser de 100°C por hora, até que a temperatura de sinterização desejada, compreendida entre 1150°C e 1350°C, seja alcançada. Atingida a temperatura de sinterização, esta é mantida constante no forno por um determinado período (entre 1 e 2 horas), quando então o mesmo é resfriado a uma razão de aproximadamente 50°C por hora, até que a temperatura ambiente seja atingida [3].

Durante a última fase da etapa de sinterização o componente cerâmico torna-se sólido e os aditivos reagem por dentro da estrutura, sendo esta etapa responsável pelo estabelecimento das propriedades do varistor [2].

No processo de sinterização de uma composição padronizada para um varistor multicomponente, o Sb_2O_3 reage com ZnO e o Bi_2O_3 a 700°C, formando as fases tipo spinélio e pirocloro, $\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12}$ e $\text{Zn}_2\text{Bi}_3\text{Sb}_3\text{O}_{14}$. Durante a sinterização o $\text{Zn}_2\text{Bi}_3\text{Sb}_3\text{O}_{14}$ forma uma fase líquida rica em Bi_2O_3 e o $\text{Zn}_7\text{Sb}_2\text{O}_{12}$ que precipitam nos contornos dos grãos onde dificultam a transferência de íons. Como resultado o crescimento dos grãos durante a sinterização é suprimido. Nesta condição o líquido preenche os espaços criados pelo pacote de grãos de ZnO . Durante o resfriamento a fase líquida muda para 'β-' ou para uma fase 'α' rica em Bi_2O_3 formando as camadas intergranulares. As bordas de grão tipo 1 serão então observadas nos espaços dos pacotes de grãos do corpo sinterizado. A camada intergranular rica em Bi_2O_3 fica mais fina à medida que se aproxima dos pontos de contato das partículas, tornando-se assim, os contornos dos grãos em tipo 2. Nos pontos de contato, finalmente, pode ser observada a inexistência da camada intergranular, o que caracteriza os contornos de grãos do tipo 3 [3].

O Bi_2O_3 vaporiza facilmente a 1400°C. Até mesmo a 1200°C, uma temperatura de sinterização habitual, o Bi_2O_3 se vaporiza da superfície do dispositivo. Então a quantidade de Bi_2O_3 gradualmente é reduzida na massa durante a sinterização. Além

disso, é notada a precipitação de óxidos de Bi_2O_3 (fase líquida) durante o resfriamento. Este fato ocorre em virtude do Bi_2O_3 (fase líquida) conter vários íons, tais como o Zn, Co, Mn e Sb. Uma grande quantidade de ZnO pode se dissolver no Bi_2O_3 (fase líquida), quando o Sb_2O_3 está presente. Conseqüentemente, ocorre precipitação de ZnO nas bordas dos grãos durante o resfriamento. Como efeito desses dois mecanismos, a quantidade de Bi_2O_3 diminui durante o processo de sinterização, levando consigo o precipitado de ZnO e alguns íons de Bi, Co, Mn e Sb, das bordas dos grãos. A absorção pelos grãos de ZnO do Bi_2O_3 (fase líquida) não é muito boa; então, quando a quantidade de Bi_2O_3 é diminuída, os grãos de ZnO não são cercados completamente pelo Bi_2O_3 (fase líquida). Contudo, a velocidade de difusão no contorno do grão é normalmente maior que no conjunto, algo da ordem de uma ou duas ordens de magnitude. Como resultado, íons de Bi, Co, Mn, e Sb são difundidos nos contornos de grãos com facilidade [3].

Com a sinterização ocorre uma redução no volume do elemento de cerca de 50% (20% de redução na dimensão). Esta redução é resultado basicamente da densificação. A densidade das amostras sinterizadas é tipicamente da ordem de 5,4 a 5,5 g/cm^3 e a perda de peso é normalmente da ordem de 1 a 3% [6].

Um aumento no tempo e na temperatura de sinterização acarreta numa redução na tensão de referência por unidade de espessura e na tensão para a região de baixas correntes. Isto resulta do crescimento dos grãos de ZnO, da alteração de sua resistividade e do desaparecimento da camada intergranular rica em bismuto, causada pela evaporação do Bi_2O_3 [6].

Na etapa de acabamento são aplicados os contatos elétricos sobre as superfícies circulares do varistor e a camada isolante cilíndrica lateral. A técnica geralmente utilizada para aplicação dos contatos sobre as amostras sinterizadas consiste em depositar a quente uma camada metálica pelo processo de jateamento. Antes da metalização, as amostras sinterizadas passam pela etapa de polimento, de forma a remover possíveis superfícies defeituosas, obtendo-se o paralelismo entre as faces e removendo-se a oxidação que pode ocorrer nas superfícies das amostras durante o estágio de sinterização [2].

A maioria dos varistores produzidos em escala industrial utiliza o alumínio sobre as superfícies circulares das extremidades para prover a metalização. Em casos especiais, pode ser usada prata em vez do alumínio. No entanto, a prata apresenta

dois problemas práticos fundamentais para a sua utilização em varistores: o primeiro é o seu maior custo em relação ao do alumínio e o segundo fato resulta da prata se oxidar com o tempo, podendo comprometer o funcionamento dos varistores [2].

A etapa de metalização dos varistores tem a finalidade de produzir uma densidade de corrente uniforme por toda a superfície, sendo, portanto, fundamental para o bom desempenho dos varistores durante a ocorrência de surtos de corrente elevados [2].

A camada isolante aplicada na superfície cilíndrica lateral tem por objetivo evitar ocorrências de descarga externa superficial ou “flashover”, durante a passagem de surtos de corrente elevada [2].

Quando produzido em escala industrial, após o processo de fabricação dos varistores de ZnO, as suas características básicas de proteção e de operação são obtidas através de ensaios elétricos, entre os quais pode-se citar os de tensão de referência e de tensão residual a corrente de descarga nominal, a partir dos quais os diversos varistores produzidos são classificados dentro de faixas, de acordo com os critérios estabelecidos pelos fabricantes. Alguns fabricantes adotam, em adição aos ensaios descritos, os ensaios de verificação da corrente CC para a máxima tensão contínua de operação e o ensaio de corrente de impulso retangular (ou descarga de linhas de transmissão, dependendo do tipo do varistor) como ensaios para controle da produção [2].

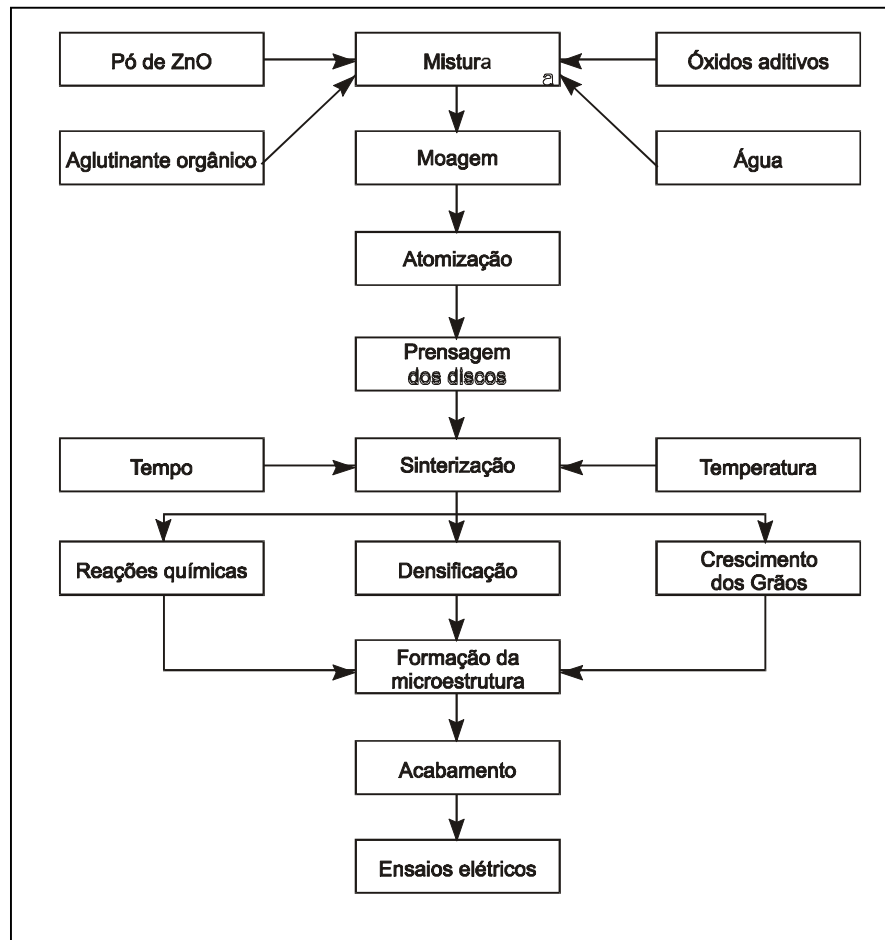


Figura 6 – Fluxograma das etapas de processamento de um varistor [2].

Em virtude da grande quantidade de aditivos possíveis, várias formulações foram propostas, entre elas, uma que é bastante utilizada pelos fabricantes de varistores, é a descrita por Matsuoka [9], como já mostrado na Tabela 1. Ainda segundo Matsuoka [9], os vários tipos de aditivos, podem ser agrupados em três classes de acordo com as funções que possuem, como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 – Funções dos aditivos sobre as propriedades dos varistores de ZnO.

Aditivos	Funções
Bi_2O_3 , Pr_2O_3 , BaO , SrO , ...	Formação da estrutura básica
CoO , MnO , Al_2O_3 , ...	Propriedades não ôhmicas
Sb_2O_3 , Cr_2O_3 , B_2O_3 , NiO , CaO , MgO , ...	Estabilidade

Fonte: [7].

2.4.4. Microestrutura do varistor de ZnO

Pode-se definir microestrutura como “o número e identidade de fases, incluindo porosidade, as quantidades relativas dessas fases em conjunto com as estruturas de defeitos existentes num material” [11]. A microestrutura é o resultado de fabricação do material considerado, através dela as propriedades físicas e químicas irão se revelar.

O ZnO apresenta uma estrutura cristalina hexagonal do tipo wurtzita, que não possui um grau de empacotamento muito elevado; compreendendo os íons de oxigênio (O^{2-}) e zinco (Zn^{2+}) tetraedricamente coordenados, conforme mostrado na Figura 7. Os seus tetraedros se arranjam na estrutura hexagonal deixando aproximadamente 66% do volume do reticulado cristalino vazio (a metade dos interstícios tetraédricos e todos os interstícios octaédricos estão vazios na estrutura do ZnO) [5]. A Tabela 4 resume as principais propriedades do ZnO.

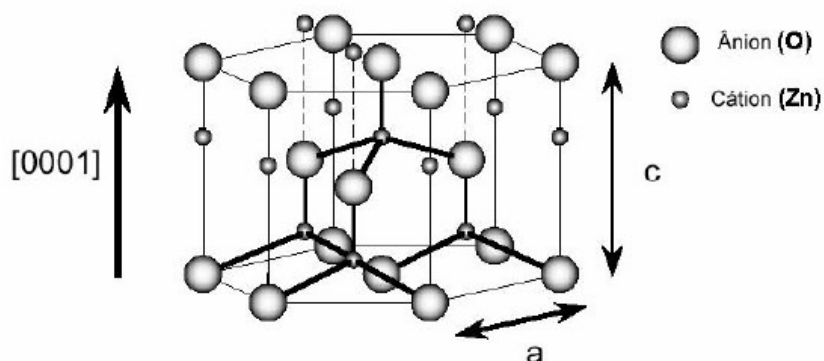


Figura 7 – Estrutura do ZnO, mostrando os ânions (O^{2-}) e os cátions (Zn^{2+}); evidenciando ainda, a coordenação tetraédrica entre estes íons e o espaço vazio do reticulado cristalino [5].

Devido a grande diferença entre os tamanhos dos íons Zn^{2+} e O^{2-} , os cristais de ZnO apresentam espaços abertos relativamente grandes. Estes espaços vazios desempenham um papel importante em muitas propriedades físico-químicas do ZnO; em especial estes espaços comportam diversos tipos de átomos em solução sólida e ainda propiciam a difusão de espécies pelos interstícios da rede cristalina.

Embora as ligações químicas entre os átomos de zinco e de oxigênio apresentem um caráter iônico predominante (segundo o critério de Pauling, a ligação Zn-O é de 56,6% iônica), o seu caráter covalente parcial não pode ser negligenciado (45,4%), pois é significativo, e fundamental para explicar a semicondutividade e o comportamento piezoelétrico dos cristais de ZnO [5].

Tabela 4 – Principais Características Físico-Químicas e Cristalográficas do ZnO [5].

Zinco (Zn): [Ar] 4s ² 3d ¹⁰	
Oxigênio (O): [He] 2s ² 2p ⁴	
Peso molecular (ZnO): 81,376	
Temperatura de fusão: 1975±25°C	
Densidade teórica (média): 5,61 g/cm ³	
Módulo de Young: 124 GPa	
Dureza Vickers: 2,3±1,0 GPa	
Intervalo de banda proibida: 3,2 eV	
Índice de refração: 2,004	
Sistema Cristalino: Hexagonal	
Grupo espacial: P6 ₃ mc	
Parâmetro da rede cristalina	a = 3,250 Å
	c = 5,206 Å

Historicamente, o entendimento do processo de formação da microestrutura dos varistores cerâmicos de ZnO ocorreu de forma gradual. Matsuoka realizou um dos primeiros estudos abordando a microestrutura dos varistores, e a partir de estudos microscópicos verificou que os varistores cerâmicos de ZnO apresentavam uma microestrutura na qual cada grão de ZnO possuía um tamanho médio de aproximadamente 10 µm e uma resistividade elétrica ρ_G compreendida entre 1 a 10 Ω .cm. Estes grãos eram circundados pela camada intergranular de espessura t , de aproximadamente 1 µm e com uma alta resistividade elétrica ρ_L , formada pela composição dos óxidos de zinco e seus aditivos. Com base nestes estudos Matsuoka apresentou um modelo idealizado para a microestrutura do varistor. Este modelo serviu de base para vários estudos iniciais relativos às propriedades físicas, elétricas e dielétricas. Este modelo consiste de cubos apresentando grãos de ZnO de comprimento “d” e separados uns dos outros por uma camada intergranular apresentando uma espessura t . Uma representação esquemática para a

microestrutura e para o modelo idealizados por Matsuoka é apresentada nas Figuras 8 e 9, respectivamente [2, 5, 6].

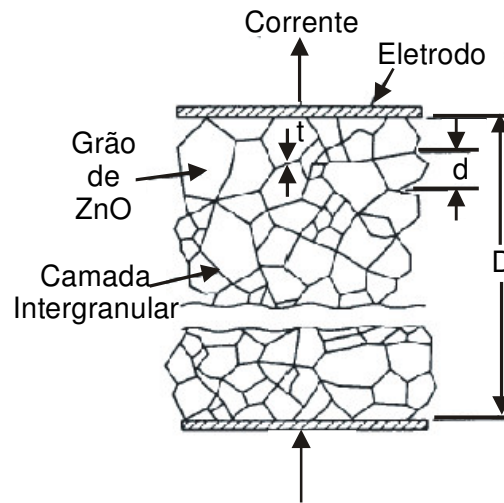


Figura 8 - Representação esquemática da microestrutura dos varistores [1].

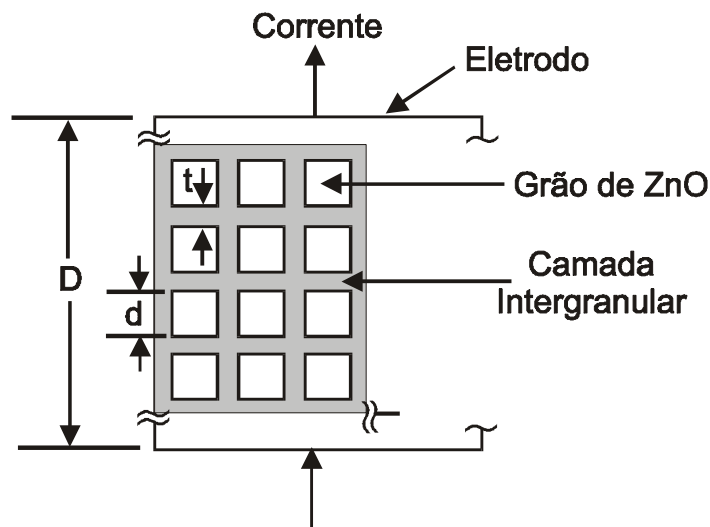


Figura 9 - Modelo idealizado por Matsuoka [1].

A maioria das formulações descritas na literatura e utilizadas comercialmente possui como aditivo formador da microestrutura básica o Bi_2O_3 (varistores convencionais). Este aditivo é caracterizado por proporcionar sinterização em presença de fase líquida, que resulta na formação da camada intergranular [5].

Pode-se dividir os métodos de preparação dos pós-cerâmicos precursores em duas classes:

1. O método cerâmico convencional - mistura de óxido e reação em estado sólido a elevadas temperaturas, que tem como vantagens o custo e a simplicidade, contudo, o elevado tempo de moagem pode introduzir impurezas resultantes do desgaste do revestimento e dos corpos moedores dos moinhos.
2. Os métodos químicos – que promovem uma melhor dispersão dos aditivos, resultando numa homogeneidade composicional, um alto grau de pureza e um bom controle da distribuição de tamanho dos pós obtidos. Além disso, o processo de sinterização da peça cerâmica pode ser realizado em menores temperaturas e menores tempos, minimizando o crescimento de grão, e levando à formação de uma microestrutura policristalina refinada, homogênea e densa, que dá origem a varistores com melhores características elétricas [5].

Embora os métodos de síntese química tenham conquistado espaço no processo de fabricação de varistores, a maioria dos fabricantes ainda utiliza o método cerâmico tradicional a partir de pós comerciais na produção de varistores a base de ZnO. Talvez devido aos conhecimentos de processos já adquiridos com essas práticas, ou por apresentarem menores custos.

Depois das formulações iniciais de Matsuoka, a maioria de varistores baseados no sistema ZnO-Bi₂O₃, são produzidos por sinterização em presença de fase líquida da mistura homogeneizada dos pós de ZnO, Bi₂O₃ e outros aditivos. Embora a microestrutura dos varistores exiba uma variação considerável de um fabricante para outro, todos exibem as características de um cerâmico típico preparado pela sinterização da fase líquida, neste caso consistindo em grãos grandes de ZnO com uma segunda fase rica em bismuto nas junções triplas. Além disso, a microestrutura contém partículas de um ou mais tipos de espinélio. Dependendo da composição, os gêmeos dentro dos grãos de ZnO e um pouco de uma fase do pirocloro podem também dar forma. Estas características principais são representadas na micrografia ótica da Figura 10 [5, 12].

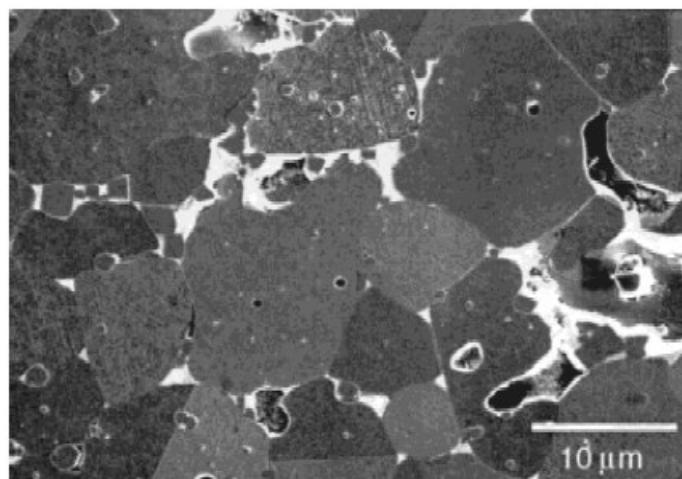


Figura 10 – Micrografia de um varistor de ZnO. As regiões brancas são a fase rica em bismuto formada pela solidificação do resto da fase líquida e é localizada ao longo das junções de três e de quatro grãos. As partículas espinélio, de pequenos grãos aproximadamente eqüiaxiais, são localizados no interior de muitos grãos de ZnO e em diversos contornos de grão. A grande variedade de tamanhos de grão e as variações no comprimento dos lados dos grãos individuais aparentes neste micrograma são típicas de muitos varistores [12].

Quatro estágios principais podem se distinguir associados com a fabricação de um varistor cerâmico, que é a etapa principal. No primeiro estágio há a formação da fase líquida durante o aquecimento dos pós. Isto é associado tipicamente com a formação dos eutéticos de baixo ponto de fusão entre $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3$, e $\text{ZnO-Sb}_2\text{O}_3$. (o eutético no sistema $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3$ é em 735°C). Dependendo do tempo, a temperatura e a composição química, fases secundárias, tais como, o pirocloro e espinélio, podem também ser formadas neste estágio, mas o processo principal é a dissolução dos dopantes no interior da fase líquida. A difusão dos dopantes no interior dos grãos de ZnO, proporcionando uma distribuição uniforme do dopante pela microestrutura do material, prosseguindo no segundo estágio à densificação da fase líquida. Simultaneamente ocorre o crescimento do grão do ZnO. A temperatura e o tempo de sinterização são escolhidos para que otimize a uniformidade composicional, a densificação e o tamanho de grão. No terceiro estágio, durante o resfriamento às temperaturas intermediárias, ocorrem processos que incluem a cristalização das fases secundárias a partir da fase líquida rica em bismuto e a retração desta fase líquida a partir dos contornos de grão às junções triplas da estrutura. As barreiras de potenciais

são formadas na região de contornos de grão durante o terceiro estágio, mas o desenvolvimento principal das propriedades elétricas ocorre no quarto estágio, resfriamento lento a partir das temperaturas intermediárias (450°-700°C) ou sob recozimento subsequente. Este tratamento de calor é uma característica chave da produção dos varistores, especialmente para aplicações na alta tensão [5, 12].

As modificações microestruturais mais pronunciadas ocorrem durante o terceiro estágio, resfriamento a partir da temperatura de sinterização. Essas modificações estão diretamente relacionadas com o comportamento do molhamento da fase rica em bismuto sobre os grãos de ZnO. Embora a forma da fase rica em bismuto na tripla junção seja típica de um varistor otimizado, sua morfologia depende de como o material do varistor é processado. Se o material é esfriado rapidamente a partir da temperatura do eutético, a fase rica em bismuto reveste as faces dos grãos de ZnO, e não resulta em um comportamento do varistor apreciável. Se o material é esfriado lentamente, como é a prática industrial, a fase líquida sofre retração das junções grão-grão e é localizada preferencialmente nas junções da triplo-grão. Na retração a partir da região entre dois grãos, a fase líquida segrega uma camada contendo Bi, e outros íons de raio iônico elevado. Análises por microscopia eletrônica de transmissão, espectroscopia eletrônica Auger, espectroscopia iônica de varredura, e espectroscopia fotoeletrônica indicam que o bismuto (para varistores convencionais) é segregado para os contornos de grãos após o fim do molhamento [Apud 5]. Contudo, a forma de segregação e as espécies sob as quais o Bi pode ser encontrado nos contornos de grãos, dependem da composição química e rotas de processamento utilizadas [5, 12].

Desde o início dos estudos sobre varistores, intensos esforços têm sido feitos no sentido de correlacionar o comportamento elétrico dos varistores com suas características microestruturais. Embora muitos aspectos ainda permaneçam obscuros, progressos consideráveis já foram feitos. Primeiramente, e o mais importante, eles confirmaram que o comportamento do varistor está relacionado com os contornos de grãos individuais e que estes exibem, em sua maioria, um tensão de ruptura por contorno de grão de aproximadamente 3-4 eV. Contudo, sabe-se também, que existe considerável variação das características $V \times I$ de um contorno de grão para outro, em termos tensão de ruptura, grau de não-linearidade e da transição entre o comportamento linear (ôhmico) e não-linear (não-ôhmico) ser abrupta ou suave, e da capacitância associada a estas regiões. Estes estudos conduziram a concepção de que os varistores estão longe de apresentarem características uniformes, mas sim,

que eles são melhor compreendidos como uma rede de resistores, em série e em paralelo; sendo que alguns autores têm considerado que num varistor existem contornos de grãos que apresentam boas características varistoras, e outros que simplesmente não as possuem [5, 12].

Têm-se ainda considerado que os dopantes afetam o crescimento de grão durante a sinterização, as características de molhamento e retração da fase líquida durante o resfriamento, e os tipos e estados de defeitos químicos pontuais presentes na região de contorno de grão, e que controlam, em última instância, o comportamento elétrico do varistor. Sabe-se que existe a necessidade de dois grupos básicos de dopantes, um para controlar a condutividade (ou resistividade) dos grãos de ZnO e outro que influi sobre a distribuição de densidades de cargas elétricas nos contornos de grãos. A situação é complicada, pois as próprias propriedades elétricas intrínsecas ao ZnO puro são sensíveis à presença de defeitos nativos, especialmente vacâncias de oxigênio e espécies de zinco intersticiais, bem como, mínimas concentrações de outros dopantes [5, 12].

2.4.4.1. Contornos de grão na microestrutura do varistor

A região dos contornos de grãos formada pelas diversas fases ricas em Bi_2O_3 é responsável pelas propriedades não lineares dos varistores e possui uma característica tal que a sua resistividade específica decresce com o aumento da tensão aplicada. Este decréscimo é mais acentuado à medida que a tensão aplicada se aproxima da tensão de referência (V_{ref}) do varistor. Diversas investigações foram realizadas com relação à formação destas fases, que podem se localizar em diferentes regiões da microestrutura, podendo formar uma fase intergranular contínua, segregar ou absorver nos contornos dos grãos ou ainda se concentrar nas junções de múltiplos grãos. A Figura 11 representa esquematicamente a localização da fase rica em Bi_2O_3 , na região intergranular e na região entre os grãos [2].

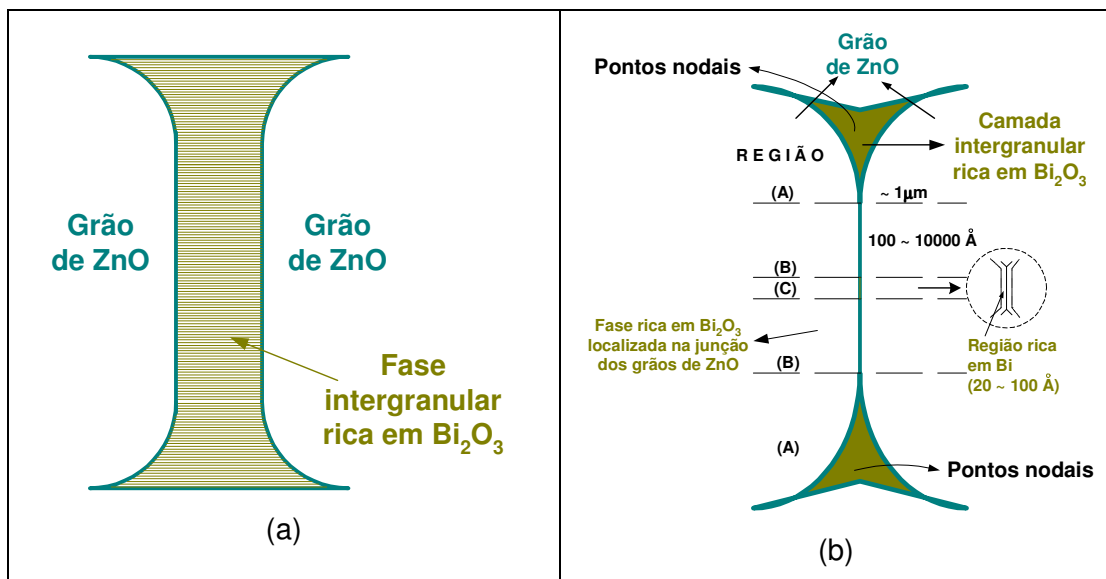


Figura 11 - Localização da fase rica em Bi_2O_3 :

- (a) - apresentando uma camada intergranular contínua;
- (b) - apresentando uma camada intergranular formando uma espessura diferenciada e pontos nodais [2].

Sabe-se atualmente que a maioria dos grãos de ZnO não apresenta uma fase intergranular contínua rica em Bi_2O_3 . Desta forma, as camadas intergranulares formadas a partir do Bi_2O_3 e localizadas nas fronteiras dos grãos apresentam uma espessura variável. A partir de estudos realizados por outros pesquisadores, dividiu a estrutura desta fase em três regiões distintas. A primeira é uma região do contorno de grão apresentando uma camada intergranular rica em Bi_2O_3 , com uma espessura aproximada de 1 µm. Ao aproximar-se dos pontos de contato, esta camada intergranular rica em Bi_2O_3 torna-se menos espessa, formando a segunda região de contorno de grão. Esta região apresenta uma espessura compreendida entre 100 e 1000 Å. Existe um ponto de contato através do qual nenhuma camada intergranular rica em Bi_2O_3 bem definida pode ser observada. Esta região corresponde à terceira região de contorno de grão, apresentando uma espessura muito fina, de aproximadamente 20 a 100 Å. Nesta região da estrutura foram detectados, na região de interface do contorno de grão, quantidades de bismuto enriquecido, Co e uma quantidade excessiva de íons de oxigênio [Apud 2].

A explicação para a variação encontrada na camada intergranular rica em Bi_2O_3 ao longo da fronteira dos grãos pode ser causada pela energia superficial

(aparente) dos grãos de ZnO e pela distribuição desigual do Bi_2O_3 no corpo prensado. Em alguns lugares, Bi_2O_3 fundido pode se introduzir facilmente ao longo das fronteiras dos grãos. Já em lugares onde o Bi_2O_3 fundido não pode penetrar, pode ocorrer, durante a sinterização, o deslocamento de íons de bismuto para as fronteiras dos grãos [Apud 2].

2.4.5. Propriedades básicas e Características Elétricas

A característica elétrica mais importante dos varistores à base de ZnO é sua relação entre "tensão x corrente", que define as propriedades não-lineares dos varistores. Depois da não-linearidade, a capacidade de absorção de energia, medida em Joules/cm^3 , é a segunda mais importante característica do varistor de ZnO. Outros parâmetros usados para caracterizar um varistor são a tensão de ruptura (E_r), corrente de fuga (I_f), degradação do varistor e resistividade. Um dispositivo desejável ou ideal deve ter alto valor do expoente da não-linearidade, aceitável tensão residual, baixa corrente de fuga, vida longa, boa uniformidade e grande capacidade de absorção/dissipação de energia [6].

No varistor, a energia deve ser uniformemente absorvida ao longo do corpo do dispositivo, fazendo com que o aquecimento resultante seja uniformemente distribuído pelo volume do elemento. As propriedades elétricas são principalmente definidas pelas dimensões físicas do corpo do varistor, que pode ser sinterizado em várias formas, tais quais: discos, fatias e tubos, conforme pode ser observado na Figura 4. A capacidade de absorção de energia é determinada pelo volume do varistor, pela tensão ou campo elétrico a ele aplicado, pela densidade de fluxo de corrente e duração e pela capacidade de densidade de corrente por direção de fluxo [2].

2.4.5.1. Característica V (tensão) x I (corrente) do varistor de ZnO

A propriedade mais importante dos varistores de ZnO é a sua não-linearidade, caracterizada pela curva V x I. Uma curva característica V x I típica é mostrada na Figura 12, que mostra uma ampla faixa de correntes normalmente apresentada em catálogos de varistor para ilustrar três regiões distintas de operação do varistor [1]. A curva V x I dos varistores de ZnO pode ser dividida em três importantes regiões:

- ✓ Região de baixas correntes de operação ou pré-ruptura, também conhecida como região de baixas tensões aplicadas (medida sob aplicação de tensões alternadas e contínuas);
- ✓ Região altamente não-linear de operação, também conhecida como região altamente não-linear de tensões intermediárias (medida por impulsos de corrente representando surtos atmosféricos e de manobra);
- ✓ Região superior de operação ou região de retorno, também conhecida como região de “Upturn” da tensão (medida por corrente 8/20 μ s ou 4/10 μ s).

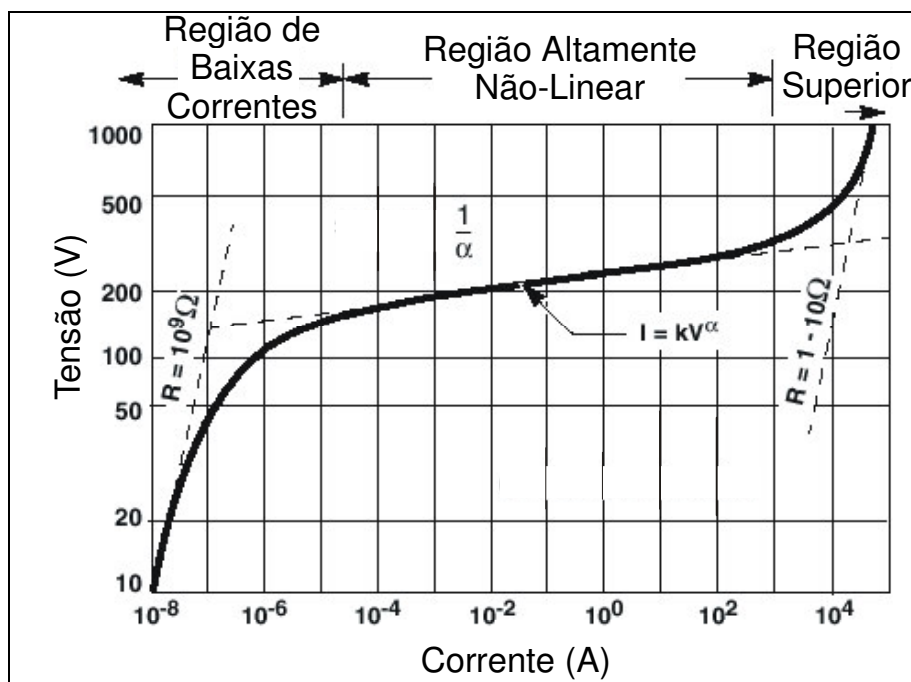


Figura 12 - Curva V x I característica típica de um varistor.

2.4.5.1.1. Região de baixas correntes de operação

A característica V x I é ôhmica (linear) nesta região conhecida como Região de Pré-ruptura (ou Região de Fuga), correspondendo a atuação do varistor na ausência de sobretensões, estando então submetido à tensão normal de operação do sistema considerado, que é equivalente a máxima tensão contínua de operação do varistor (V_{co}). O dispositivo atua essencialmente como um resistor e através dele passa apenas uma corrente de fuga (I_f) que aumenta com a temperatura e, quanto maior é esta corrente, pior o desempenho elétrico do varistor [5].

Inicialmente, para baixas tensões aplicadas até aproximadamente a sua tensão contínua de operação (V_{co}), a característica $V \times I$ dos varistores é caracterizada por um comportamento aproximadamente linear, tornando-se bastante íngreme nas proximidades da sua tensão de referência (V_{ref}). Nesta região as propriedades elétricas principais são determinadas pela capacitância, pela temperatura e pelas perdas CA e CC na região dos contornos de grãos [2].

Verifica-se nesta região que, quando da aplicação de uma tensão alternada de frequência industrial, circula pelos varistores uma corrente de fuga que apresenta componente resistiva e capacitiva, sendo esta última predominante para amplitudes de tensão até próximas da tensão de referência. A componente resistiva é a responsável pelas perdas Joule através dos varistores e, portanto, deve ser controlada, visto ser este um parâmetro importante para a estabilidade térmica dos varistores. De uma forma geral, os varistores comerciais apresentam nas proximidades da tensão contínua de operação, valores baixos para a corrente resistiva, sendo a sua amplitude da ordem de 10 a 40% da amplitude da corrente total [2].

Dentre os aspectos mais importantes para o entendimento das propriedades dos varistores nesta região, podem ser destacados [2]:

- ✓ Grande dependência da corrente resistiva com a temperatura: a corrente resistiva quando da aplicação de tensão contínua ou alternada de frequência industrial apresentam grande dependência com a temperatura, sendo esta dependência mais crítica para solicitações de tensão contínua. A dependência da corrente em relação à temperatura indica que nesta região, o transporte de corrente no limite dos grãos de ZnO se dá pelo processo de ativação térmica.
- ✓ Um dos primeiros estudos conhecidos apresentando uma análise da resistividade elétrica dos varistores com a temperatura foi apresentado por Matsuoka. Neste estudo, foi evidenciada uma redução na resistividade elétrica na região de baixas correntes com o aumento da temperatura. Complementarmente, foi verificado que o valor do coeficiente de não-linearidade α diminui com o aumento da temperatura.
- ✓ Para baixas tensões aplicadas, a corrente e a potência aumentam significativamente com o aumento da frequência. Para tensões próximas da tensão nominal do varistor, observa-se um menor aumento destes parâmetros com a frequência, enquanto que para tensões acima da nominal, observa-se o

processo inverso, ou seja, a corrente e a potência diminuem com o aumento da frequência.

- ✓ Predominância da componente capacitiva da corrente de fuga para níveis de tensão até próximos à tensão de referência dos varistores, com uma pequena dependência da temperatura, quando da aplicação de tensão alternada de frequência industrial. Esta componente capacitiva da corrente é maior em relação a componente resistiva para menores intensidades de campo elétrico e para menores temperaturas sobre o varistor.

2.4.5.1.2. Região altamente não-linear de operação

A região não-linear de densidade de corrente intermediária corresponde à essência da ação do varistor, sendo também conhecida como Região de Ruptura. Apresenta como característica marcante o fato de que o dispositivo conduz, de modo crescente, grande quantidade de corrente elétrica para um pequeno incremento de tensão. De fato, é esta elevada não-linearidade sob uma faixa de corrente tão ampla que faz dos varistores a base de ZnO claramente diferentes de qualquer outro tipo de resistor não-linear, tornando-os aptos para uma grande variedade de aplicações [4].

Esta região é caracterizada por ser um comportamento intermediário de não-linearidade, ou seja, se encontra numa região entre a tensão de corte e a tensão que acarrete numa corrente da ordem de 10^2 a 10^3 A/cm². Esta região não-linear de correntes intermediárias, é a característica mais importante de um varistor de ZnO. A região de não-linearidade pode se estender numa faixa de seis a sete ordens de magnitude de corrente. A característica $V \times I$ nesta região é quase independente de temperatura [2].

A partir da tensão de referência do varistor observa-se sobre uma larga faixa de densidade de corrente, a segunda região da curva característica $V \times I$, caracterizada por uma propriedade de condução altamente não-linear. Esta região define o nível de proteção dos pára-raios, quando correntes de impulso atmosférico ou de manobra fluem pelo mesmo. Quanto maior o valor de α , melhores serão as características de proteção [2].

Para o correto funcionamento dos varistores de ZnO nesta região, é importante que todos os caminhos de corrente apresentem um mesmo número de barreiras, pois caso contrário, a queda de tensão de um caminho para o outro pode ser diferente, acarretando em uma distribuição não uniforme de corrente. A presença de qualquer heterogeneidade do material provoca uma distribuição não-uniforme de corrente e, como conseqüência, um aquecimento localizado que pode conduzir a perfuração ou a trinca do elemento varistor, quando da ocorrência de surtos [2].

Nesta região, a característica $V \times I$ é representada aproximadamente da seguinte forma:

$$V = k_1 \cdot I^{1/\alpha} \quad (1)$$

onde:

V é a tensão aplicada sobre o varistor,

I é a corrente que circula pelo varistor,

k_1 é uma constante característica do varistor e

α é o coeficiente de não-linearidade relacionado à tensão ou também chamado de coeficiente não-ôhmico.

O coeficiente de não-linearidade α é o parâmetro mais importante do varistor de ZnO, pois é o parâmetro relacionado à rampa da curva $V \times I$ na região de não-linearidade, e é definido por:

$$\alpha = \frac{dI/I}{dV/V} = \frac{d(\log I)}{d(\log V)} = \frac{\log I_2 - \log I_1}{\log V_2 - \log V_1} \quad (2)$$

Quanto maior o valor de α , melhor é o dispositivo. O valor de α tendendo a infinito indicaria o varistor perfeito. É importante observar que as faixas de corrente devem ser claramente declaradas, considerando-se os respectivos valores de α , para que seja definida a qualidade do varistor. Normalmente α é citado para correntes entre 0,1 e 100 mA. Para aplicações na região de altas correntes, por exemplo, 1 kA, a escolha dos valores de α , baseada em literaturas, deve ser efetuada com cuidado. Além desta consideração, é importante observar que o valor de α é afetado pela temperatura e pela pressão a qual o dispositivo é submetido durante a operação. Com

o aumento da temperatura e da pressão o valor de α diminui, acarretando a necessidade de controle do ambiente externo durante a operação do dispositivo [2].

Nesta região, os aspectos de interesse a serem destacados são os seguintes:

- ✓ A tensão no varistor permanece constante para uma grande variação na corrente;
- ✓ Um elevado coeficiente de não-linearidade é verificado na característica $V \times I$ (α normalmente compreendido entre 20 e 50);
- ✓ A corrente que circula pelos varistores de ZnO tem nesta região uma característica predominantemente resistiva;
- ✓ Dependência não significativa da corrente com a temperatura.

2.4.5.1.3. Região superior de operação

Na região de alta densidade de corrente (em geral, $J > 10^3 \text{ A/cm}^2$), também conhecida como Região de Retorno, a característica $V \times I$ é novamente linear, similar aquela da região de pré-ruptura, mas com a tensão aumentando mais rapidamente com a corrente do que com a região não-linear. As características elétricas dessa região são controladas pela impedância dos grãos de ZnO da microestrutura do varistor [5].

A característica $V \times I$ dos varistores na região superior de operação ou de altas correntes apresenta uma elevação drástica “upturn” da tensão. Verifica-se que até uma certa faixa de corrente a variação da tensão com a variação da corrente se apresenta de forma proporcional. No entanto, este comportamento deixa de ser observado à medida que se aumenta a corrente. Esta variação se deve a uma queda de tensão não desprezível através dos grãos de ZnO, devido a circulação de correntes elevadas. Este fenômeno não é uma propriedade do mecanismo de condução, mas sim associado a queda de tensão através da resistência própria finita dos grãos de ZnO. Nesta condição, ocorre a predominância da resistência dos grãos de ZnO sobre a camada intergranular. O comportamento ôhmico é definido pela resistividade intrínseca dos grãos de ZnO ($\rho = 1 \text{ a } 10 \text{ } \Omega \cdot \text{cm}$) [2].

O coeficiente de não-linearidade desta terceira região é menor quando comparado ao da região altamente não-linear. Este fato se deve a queda de tensão

nos grãos de ZnO. No limite da região de altas correntes, a queda de tensão através da camada intergranular torna-se desprezível, com o varistor apresentando um comportamento ôhmico [2].

Dois fenômenos importantes merecem atenção nas propriedades dos varistores na região de médias e altas correntes: a dependência da amplitude da tensão residual com o tempo de frente do impulso de corrente e a pequena dependência da temperatura [4].

Resumidamente, nesta região pode-se estabelecer que: a curva $V \times I$ se encontra numa região de alta amplitude de corrente; a resistência do varistor está abaixo de 10Ω , sendo semelhante a um curto-circuito; estes valores de resistência são observados para correntes da ordem de 50 a 50.000 A, dependendo das dimensões do varistor [8].

Para caracterizar adequadamente um varistor a base de ZnO é desejável a determinação da curva $V \times I$ para as três regiões anteriormente consideradas. Contudo, em virtude da ampla faixa de corrente elétrica envolvida, não é possível o uso das mesmas técnicas de medição para as três regiões. Usualmente as características $V \times I$ abaixo de 100 mA/cm^2 são obtidas em sistemas de corrente contínua (CC) ou em sistemas de corrente alternada com frequência de 60 Hz [4]. Para as correntes acima de 1 A/cm^2 a característica $V \times I$ são determinada usando-se as forma de onda de impulso de corrente normalizados:

- Impulso de corrente íngreme: Impulso de corrente, com tempo de frente de $1 \mu\text{s}$, medido a partir da origem virtual, conforme definido na norma NBR 6936 [13], com limites no ajuste do equipamento tais que os valores medidos situam-se entre $0,9 \mu\text{s}$ e $1,1 \mu\text{s}$. O tempo até o meio valor, medido a partir da origem virtual, não deve ser maior que $20 \mu\text{s}$ [14];
- Impulso de corrente de descarga atmosférica: Impulso de corrente, com forma $8/20 \mu\text{s}$, com limites no ajuste do equipamento tais que os valores de tempo, medidos a partir da origem virtual, estejam entre $7 \mu\text{s}$ e $9 \mu\text{s}$ para o tempo de frente e entre $18 \mu\text{s}$ e $22 \mu\text{s}$ para o tempo até o meio valor [14];
- Impulso de corrente de manobra: Impulso de corrente com um tempo de frente compreendido entre $30 \mu\text{s}$ e $100 \mu\text{s}$ e um tempo até o meio valor de aproximadamente duas vezes o tempo de frente [14];

- Impulso de corrente elevada: Impulso de corrente com forma 4/10 μ s com limites no ajuste do equipamento tais que os valores medidos, a partir da origem virtual, estejam entre 3,5 μ s e 4,5 μ s para o tempo de frente e entre 9 μ s e 11 μ s para o tempo virtual até o meio valor [14].

2.4.5.2. Coeficiente de Não-Linearidade

O parâmetro mais importante de um varistor é o seu coeficiente de não-linearidade (α), o qual é o recíproco da inclinação da curva $I \times V$ (ou da $J \times E$), na região não-linear, sendo dado pela Equação (2).

Quanto maior o valor de α melhor será o varistor. Contudo, a Figura 13 mostra que α também depende da faixa de corrente elétrica considerada. Deste modo, é importante sua determinação com referência explícita a uma faixa de corrente, sobre a qual se visa empregar o varistor.

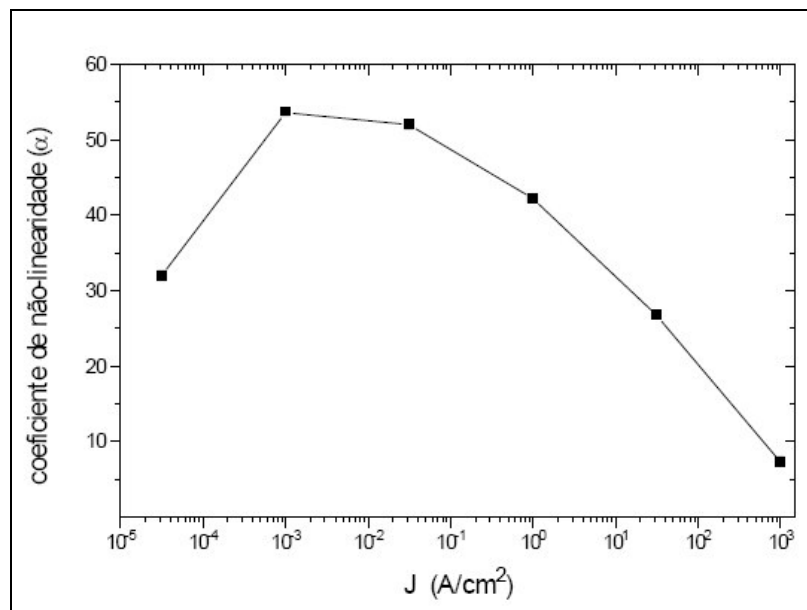


Figura 13 - Dependência do coeficiente não-linear (α) em relação à densidade de corrente elétrica (J) [5].

Na prática o valor de α é estimado entre dois valores de intensidade de corrente e suas respectivas tensões, ou seja, entre dois pontos da curva $V \times I$ da Figura 12, conforme Equação (2), onde V_1 e V_2 são as tensões elétricas associadas às correntes I_1 e I_2 , respectivamente ($I_2 > I_1$). Assim, α pode ser obtido a partir de medições

puramente elétricas, pelo uso da Equação (2). A faixa mais comumente usada na literatura é entre 1 e 10 mA; mas deve ser cuidadosamente escolhida, tendo em vista a aplicação à qual o varistor se destina [5].

O coeficiente não-linear é um parâmetro muito importante para a proteção de equipamentos contra sobretensões. A importância dos varistores a base de ZnO resulta do fato de que eles excedem, em termos do valor de α , a outros tipos de resistores não-lineares. Assim, enquanto um resistor ôhmico tem $\alpha = 1$ (ou, na prática aproximadamente igual à unidade), um retificador de selênio tem $\alpha = 5-8$, os varistores baseados no SiC têm $\alpha = 5-10$, os varistores à base de ZnO apresentam α na faixa de 25 a 100; sendo que para a maioria das aplicações comerciais está na faixa de 25 a 60. Ademais, o valor de α é afetado pelas condições de temperatura e pressão sob as quais o dispositivo está submetido durante o uso. Com o incremento de ambos, pressão e temperatura, o valor de α diminui, indicando a necessidade de adequado controle das condições ambientais sob as quais o varistor é utilizado. Isto é particularmente importante, no caso dos pára-raios, os quais estão, em geral, submetidos a condições mais severas. Neste caso, a questão da umidade (adsorção de água sobre os discos varistores que compõem o pára-raios, caso o invólucro protetor não seja adequado ou apresente falhas) também torna-se decisiva, podendo inclusive levar à destruição do pára-raios [5, 15].

Desde o início das pesquisas de varistores foi notado que o valor de α decresce com o aumento da densidade de corrente. Isto sempre deve ser levado em consideração para aplicações que envolvam descargas com elevadas densidades de corrente, como no caso dos pára-raios utilizados na proteção contra descargas atmosféricas. Uma vez que a extensão de região não-linear é determinada pela impedância diferencial entre os contornos de grãos e os grãos de ZnO, uma forma de aumentar esta extensão (diminuindo a amplitude da região de retorno) é, efetivamente, promover a diminuição da resistividade elétrica dos grãos de ZnO mediante uma dopagem seletiva com elementos doadores, tais como Al, Ga ou In. Contudo, estes elementos também provocam certa redução do valor de α ; sendo, então, necessário um certo grau de compromisso entre o valor de α e a extensão de ação do varistor [5].

2.4.5.3. Capacidade de Absorção de Energia

Os varistores de ZnO são suscetíveis a períodos de condução mais longos e mais freqüentes durante as sobretensões. Como estão permanentemente conectados ao sistema elétrico, estão sempre conduzindo correntes que variam de alguns mA a centenas de A, dependendo da magnitude da sobretensão transitória. A capacidade de absorção de energia tem que ser adequadamente especificada de forma a evitar conseqüências sérias aos equipamentos do sistema elétrico, incluindo os próprios pára-raios de ZnO [13].

Para que os varistores de ZnO apresentem comportamento adequado ao ciclo de serviço, é necessário que o projeto apresente capacidade de dissipar a energia absorvida durante a solicitação de uma determinada sobretensão, estando o mesmo energizado a uma tensão alternada de freqüência industrial, e manter-se termicamente estável nesta condição. Um varistor é considerado termicamente estável se após operar em uma solicitação de sobretensão, responsável pela sua elevação de temperatura, o varistor de ZnO apresentar redução de temperatura ao longo do tempo.

Durante a aplicação de um impulso de corrente, alguma energia será absorvida pelo varistor. A quantidade de energia absorvida varia em função de:

- Amplitude da corrente;
- Tensão relacionada à forma de onda do impulso de corrente;
- Duração do impulso;
- Tempo de subida do impulso; (a energia dissipada durante o tempo entre 100% e 50% da onda do impulso de corrente);
- Não-linearidade dos varistores.

Para calcular a energia absorvida pelo pára-raios durante um impulso é utilizada como referência uma onda normalizada de corrente. Estas formas de onda, prescritas na norma NBR 6936 seção 5.5, podem ter forma exponencial ou forma retangular [16].

A energia que é instantaneamente injetada durante uma simples descarga não pode exceder um valor no qual os varistores de Óxido de Zinco estariam sujeitos a estresse termomecânico. Nesse contexto pode-se falar de dois aspectos. Primeiramente, a capacidade de absorção de energia a um impulso único. A energia injetada em alguns poucos microssegundos resulta em aumento de temperatura associada com esforços de tensão sobre a estrutura cerâmica do material. Isto pode levar a pequenas fissuras ou quebra do resistor. Como não se pode dissipar rapidamente o calor através do material que o reveste, estresse adicional pode ocorrer.

Na forma exponencial o impulso de corrente cresce até o valor de crista em um tempo curto e decresce a zero com uma forma exponencial ou senoidal fortemente amortecida. Este impulso de corrente é definido pelo tempo de frente (T_1) e pelo tempo até meio valor (T_2). A forma aproximadamente retangular é definida pela duração da crista (T_d) e duração total (T_t) do impulso.

Como foi utilizada para os ensaios vamos exemplificar a forma de onda exponencial 8/20 μ s, considerada como corrente de impulso atmosférico, com limites no ajuste do equipamento tais que os valores de tempo, medidos a partir da origem virtual, estejam entre 7 μ s e 9 μ s para o tempo de frente e entre 18 μ s e 22 μ s para o tempo até o meio valor na Figura 14 [16].

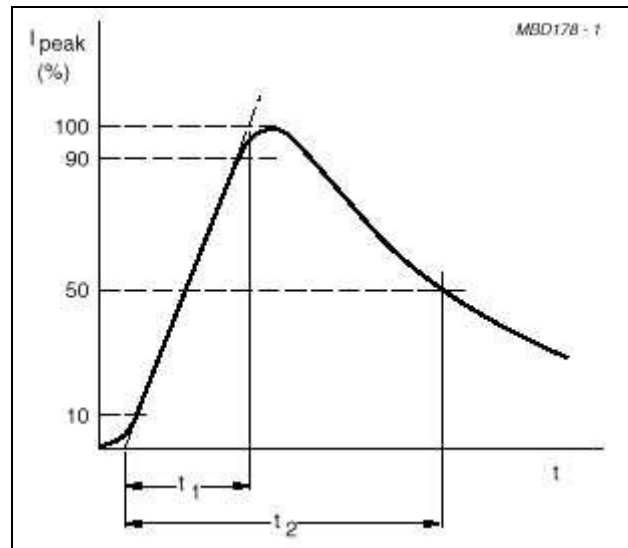


Figura 14 – Impulso de corrente exemplificando a forma de onda exponencial.

A forma de onda retangular, conhecida como corrente suportável de impulso de longa duração, é definida como a duração de crista (T_d) o tempo de duração entre

500 μs , 1000 μs , 2000 μs , ou entre 2000 μs e 3200 μs , é definido como impulso de corrente retangular que cresce rapidamente até um valor máximo, permanece substancialmente constante por um período especificado e decresce rapidamente a zero. Os parâmetros que definem um impulso de corrente retangular são: polaridade, valor de crista, duração virtual de crista e duração virtual total, conforme definido na norma NBR 6939 [16], como mostrado na Figura 15.

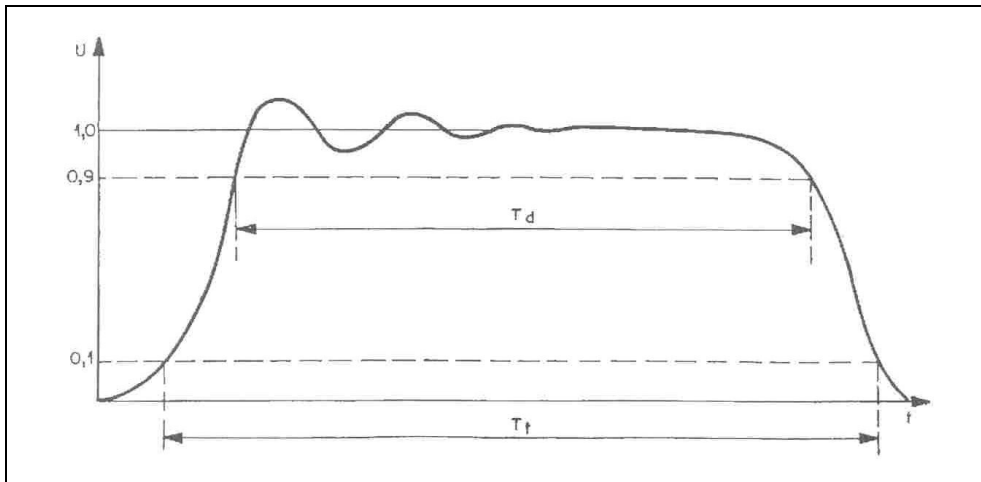


Figura 15 – Impulso de corrente exemplificando a forma de onda retangular.

A energia máxima absorvida não representa a qualidade do varistor, mas pode ser uma valiosa indicação quando são comparadas diferentes séries de varistores que apresentam a mesma tensão nominal [4].

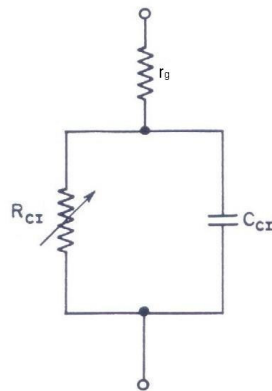
A energia máxima indicada pelos fabricantes é válida considerando-se impulsos com duração padrão entre 10 e 1000 μs . Quando são aplicados aos varistores mais de um impulso, é recomendável solicitar fatores de correção adequados aos fabricantes [4].

Contudo, cientificamente, a energia absorvida por um varistor, para a aplicação de um impulso, pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$E = \int_0^t v(t)i(t)dt \quad (3)$$

2.4.5.4. Tensão de ruptura

Um modelo simples para representar as propriedades elétricas dos varistores, baseado no estudo da microestrutura dos varistores de ZnO desenvolvida por Matsuoka [1] é mostrado na Figura 16 [2]. Com base neste modelo, estudos do mecanismo de condução e do comportamento dos parâmetros elétricos dos varistores de ZnO foram realizados [6].



onde:

r_g - Resistência série representativa dos grãos de ZnO;

R_{Ci} - Resistência não-linear da camada intergranular;

C_{Ci} - Capacitância da camada intergranular.

Figura 16 - Circuito elétrico equivalente representando um varistor de ZnO [6].

Este modelo apresenta um circuito RC paralelo, representando a camada intergranular, responsável pela não-linearidade do varistor. Associado a este circuito, existe uma resistência r_g de pequeno valor, representando o grão de ZnO. Normalmente, r_g pode ser desprezada e R_{Ci} e C_{Ci} variam com a temperatura e frequência [2].

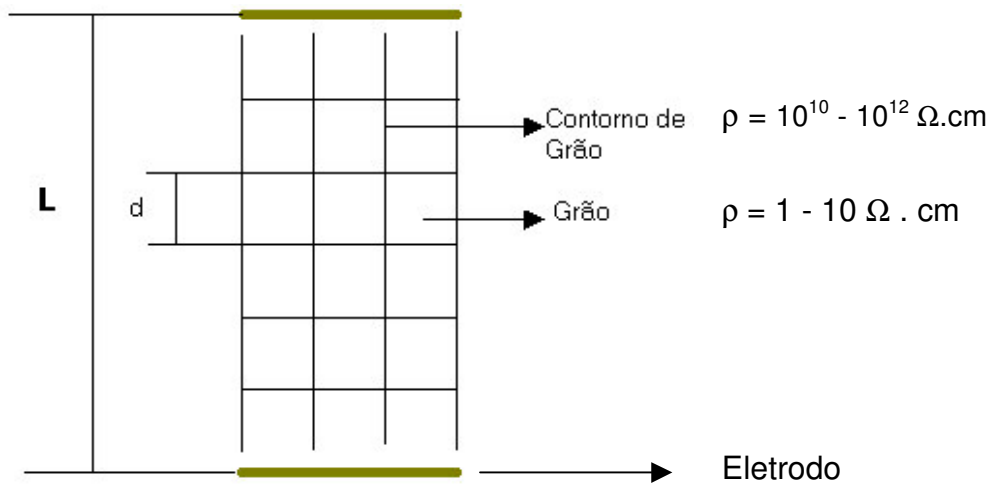
O campo elétrico de ruptura (E_r) é definido pelo número médio (n) de barreiras elétricas (V_b) formadas em série entre os eletrodos do material, ou seja:

$$E_r = n \cdot V_b \quad (4)$$

As barreiras elétricas são formadas nos contornos de grãos do material como mostra a Figura 17. Quando um determinado campo elétrico é aplicado ocorre uma

queda de tensão no sentido grão - contorno de grão e como o número médio de barreiras elétricas é inversamente proporcional ao tamanho médio de grãos, a tensão de ruptura também pode ser definida como;

$$E_r = \frac{L \cdot V_b}{d} \quad (5)$$



Onde:

L é o espaçamento entre os eletrodos;

d é o diâmetro médio dos grãos.

Figura 17 - Modelo idealizado da microestrutura de um varistor [17].

2.4.5.5. Corrente de fuga (I_f)

Os aspectos concernentes à corrente de fuga (I_f) em varistores de ZnO são de fundamental importância para o projeto e operação desses dispositivos, pois estão diretamente relacionados aos problemas de transferência de calor que neles ocorrem, contribuindo fortemente, em última instância, para a determinação da vida útil do varistor [5].

A compreensão do comportamento da corrente de fuga, na região de pré-corte de um varistor de ZnO (região de baixas correntes), é importante por duas razões [4]:

- Determina a perda Joule que é prevista de ser gerada quando um varistor é submetido à tensão de operação.

- Determina a amplitude de tensão de operação que o dispositivo pode ser submetido sem gerar uma quantidade excessiva de calor.

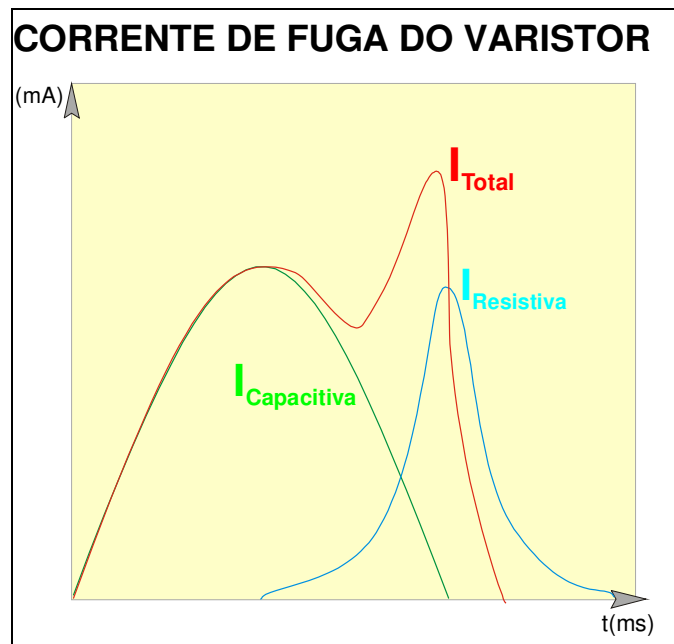


Figura 18 - Corrente de fuga de varistores [4].

Para aplicação do varistor em sistemas CA a corrente de fuga total, I_T , na região de pré-ruptura, é composta de uma componente resistiva, I_R , e uma componente capacitiva, I_C , correspondendo respectivamente, aos aspectos resistivos e capacitivos da região de contorno de grão. A componente resistiva apresenta maior importância, uma vez que é responsável pelas perdas joule que provocam aquecimento no dispositivo. Quando o varistor é submetido a uma sobretensão ou a uma sobretemperatura, I_R aumenta com o tempo. Este fenômeno é acelerado para tensões de operação mais elevadas e para temperaturas de operação elevadas. A vida útil de um varistor de ZnO é principalmente determinada pela amplitude de I_R e a sua evolução com os efeitos provocados pelos parâmetros e solicitações impostas, tais como, composição química do varistor, temperatura de operação, tensão aplicada e o tempo de duração da tensão aplicada [4].

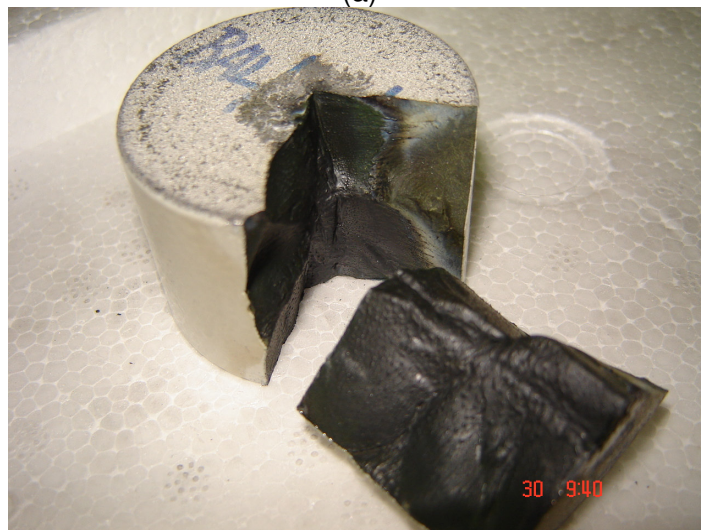
Na maioria das formulações comerciais para varistores de ZnO o valor de I_R é compatível com os mecanismos de dissipação de calor do dispositivo. Quanto à composição química, em geral, dopantes receptores (aceitadores) reduzem a corrente de fuga, ao passo que dopantes doadores conduzem ao aumento de I_T . Os efeitos da

temperatura e tensão sobre I_T , I_C e I_R são parecidos, com I_R crescendo mais rapidamente. O efeito do tempo sobre estas correntes (numa dada tensão) é análogo ao efeito da temperatura. Sob elevadas tensões (numa dada temperatura), I_T , I_C e I_R aumentam com o tempo de aplicação da tensão; contudo, o incremento sobre I_R é bem mais pronunciado, levando ao aumento da temperatura, de tal forma que, após prolongados períodos de operação sob tais condições pode ocorrer um eventual descontrole térmico (avalanche térmica) do dispositivo. A dependência de I_R com o tempo é assim o parâmetro mais significativo na determinação da vida útil do varistor [3, 5].

A Figura 19 (a) e (b) mostra um varistor após o fenômeno da avalanche térmica.



(a)



(b)

Figura 19 – Incremento de tensão sob o varistor, I_R aumentando com o tempo de aplicação da tensão; levando ao aumento da temperatura, ocorrendo um descontrole térmico (avalanche térmica) do dispositivo, levando o varistor a ruptura.

2.4.5.6. Degradação de varistores de ZnO

A degradação dos varistores, em geral, pode ser um processo que conduz a um aumento da dissipação de energia provocando uma elevação excessiva da temperatura e fuga térmica espontânea comprometendo, desta forma, a vida útil do varistor. A maior parte dos estudos de degradação é baseado em testes simulando um envelhecimento acelerado, sob tensões elétricas, em temperaturas variando entre 100 e 200°C. Desta forma podem ser avaliados o aumento da corrente ou dissipação de energia para uma dada tensão em função do tempo através de diferentes técnicas experimentais [5].

O fenômeno da degradação em varistores a base de ZnO tem sido intensivamente estudado, tanto sob aplicação constante de tensão contínua (CC) ou tensão alternada (CA) por um determinado período de tempo, quando sob ação de uma série de impulsos de corrente [5].

Após submeter um varistor a uma tensão constante por um longo período [12], observa-se um aumento significativo da corrente de fuga,

O mecanismo de degradação é um fenômeno relacionado com a região de contornos de grãos de ZnO e isso pode ser observado pela comparação nas características da curva $V \times I$ antes e depois do condicionamento do bloco. Observa-se na Figura 19 que a degradação ou alteração das características elétricas ocorre principalmente na região linear de baixa corrente, ficando a região de alta corrente não afetada pelo estresse aplicado ao bloco. Também podemos notar que a região não-linear nesse caso não apresenta modificações [6].

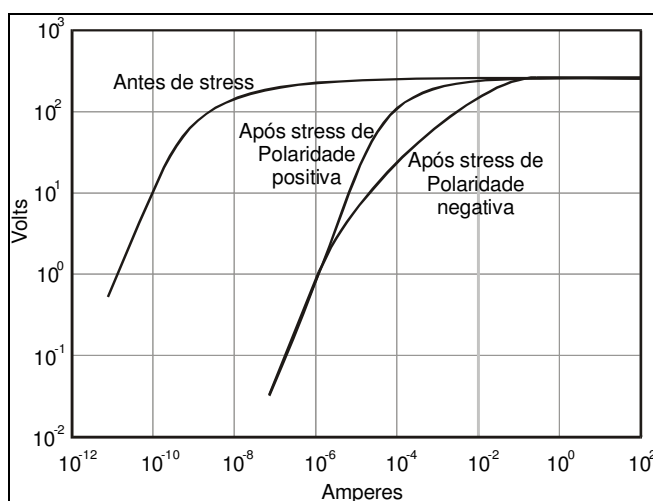


Figura 20 - Exemplo de degradação do varistor, após longo período sob tensão constante [12].

Os mecanismos que têm sido sugeridos para explicar o fenômeno envolvem aprisionadores de elétrons, formação e orientação de dipolos, migração iônica, e dessorção de oxigênio. Embora todos estes fenômenos pareçam ocorrer, a hipótese da migração iônica tem mostrado estar suportada em maiores evidências experimentais [apud 5]. Neste sentido, tem-se que: (1) a degradação é um fenômeno de contorno de grão; (2) ela é conseqüência da migração de íons existentes na camada de depleção; (3) os íons migrantes são, predominantemente, espécies de zinco intersticiais. Uma forte evidência de migração iônica foi primeiramente obtida a partir de medições de corrente termicamente estimulada, em varistores sob à aplicação de tensões elevadas [Apud 5].

Sob o ponto de vista elétrico, o estudo do fenômeno de degradação nos varistores de ZnO têm sido reportado em diversas literaturas através de três diferentes condições [2]:

- ✓ Degradação devido a impulsos de corrente de elevada amplitude ou de correntes de longa duração associados a altas energias.
- ✓ Aumento da potência dissipada quando da solicitação permanente por tensões alternadas ou contínuas após a aplicação de impulsos de corrente de elevada amplitude ou de longa duração.
- ✓ Aumento da potência com o tempo quando continuamente solicitado por tensão alternada ou contínua.

No primeiro caso, a degradação leva a destruição dos varistores e pode ocorrer sob duas formas distintas, pela ruptura dos varistores causada por impulsos de corrente de alta intensidade e curta duração ou pela perfuração causada por impulsos de corrente de menor intensidade, porém de longa duração. A destruição por ruptura é atribuída a gradientes de temperatura gerados por impulsos de corrente de elevada amplitude. Estes gradientes são responsáveis pelas tensões térmicas no varistor devido à expansão térmica diferencial. A destruição dos varistores por perfuração está relacionada com a distribuição não uniforme de densidades de corrente ao longo da seção do varistor. Desta forma, quando da circulação de correntes de impulso haverá uma determinada área com uma maior concentração de corrente, o que provoca uma elevação de temperatura localizada, podendo conduzir a fusão desta área do varistor. Para avaliar a performance dos varistores de ZnO frente a impulsos de alta corrente e impulsos de corrente de longa duração associados a altas energias, é prescrita em diversas normas a realização dos ensaios elétricos de corrente de impulso elevada e impulso de corrente retangular ou de descarga de linhas de transmissão [4].

A degradação devido ao aumento de potência CA ou CC, proveniente de solicitações transitórias está relacionada com o balanço entre a energia gerada pelo varistor devido ao surto e a capacidade do varistor de dissipar esta energia. Este tipo de degradação provoca uma redução gradual na máxima temperatura para a qual o varistor tem capacidade de dissipar as energias provenientes de surtos, ou seja, diminui gradualmente a capacidade de absorção de energia dos varistores a medida que são solicitados. Se a energia absorvida pelos varistores for superior a sua capacidade de dissipação, poderá ocorrer o fenômeno de instabilidade térmica, também chamada de avalanche térmica, conforme mostrado acima (Figura 19). Um aumento de temperatura no varistor, devido ao coeficiente de temperatura negativo para a região de baixas correntes, acarretará em uma maior corrente resistiva CA ou CC, que por sua vez produzirá maiores perdas CA ou CC, que tende a elevar a temperatura do varistor. Desta forma, um processo cíclico poderá ocorrer, até que haja a falha do varistor. O ensaio de ciclo de operação combinado é prescrito nas normas para avaliar o desempenho dos varistores frente a este tipo de solicitação [2].

O terceiro tipo de degradação consiste em um aumento gradual da corrente resistiva com o tempo, e que pode conduzir a instabilidade térmica. A aplicação de tensão CA ou CC continuamente sobre os varistores gera uma certa quantidade de calor devido a perdas por efeito Joule. Uma vez atingida uma determinada quantidade de calor gerada no varistor, um processo de realimentação positiva poderá ocorrer, devido a dependência da corrente com a temperatura, conduzindo o varistor a instabilidade térmica. Estudos têm demonstrado que neste tipo de degradação o aumento temporal da corrente resistiva é proporcional a raiz quadrada do tempo. Os estudos analíticos e experimentais realizados sobre este processo de degradação, descrevem a condição crítica da estabilidade térmica [Apud 2]. Com base nestes estudos a vida útil dos pára-raios tem sido estimada a partir da relação de Arrhenius. Um ensaio baseado na lei de Arrhenius, prescrito nas normas é o ensaio de envelhecimento acelerado. Este ensaio consiste na aplicação da tensão contínua de operação do varistor por um período de 1000 horas, a uma temperatura de ensaio de $115 \pm 3^{\circ}\text{C}$, o que equivale, segundo a teoria de Arrhenius, a uma vida útil de 110 anos a uma temperatura de 40°C [6].

Esse efeito de envelhecimento se deve- as barreiras de Schottky diminuídas, cuja causa principal é a migração de íons nas barreiras dos grãos de ZnO, e de dentro dos grãos para os seus contornos. Contornos mais baixos significam que mais elétrons passarão os contornos de grãos na mesma tensão aplicada, e isso provoca correntes de fuga maiores. O envelhecimento depende muito da temperatura. Os fabricantes esforçam-se para conseguir que a modificação estrutural seja suficientemente lenta

para que a modificação da característica fique dentro de margens aceitáveis. A corrente que flui através do varistor de ZnO nesta tensão é composta pela componente capacitiva e pela componente resistiva. Quando a corrente resistiva flui através do varistor, por um longo período, a estrutura físico-química das camadas intergranulares muda com o tempo, devido ao deslocamento dos íons, provocando uma mudança de energia de ativação. Isso é conhecido como degradação térmica [13].

Apesar dos diferentes tipos de degradação, que genericamente são considerados possíveis de ocorrer em um varistor de ZnO, serem estudados em separado, na prática os seus efeitos se manifestam de forma conjunta [2].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados na pesquisa 14 blocos varistores de ZnO, de tensão nominal de 4,0 kV_{ef} corrente de descarga nominal 10 kA. Foram realizados em todos os 14 aristores os ensaios de levantamento das curvas características V x I e V x C, tensão de referência e tensão residual a impulso atmosférico e corrente de polarização e despolarização antes dos ensaios de degradação dos varistores. Após os ensaios iniciais os varistores foram separados em 3 grupos de 4 varistores para a realização de ensaios de degradação e os outros dois varistores um foi utilizado para as observações metalográficas e outro separado como referência. Para a degradação dos varistores foram realizados os seguintes procedimentos:

- Ensaio de impulso de corrente de longa duração [14, 16, 18, 19];
- ensaio por ciclos de impulso atmosférico [14, 16, 18, 17, 19];
- ensaio de múltiplas descargas [14, 16, 18, 17, 19, 20, 21].

Após os ensaios de degradação e de modo a se verificar se houve alguma alteração no comportamento dos varistores, esses foram novamente submetidos aos ensaios não destrutivos (ensaios de levantamento das curvas características V x I e V x C, tensão residual a impulso de atmosférico, tensão de referência e corrente de polarização e despolarização). Também realizadas observações metalográficas em três varistores, ou seja, um (1) por cada tipo de degradação realizada. Após a realização dos ensaios, as análises comparativas dos resultados dos ensaios de diagnóstico (ensaios não destrutivos antes e após) e das observações metalográficas foram compiladas.

3.1. MATERIAIS

Os varistores utilizados nos ensaios foram os mesmos produzidos em escala industrial pela Indústria Eletromecânica Balestro Ltda, apresentando as seguintes características principais:

- ⇒ Tensão nominal $4,0 \text{ kV}_{\text{ef}}$;
- ⇒ Máxima tensão contínua de operação $3,4 \text{ kV}_{\text{ef}}$;
- ⇒ Corrente de descarga nominal $10,0 \text{ kA}$;
- ⇒ Corrente de referência (I_{ref}) $1,0 \text{ mA}$;
- ⇒ Tensão de referência mínima (I_{refm}) $4,2 \text{ kV}_{\text{ef}}$;
- ⇒ Tensão residual média $12,0 \text{ kV}$;
- ⇒ Classe 1 de descarga de linhas de transmissão.

O diâmetro nominal das amostras ensaiadas é de $42 \pm 1 \text{ mm}$ e a espessura de $28 \pm 1 \text{ mm}$. O peso das amostras é de $215 \pm 15 \text{ g}$. A identificação das amostras durante os ensaios foi realizada utilizando-se a seguinte identificação fabricante/ano/seguida do número seqüencial.

A identificação das amostras durante os ensaios foi definida utilizando-se o seguinte procedimento: Fabricante/ano de fabricação/número seqüencial, exemplo BAL/05/10.

A Figura 21 mostra o desenho do varistor.

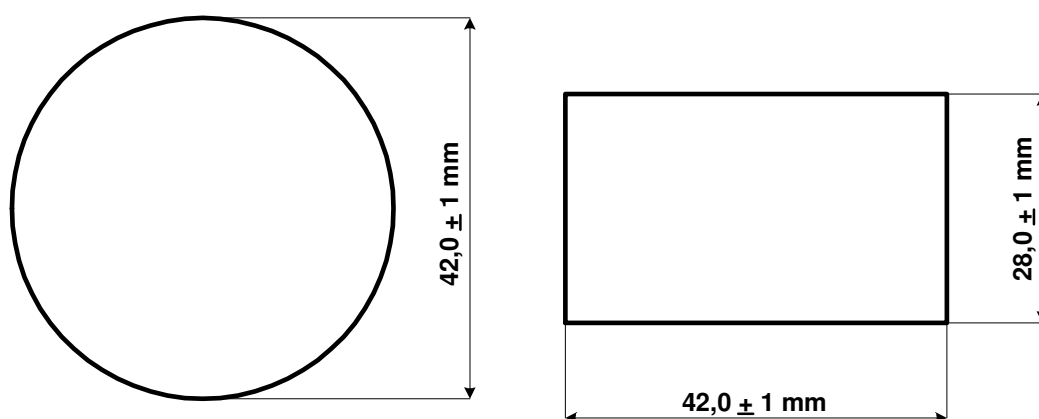


Figura 21 – Desenho dimensional do varistor.

3.2. EQUIPAMENTOS

Abaixo estão listados os principais todos os equipamentos utilizados nos ensaios realizados.

- Regulador de tensão: 0 a 8 kV, Fabricação BRENTFORD;
- Regulador de tensão 0 - 440 V, 100 kVA, 60Hz de fabricação ADELCO;
- Fonte de tensão 230 kV / 0,45 A, 60Hz de fabricação ZILMER;
- Fonte de tensão Fluke modelo 415B, 0-3,1 kV;
- Gerador de impulso de corrente 150 kJ, composto de 80 capacitores de 4,68 μ F com tensão de 30 kV. Estes 80 capacitores estão dispostos em 8 bancos contendo 10 capacitores em cada banco;
- Capacitores e resistores para ajuste da forma de onda de impulso atmosférico;
- Divisores de tensão para medição de tensão dos circuitos de ensaio;
- Transformadores de corrente para medição de corrente dos circuitos de ensaio;
- Osciloscópio TDS 540A; fabricação TEKTRONIX;
- Multímetro FLUKE modelo 45; fabricação: FLUKE;
- Ponte Shering marca TETTEX modelo 2877 para medição de capacitância e do fator de dissipação de calor (tangente δ);
- Eletrometro Keitley modelo 617 para medição de correntes;
- Data logger para armazenamento de dados;
- Estufa Hatco;
- Termômetro digital OMEGA 2168A;
- Data Logger Fluke Hydra Series III;
- Microscópio Eletrônico de Varredura JEOL – modelo JSM646LV equipado com Espectroscopia de Dispersão de Energia - EDS thermo /Noran System SIX modelo 200;
- Difratorômetro de raios-X Panalytical modelo X' Pert Pro.

3.3. PLANEJAMENTO DO TRABALHO

A realização deste trabalho pode ser melhor visualizada no fluxograma da Figura 22.

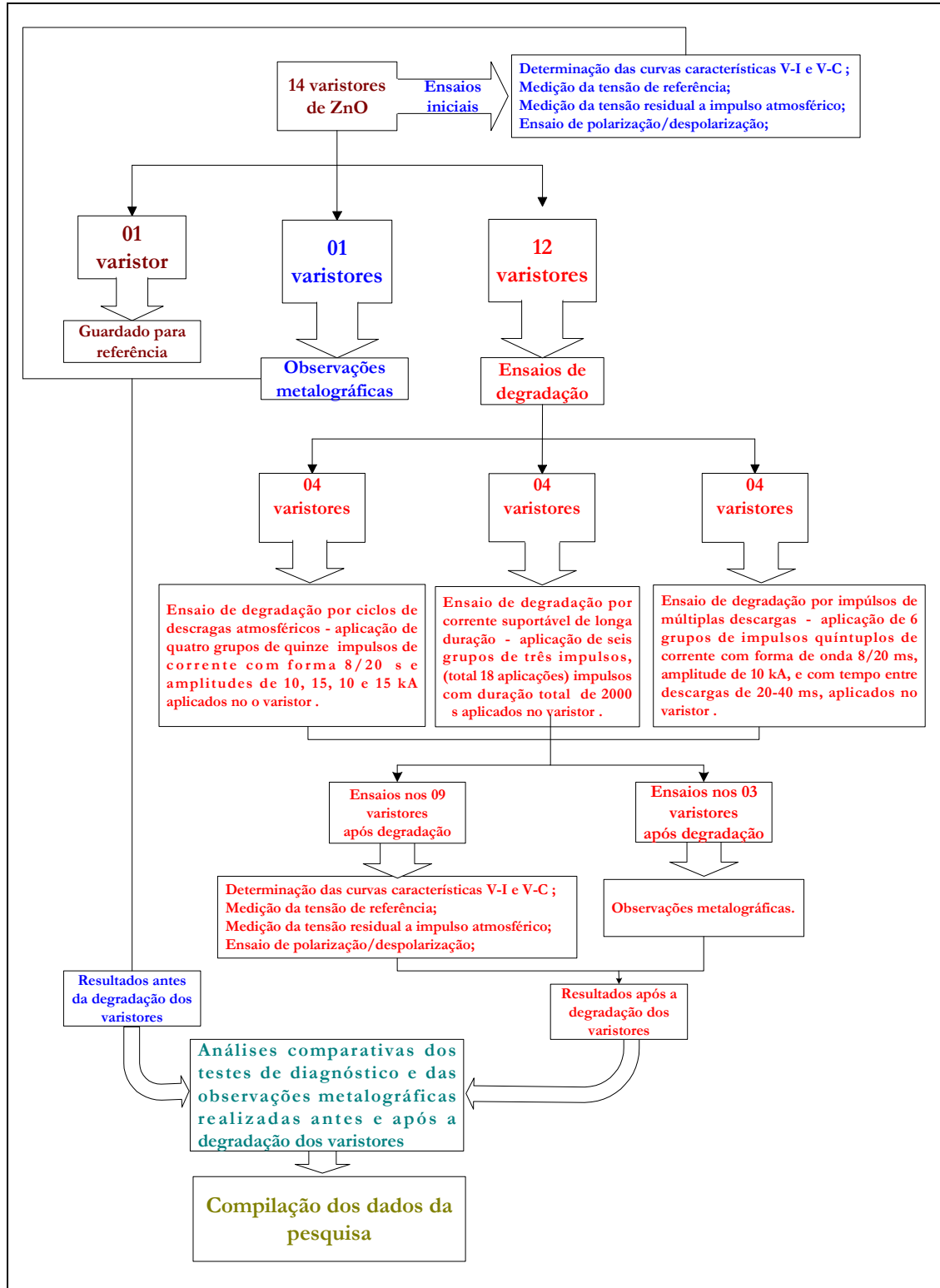


Figura 22 – Fluxograma do desenvolvimento do trabalho.

3.4. MÉTODOS

Para a determinação da densidade foi utilizado um paquímetro para realizar as medidas de comprimento, altura e espessura, para o cálculo do volume específico do varistor. Todos os varistores foram pesados em uma balança de precisão. Após o cálculo da densidade dos varistores, foi realizada uma verificação do percentual da densificação dos varistores em relação a massa específica teórica do ZnO que é de $5,61 \text{ g/cm}^3$, conforme descrito na literatura.

Para evitar medições incorretas devido ao efeito de umidade, antes de cada etapa dos ensaios elétricos as amostras foram submetidas a uma etapa de secagem a uma temperatura de $60 \pm 5^\circ \text{ C}$, tomando-se o cuidado de se evitar a permanência das amostras fora da estufa por mais de 6 horas. Durante a realização dos ensaios a temperatura dos varistores de ZnO foi de $27 \pm 3^\circ \text{ C}$.

Foram utilizados 3 arranjos para a conexão dos varistores no circuito de ensaio. Um módulo de material isolante, para a realização das medições das curvas características $V \times I$, $V \times C$ e tensão de referência, outro com placas de alumínio para os ensaios de impulso de corrente e por último com blocos de cobre para o ensaio de polarização/despolarização. O varistor foi conectado entre 2 blocos maciços de alumínio, onde foram soldados fios para conexão com o circuito. Os prendedores podem ser visualizados nas Figuras 23, 24 e 25.

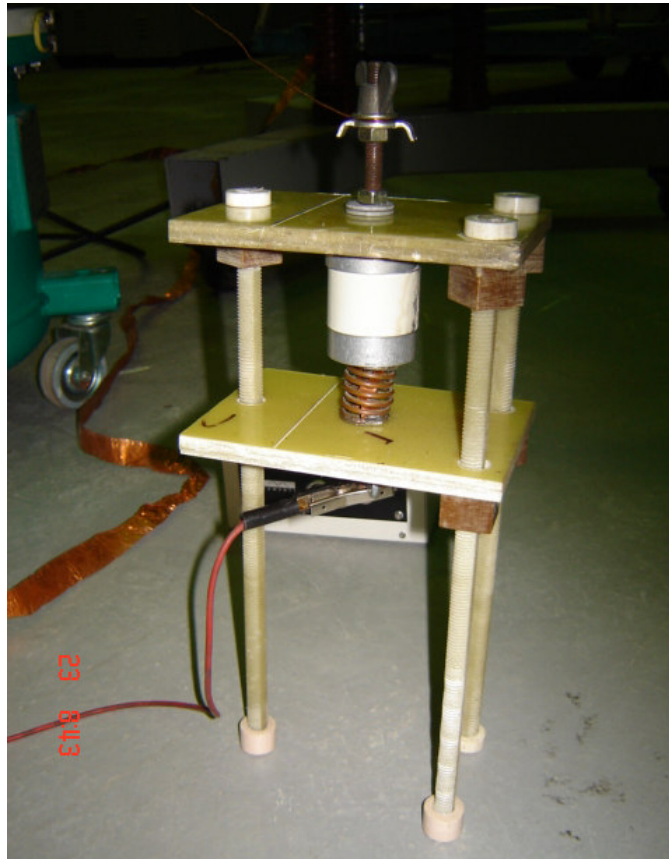


Figura 23 – Detalhe do varistor conectado entre blocos de alumínio no prendedor de material isolante.



Figura 24 – Detalhe do varistor conectado entre o tubo e a placa de alumínio no prendedor confeccionado em alumínio.

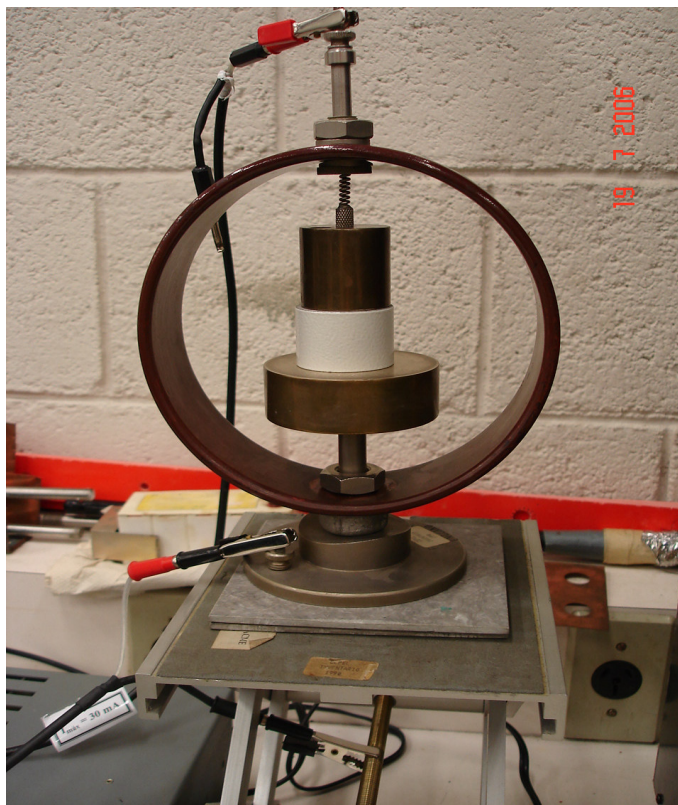


Figura 25 – Detalhe do varistor conectado entre os blocos de cobre no prendedor confeccionado em cobre.

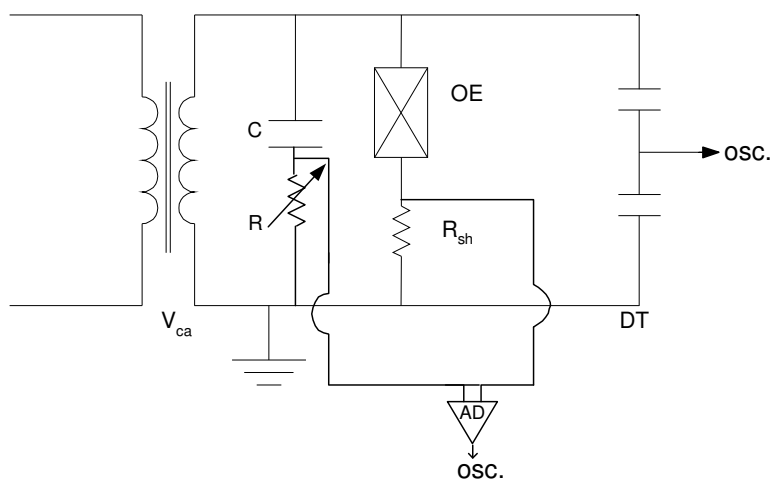
Para a aplicação de tensão alternada de frequência industrial foi utilizada uma fonte de alimentação de 0 - 8 kV_{ef} e para o carregamento dos capacitores do gerador de impulso de corrente foi utilizada uma fonte de alimentação contínua de 0 - 400 kV_{cc}.

As medições da tensão alternada e da tensão contínua foram realizadas com divisores de tensão. Para a corrente total (I_T) e sua componente resistiva (I_R) sob aplicação de tensão alternada de frequência industrial foi utilizado um derivador de corrente. Para as medições das formas de onda de impulso atmosférico utilizamos um transformador de corrente. Os transformadores de corrente de fabricação Pearson Electronics, os divisores de tensão e os derivadores de corrente de fabricação do CEPEL são calibrados no Laboratório de Referência em Alta Tensão (CA2) do CEPEL, que possuem as suas referências calibradas periodicamente pelo INMETRO. Todos os oscilogramas de forma de onda foram registrados por osciloscópio Tektronix modelo TDS540, calibrados no Laboratório de Calibração (CA1) do CEPEL, que faz parte da Rede Brasileira de Calibração – RBC/INMETRO.

3.4.1. Ensaio da Curva Característica V x I

O levantamento da curva característica “tensão x corrente total”, “tensão x componente resistiva da corrente” e “tensão x potência”, foram obtidas para amplitudes de tensão de freqüência industrial variando desde 0,4 kV_{ef} a 4,2 kV_{ef}, sobre 12 blocos varistores de ZnO. Foram realizados ensaios para medição da curva característica nos blocos varistores antes e após os ensaios de degradação. As amplitudes da corrente total e suas componentes foram medidas a partir do osciloscópio Tektronix. A componente resistiva da corrente foi obtida a partir da técnica de compensação da componente capacitiva, segundo Oliveira Filho e Da Silva [22]. As amplitudes das correntes total, componente resistiva da corrente e potência foram medidas pelo valor de pico.

O desenho esquemático do circuito elétrico utilizado no ensaio é mostrado na Figura 26 e o detalhe do arranjo de ensaio é mostrado na Figura 27.



- V - Tensão de carga
- C, R - Capacitor e resistor para ajuste do circuito de compensação
- OE - Objeto sob ensaio
- DT - Divisor de tensão capacitivo
- R_{sh} - Derivador de corrente para medição da corrente total
- Osc - Osciloscópio digital
- AD - Amplificador diferencial

Figura 26 – Esquema representativo do circuito de ensaio utilizado para a medição da corrente total e componente resistiva e potência.

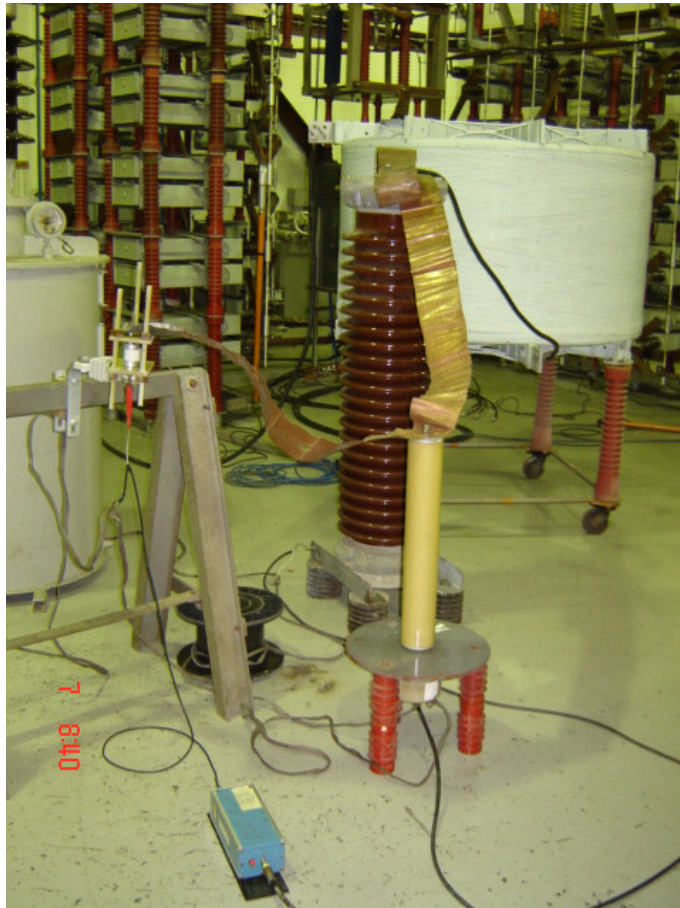
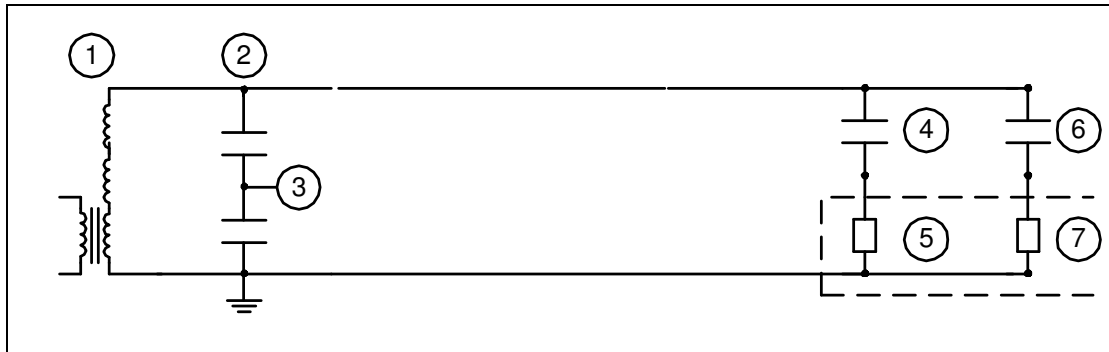


Figura 27 – Detalhe do arranjo de ensaio utilizado para a medição da corrente total, componente resistiva e potência. Laboratório de Impulso de Corrente (AT4) da DVLA – CEPEL.

3.4.2. Ensaio da Curva Característica V x C

O levantamento da curva característica “tensão x capacitância” e “tensão x tangente de perdas (tangente δ)”, foram obtidas para amplitudes de tensão de frequência industrial variando desde 0,4 kV_{ef} a 4,2 kV_{ef}, sobre 12 varistores de ZnO. Foi realizado o ensaio da curva característica nos varistores antes e após os ensaios de degradação. Para a obtenção dos valores de capacitância e tangente de perdas (δ), utilizou-se uma ponte shering marca TETTEX modelo 2877.

O desenho esquemático do circuito elétrico utilizado no ensaio é mostrado na Figura 28 e o detalhe do arranjo de ensaio é mostrado na Figura 29.



1. - Regulador de tensão 0 - 440 V, Fonte de tensão 230 kV / 0,45 A, 60Hz
2. - Divisor de tensão capacitivo 250 kV, rel.: 10100/1, fabricação IMG
3. - Voltímetro de fabricação FLUKE 45
4. - Capacitor Padrão 30 kV, 1000 pF, de fabricação HAEFELY
5. - Ponte de medição de capacitância e tangente delta
6. - Impedância de medição
7. - Objeto sob ensaio

Figura 28 – Esquema representativo do circuito de ensaio utilizado para a medição da capacitância e tangente de perdas (δ).

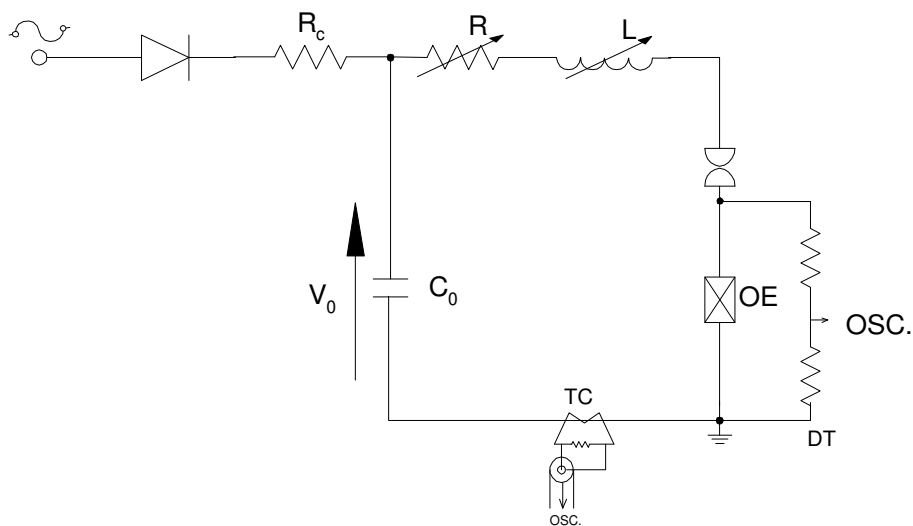


Figura 29 – Detalhe do arranjo de ensaio utilizado para a medição da capacitância e tangente de perdas (δ). Laboratório de Ensaio Corona (AT2) da DVLA – CEPEL.

3.4.3. Ensaio de Tensão Residual

O ensaio de tensão residual tem por objetivo a verificação da queda de tensão produzida no varistor de ZnO quando da passagem de um impulso de corrente pelo varistor. O ensaio consistiu na aplicação de um impulso de corrente com forma de onda 8/20 μ s e na medição da tensão residual, conforme item 2.4.5.3, e amplitude de 10 kA nos 12 varistores de ZnO. Foi realizado o ensaio de tensão residual nos varistores antes e após os ensaios de degradação [23].

O desenho esquemático do circuito elétrico utilizado no ensaio é mostrado na Figura 30 e o detalhe do arranjo de ensaio é mostrado na Figura 31.



- V_0 - Tensão de carga
- R_c - Resistor de carga
- C_0 - Banco de capacitores para ajuste da forma de impulso
- R, L - Resistor e indutor para ajuste da forma de onda do impulso
- OE - Objeto sob ensaio
- DT - Divisor de tensão resistivo
- TC - Transformador de corrente
- Osc - Osciloscópio Digital

Figura 30 - Esquema representativo do circuito de ensaio utilizado para a medição da tensão residual.

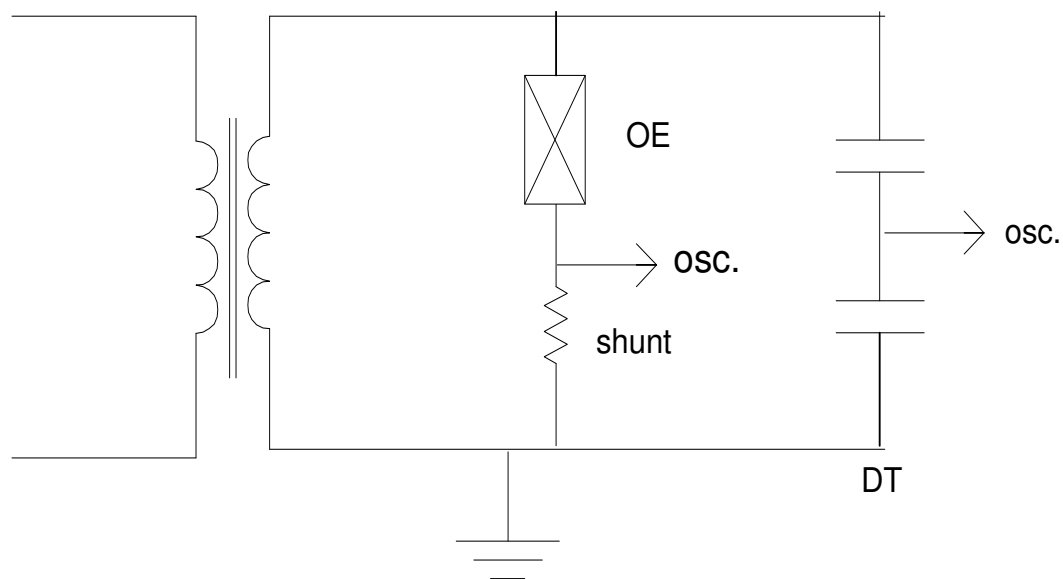


Figura 31 – Detalhe do arranjo de ensaio utilizado para a medição da tensão residual. Laboratório de Impulso de Corrente (AT4) da DVLA – CEPEL.

3.4.4. Ensaio de Tensão de Referência

Este ensaio tem por objetivo a verificação da tensão de referência quando o varistor está sendo submetido à aplicada da corrente de referência. O ensaio consistiu na aplicação da tensão de frequência industrial até que a corrente de fuga atingisse 1 mA de crista, o valor da tensão medida é considerada a tensão de referência. Foi realizada a medição da tensão de referência em 12 varistores de ZnO, antes e após os ensaios de degradação.

O desenho esquemático do circuito elétrico utilizado no ensaio é mostrado na Figura 32 e o detalhe do arranjo de ensaio é mostrado na Figura 27.



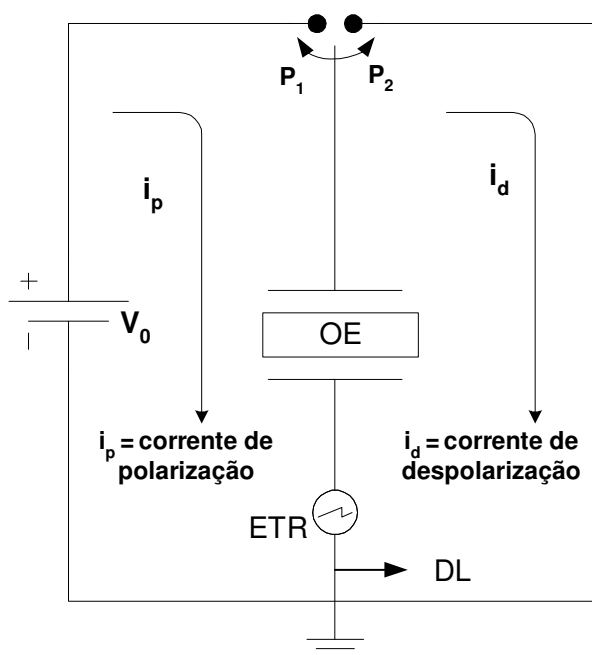
- V_0 - Tensão de carga
- OE - Objeto sob ensaio
- DT - Divisor de tensão capacitivo
- R_{sh} - Derivador de corrente
- Osc - Osciloscópio digital

Figura 32 - Esquema representativo do circuito de ensaio utilizado para a medição da tensão de referência.

3.4.5. Ensaio de Polarização/Despolarização

Este ensaio tem por objetivo verificar a corrente de polarização e despolarização do varistor quando da aplicação de uma tensão por um determinado período de tempo. Antes de iniciar a medição das correntes de polarização/despolarização os varistores foram curto circuitados para terra por pelo menos 24 h. Isto foi feito para eliminar os efeitos precedentes de polarização (comumente conhecido como efeito memória), que afetam normalmente a exatidão e a reprodutibilidade da medição [23]. O ensaio consistiu na medição das correntes de polarização aplicando-se 1000 V_{CC} entre os terminais do varistor por um período de 10000 segundos, e após este tempo o circuito foi curto circuitado e medida a corrente de despolarização também por um período de 10000 segundos. Foi realizada a medição da polarização/despolarização em 12 varistores de ZnO, antes e após os ensaios de degradação.

O desenho esquemático simples do circuito elétrico utilizado no ensaio é mostrado na Figura 33 e nas Figuras 34 e 35 com alguns dos equipamentos do circuito.



- V₀ - Tensão de carga
- ETR - Eletrometro para medição de corrente
- P₁ P₂ - Posição de fechamento da chave
- DL - Data logger (Armazenamento dos dados de tensão e corrente)

Figura 33 – Esquema representativo do circuito de ensaio utilizado para a medição da polarização/despolarização.

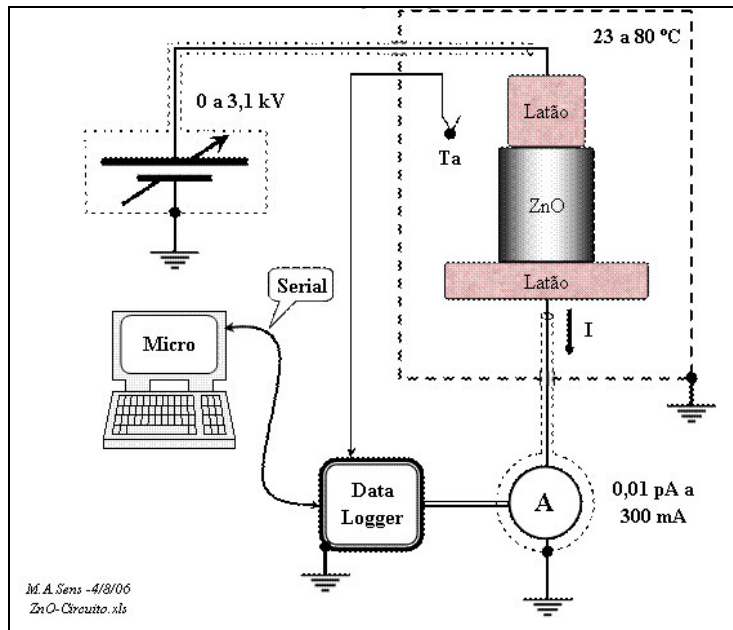


Figura 34 - Esquema representativo do circuito de ensaio utilizado para a medição da corrente de polarização/despolarização



(a)



(b)

Figura 35 – Detalhe dos equipamentos utilizados no ensaio. (a) Estufa, o prendedor com um bloco varistor e a Fonte de tensão, (b) Data logger e o medidor de corrente Laboratório de Propriedade Eléctricas e Magnéticas (MA6) da DVLF – CEPEL.

3.4.6. Ensaio de Degradação

3.4.6.1. Degradação por ciclos de descargas atmosféricas

Os quatro varistores foram submetidos a 4 ciclos de 15 impulsos de corrente com forma 8/20 μ s, conforme item 2.4.5.3, alternando o valor de crista do impulso entre 10, 15, 10 e 15 kA. Os 15 impulsos foram aplicados com intervalos de 50 s a 60 s mais o tempo de carregamento do gerador.

O desenho esquemático do circuito elétrico utilizado no ensaio é mostrado na Figura 30. Na Figura 36 está mostrando o oscilograma⁴ de calibração da forma de onda de impulso de corrente atmosférico utilizado no ensaio. A Figura 30 mostra o circuito utilizado no ensaio.

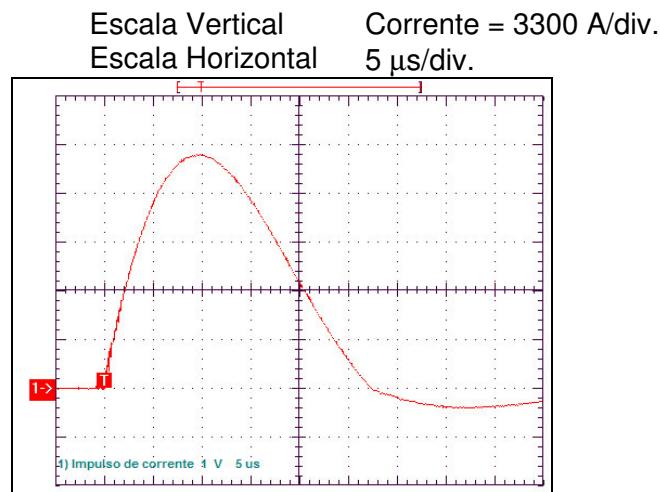


Figura 36 – Oscilograma de calibração da forma de onda de impulso atmosférico, amplitude de 15 kA.

⁴ O oscilograma abaixo exemplifica como serão apresentados os valores das escala de tempo, (escala horizontal) e a escala de tensão, corrente e potência, (escala vertical). Os valores das escalas serão relativos a cada quadrículo como exemplificado na figura. Por exemplo:

- Escala vertical \rightarrow Tensão/Corrente = 1000 V, A/divisão \rightarrow o valor correspondente ao pico da forma de onda deverá ser multiplicado por 1000 (se o pico da forma de onda for de 3 quadrículos o valor da tensão ou corrente será de 3000 V ou 3000 A.)
- Escala horizontal \rightarrow 20 ms/divisão \rightarrow o valor correspondente a extensão da forma de onda deverá ser multiplicado por 20 (se a onda se estender por 4 quadrículos o tempo de duração da onda será de 80 ms)

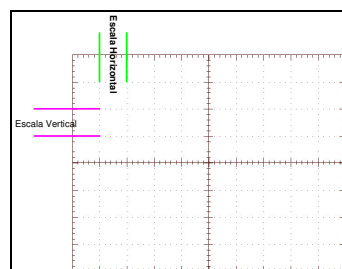




Figura 37 – Arranjo do circuito utilizado para o ensaio por ciclos de impulsos de corrente atmosféricos. Laboratório de Impulso de Corrente (AT4) da DVLA – CEPEL.

3.4.6.2. Degradação por impulsos de corrente suportável de longa duração

O ensaio de corrente de longa duração consistiu em dezoito aplicações, divididas em seis grupos de três. Os intervalos entre aplicações foram de 50 s a 60 s, e entre grupos tal que permitisse o resfriamento da amostra até próximo da temperatura ambiente. Foram efetuados registros oscilográficos da tensão e corrente em pelo menos uma aplicação de cada grupo.

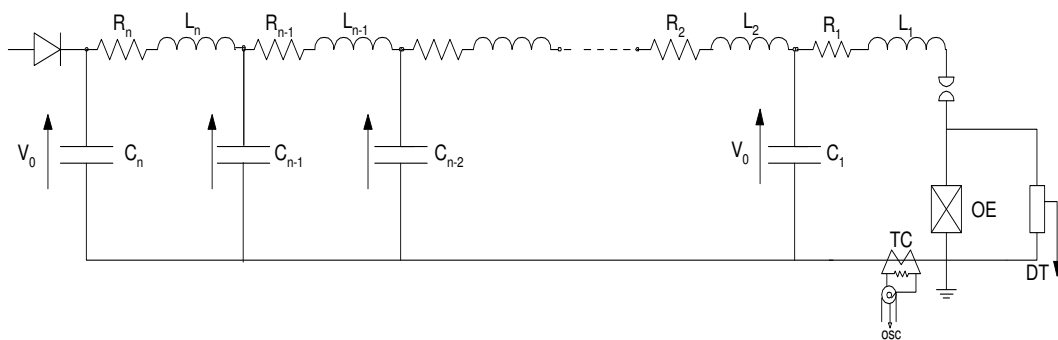
Este ensaio consistiu na aplicação, sobre o corpo de prova, de impulsos de corrente simulando descargas de linhas de transmissão, forma de onda retangular, conforme descrito no item 2.4.5.3, sendo os parâmetros do circuito de ensaio definidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros do gerador de impulso para o ensaio de degradação por impulsos de longa duração.

Classe do pára-raios (kA)	Classe de descarga de linha de transmissão	Impedância de surto do gerador Z (Ω)	Duração virtual de crista T (μ s)	Tensão de carga U_L (kV _{cc})
10	1	$4,9 U_n$	2000	$3,2 U_n$
NOTAS 1- U_n = Tensão nominal do corpo de prova, em kV (valor eficaz). 2- A classe corresponde à capacidade de descarga de linha de transmissão, que é função da energia envolvida.				

De acordo com a especificação do fabricante o varistor está preparado para suportar uma energia equivalente a 1,04 kJ/kV, ou seja 4,16 kJ. Para que fosse realizada uma maior solicitação sobre o varistor foi aplicado uma energia com um valor médio de 1,36 kJ/kV (5,44 kJ), aproximadamente 30% maior do que o especificado pelo fabricante.

O desenho esquemático do circuito elétrico utilizado no ensaio é mostrado na Figura 38. A Figura 39 está mostrando o oscilograma de calibração da forma de impulso de longa duração, a tensão residual e a energia no varistor.



- n - número de estágios do gerador de corrente
- V_0 - Tensão de carga
- C_n - Capacitores para ajuste da forma de impulso
- L_n - Indutores para ajuste da forma de impulso
- OE - Objeto sob ensaio
- DT - Divisor de tensão
- TC - Transformador de corrente
- Osc₁ - Osciloscópio digital

Figura 38 - Esquema representativo do circuito de ensaio utilizado para o ensaio de degradação por impulsos de longa duração.

Escala Vertical Tensão = 4197 V/div. ⇨ sinal superior
Corrente = 100 A/div. ⇨ sinal inferior
Energia ⇨ sinal central
Escala Horizontal 500 μ s/div.

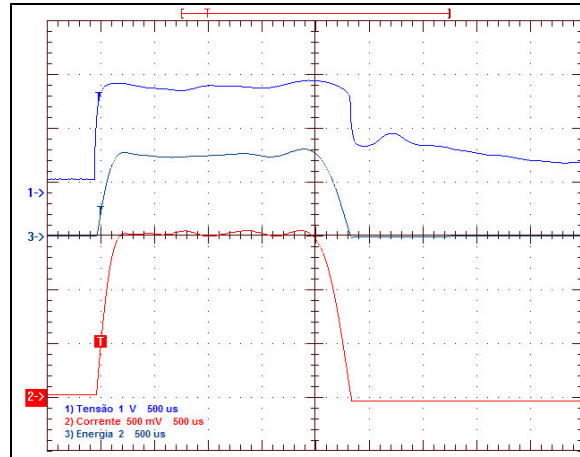
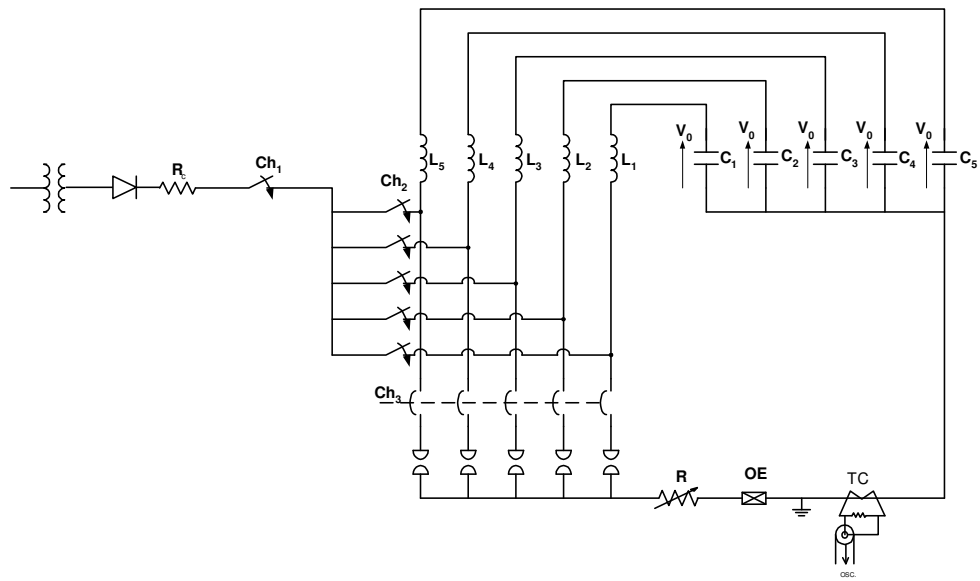


Figura 39 – Oscilograma de calibração do circuito de ensaio por impulsos de longa duração.

3.4.6.3. Degradação por impulsos de múltiplas descargas

O ensaio de degradação por impulsos de múltiplas descargas consistiu em 6 grupos de impulsos quádruplos de corrente com forma de onda 8/20 μ s e amplitude de 10 kA, Os 6 grupos de impulsos foram aplicados com intervalos de 50 s a 60 s mais o tempo de carregamento do gerador, aplicados no varistor.

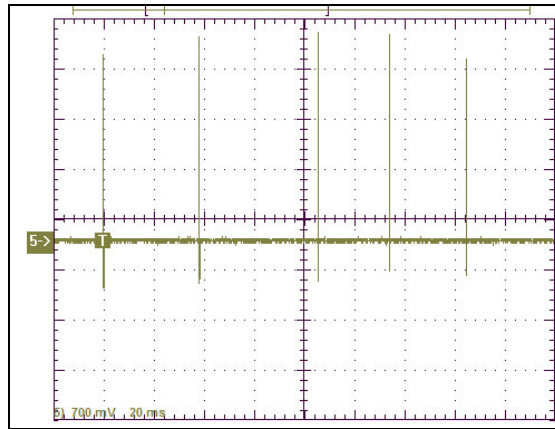
Este ensaio consistiu na aplicação, sobre o varistor, de cinco impulsos de corrente com forma de onda 8/20 μ s sucessivamente, com o tempo entre os impulsos de corrente de 20 a 40 ms. O circuito de ensaio está mostrado na Figura 40. A Figura 41 mostra o oscilograma de calibração dos impulsos nos intervalos de tempo especificados e a forma de onda do impulso de corrente utilizado no ensaio. A Figura 42 mostra o circuito utilizado para o ensaio de impulsos de múltiplas descargas.



- | | | |
|------------------------------|---|--|
| V_0 | - | Tensão de carga |
| R_c | - | Resistor de carga |
| C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 | - | Banco de capacitores para ajuste da forma de impulso |
| $R, L_1, L_2, L_3, L_4, L_5$ | - | Resistor e indutores para ajuste da forma de impulso |
| OE | - | Objeto sob ensaio |
| TC | - | Transformador de corrente |
| Osc | - | Osciloscópio Digital |

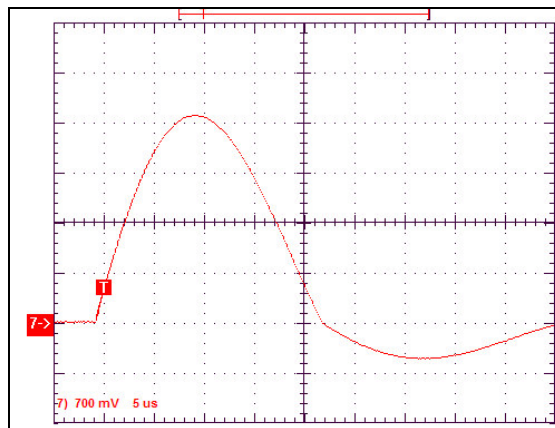
Figura 40 - Esquema representativo do circuito de ensaio utilizado para o ensaio de degradação por impulsos de múltiplas descargas.

Escala Vertical Corrente = 2330 A/div
Escala Horizontal 20 ms/div.



(a)

Escala Vertical Corrente = 2330 A/div
Escala Horizontal 5 μ s/div.



(b)

Figura 41 (a) e (b) - Oscilograma de calibração do circuito de ensaio por impulsos de múltiplas descargas. (a) Mostra a calibração dos tempos entre os impulsos de corrente e (b) Mostra a forma de onda calibrada do impulso de corrente.

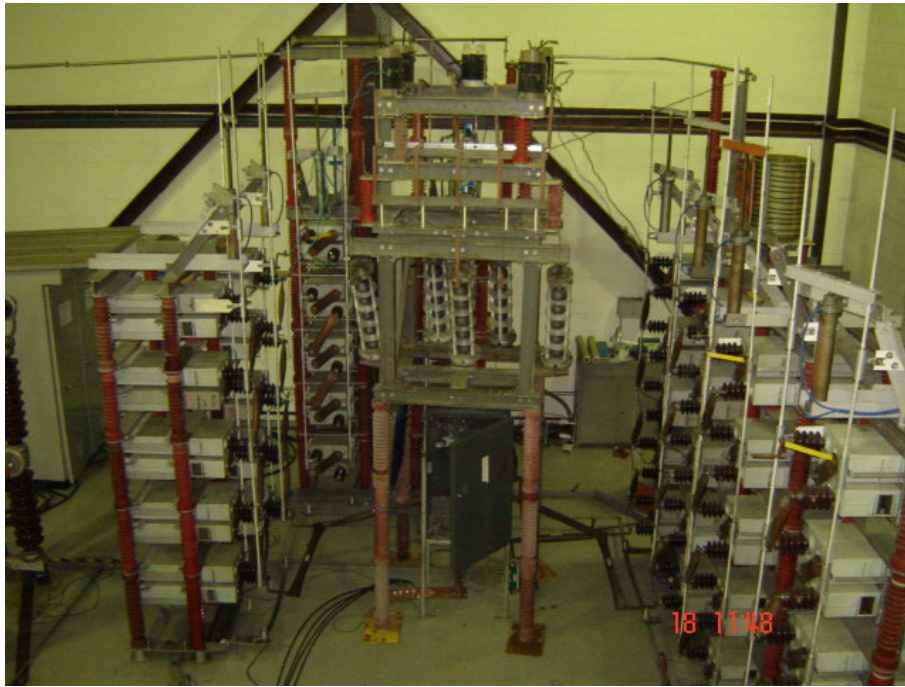


Figura 42 – Arranjo de ensaio do circuito utilizado para o ensaio de impulsos de múltiplas descargas. Laboratório de Impulso de Corrente (AT4) da DVLA – CEPEL.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados do estudo experimental dos ensaios para um determinado tipo de varistor de ZnO previamente aprovado em todos os ensaios de tipo, fabricado em escala industrial e utilizados na montagem de pára-raios para sistemas de transmissão. Apesar dos resultados apresentados neste capítulo serem específicos de um determinado tipo de varistor, espera-se que os resultados encontrados possam servir de referência para o estudo e avaliação de outros tipos de varistores de ZnO, conhecidas as suas dimensões e características elétricas principais.

A Tabela 5 mostra todas as medidas dimensionais realizadas nos varistores e a variação percentual de cada varistor em relação a densidade teórica do ZnO. Podemos observar que os varistores apresentam um grau de densificação compatível com sua aplicação.

Na Tabela 5 são mostradas as características dimensionais de todos os varistores que participaram dos experimentos. A separação dos varistores foi como se segue: (1) varistor novo para observações metalográficas, (2) ensaios de degradação por ciclos de impulso atmosférico, (3) ensaios de degradação por impulsos de múltiplas descargas e (4) ensaios de degradação por corrente suportável de longa duração.

Tabela 5 – Medição dimensional dos varistores.

	Bloco (nº)	Dimensões do varistor (cm)		Volume	Peso (g)	Densidade (g/cm ³)	Densidade Teórica 5,61 g/cm ³	Grau de Densificação (%)
		Altura	Diâmetro					
1	4	2,815	4,18	38,54	210,7	5,47	0,9746	97,46
2	5	2,820	4,18	38,61	209,6	5,43	0,9679	96,79
	6	2,810	4,18	38,56	210,9	5,47	0,9747	97,47
	16	2,815	4,16	38,17	210,4	5,51	0,9824	98,24
	22	2,815	4,17	38,45	209,1	5,44	0,9693	96,93
3	10	2,820	4,17	38,42	209,2	5,44	0,9704	97,04
	11	2,815	4,18	38,63	209,8	5,43	0,9679	96,79
	12	2,835	4,16	38,53	208,4	5,41	0,9642	96,42
	13	2,810	4,15	37,92	210,1	5,54	0,9878	98,78
4	8	2,820	4,16	38,33	208,9	5,45	0,9715	97,15
	20	2,810	4,15	38,01	209,2	5,50	0,9810	98,10
	29	2,82	4,15	37,99	207,7	5,47	0,9746	97,46
	30	2,84	4,16	38,60	211,6	5,48	0,9769	97,69

Após as medições dimensionais, foram realizados os ensaios não destrutivos: curva característica V-I, curva característica V-C, tensão de referencia e tensão residual antes e após os ensaios de degradação nos 12 blocos varistores de ZnO. Após o término dos ensaios não destrutivos um dos blocos varistores foi submetido ao ensaio de observações metalográficas, amostra essa que não sofreu degradação.

A Figura 43 mostra o detalhe das amostras preparadas do bloco varistor 04 que não foi degradado, para as observações metalográficas. A Figura 44 mostra as fotomicrografias das superfícies de fratura, resultados das análises por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Corroborando os resultados da análise dimensional, pode-se observar que realmente não existe grande porosidade. Também verifica-se uma grande heterogeneidade das camadas intergranulares, o que é típico de blocos varistores comerciais produzidos segundo o método cerâmico tradicional.

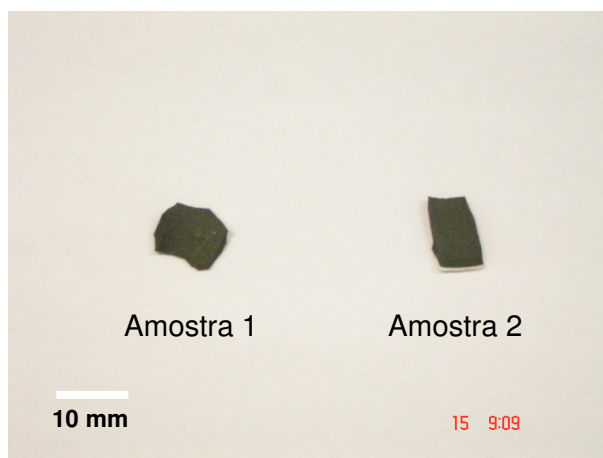
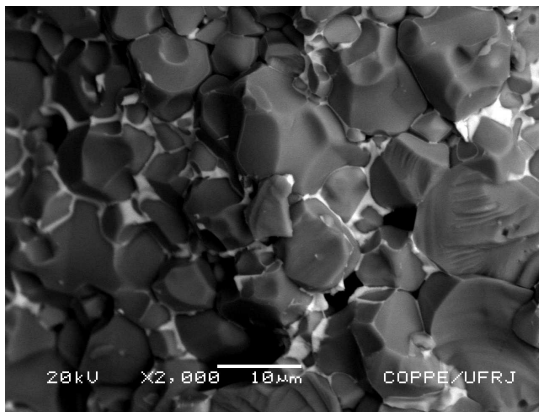
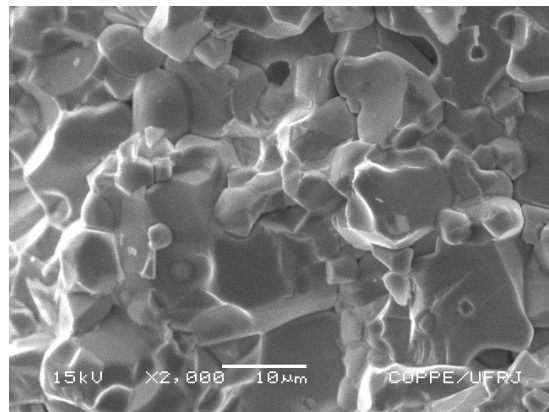


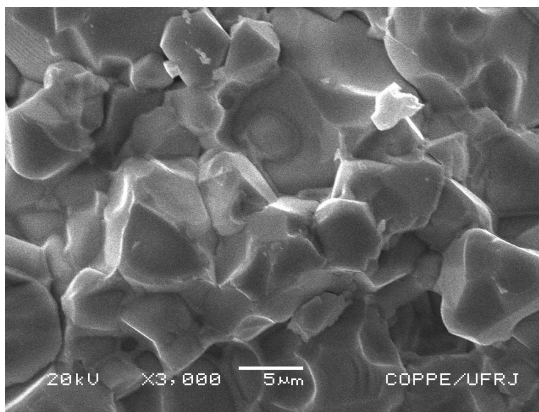
Figura 43 – Detalhe das amostras que foram observadas no MEV retiradas do varistor 04.



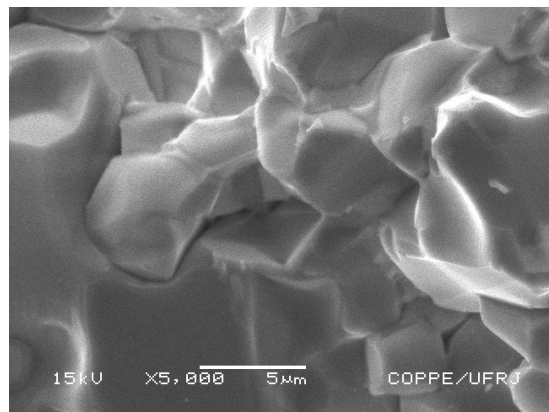
(a) Amostra 2 – aumento 2.000x



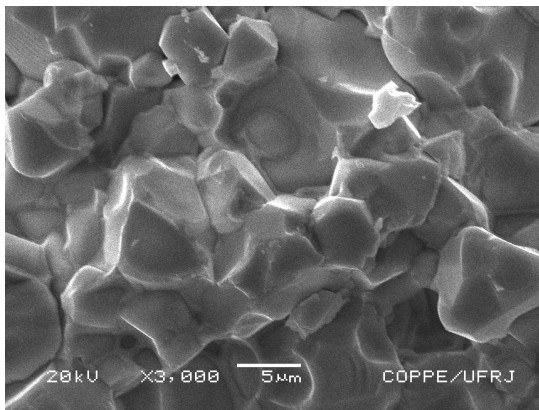
(b) Amostra 1 – aumento 2.000x



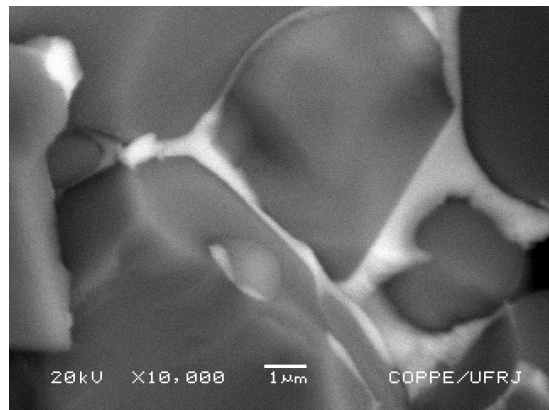
(c) Amostra 2 – aumento 5.000x



(d) Amostra 1 – aumento 5.000x



(e) Amostra 1 – aumento 3.000x



(f) Amostra 1 – aumento 10.000x

Figura 44 – Fotomicrografia (MEV) da superfície de fratura do varistor 04.

A Figura 45 mostra os principais elementos encontrados no bloco varistor 04 através da análise por Espectroscopia de Energia Dispersiva por Raio X (EDS). Podemos observar que é um espectro típico da camada intergranular.

O resultado de EDS mostra que se trata de um varistor convencional – à base do sistema $\text{ZnO-Bi}_2\text{O}_3\text{-Sb}_2\text{O}_3$ – produzido por mistura de óxidos, densificado mediante sinterização em presença de fase líquida, que resulta na formação da camada intergranular.

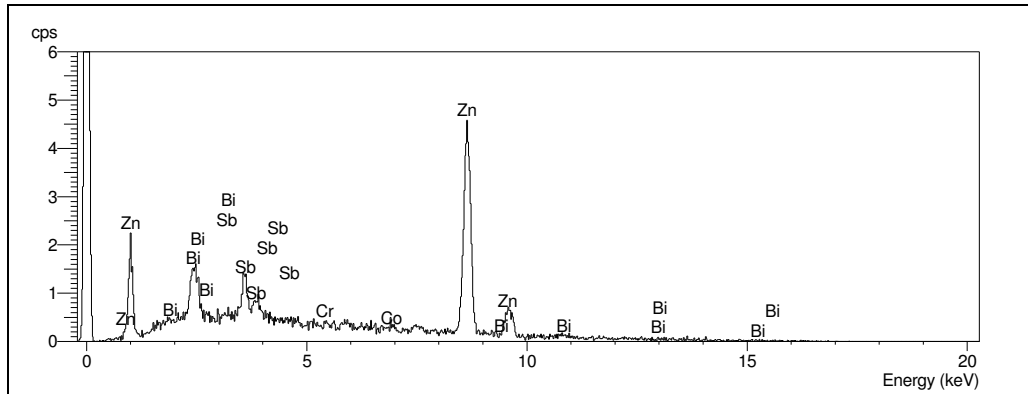


Figura 45 – Resultado da análise química elementar por EDS do varistor 04.

Na Figura 46 são apresentados alguns oscilogramas dos ensaios não destrutivos, curva característica (“tensão x corrente total”, “tensão x corrente resistiva” e “tensão x potência”), tensão de referência e tensão residual das amostras ensaiadas de onde foram retirados os valores informados. Apresentamos somente alguns oscilogramas por entendermos que são em número muito grande.

Escala Vertical:

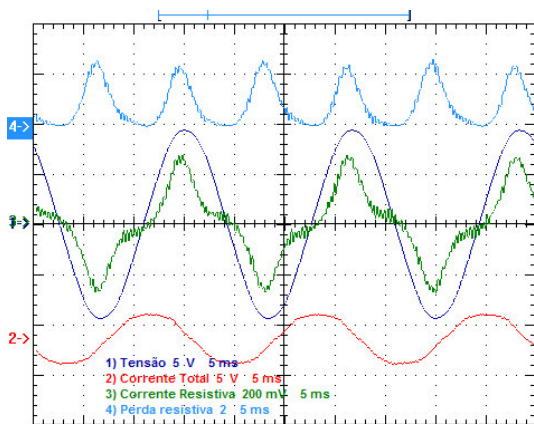
Potência: 84 mW → sinal superior
 Tensão: 2100 V/div. → sinal central
 Corrente resistiva: 10 μ A/div. → sinal central
 Corrente total: 50 μ A/div. → sinal inferior

Escala Horizontal: 5 ms/div.

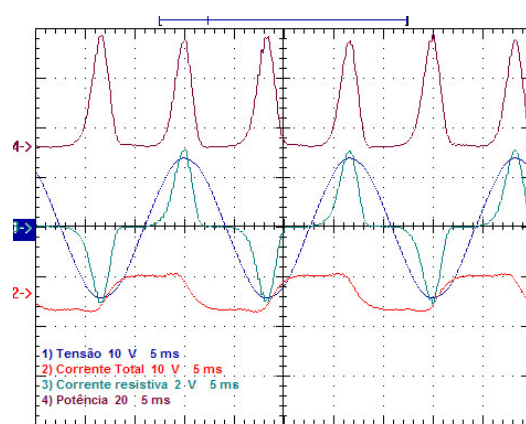
Escala Vertical:

Potência: 84 mW → sinal superior
 Tensão: 2100 V/div. → sinal central
 Corrente resistiva: 10 μ A/div. → sinal central
 Corrente total: 50 μ A/div. → sinal inferior

Escala Horizontal: 5 ms/div.



(a)



(b)

Escala Vertical:

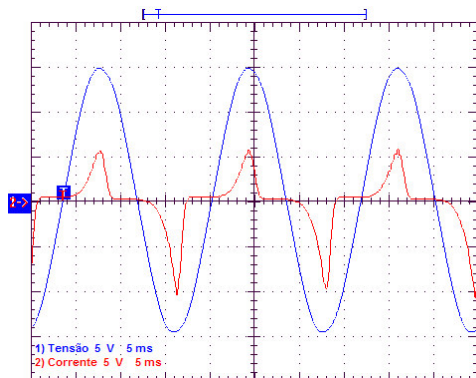
Tensão: 2100 V/div. → sinal central
 Corrente resistiva: 0,5 mA/div. → sinal inferior

Escala Horizontal: 5 ms/div.

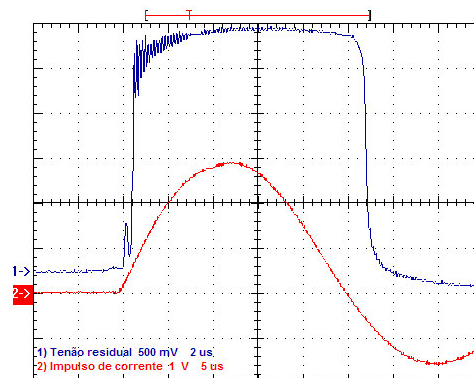
Escala Vertical:

Tensão: 2060 V/div. → sinal superior
 Corrente : 0,5 mA/div. → sinal inferior

Escala Horizontal: 5 μ s/div.



(c)



(d)

Figura 46 – Alguns oscilogramas utilizados para as medições de corrente, tensão e potência. (a) e (b) Oscilograma da curva característica V-I, com os sinais de potência, tensão e correntes total e resistiva, (c) Tensão de referência na corrente de 1 mA e (d) tensão residual na corrente de descarga nominal.

4.1. Degradação dos varistores por ciclo de descargas atmosféricas.

A Figura 47 mostra os blocos varistores 05, 06, 16 e 22, antes de sofrerem a degradação por ciclo de descargas atmosféricas. Nas Tabelas de 6 a 14 e nas Figuras de 48 a 66 são apresentados todos os resultados dos ensaios e os gráficos comparativos dos resultados antes e após a degradação das amostras 05, 06 e 16 por ciclos de impulso atmosférico. Nas Figuras 91 e 92 são apresentados os resultados das Microscopia Eletrônica de varredura – MEV e do Espectro de Dispersão de Energia por Raio X - EDS da amostra 22.



Figura 47 – A Figura mostra os varistores 05, 06, 16 e 22 antes do ensaio de degradação por ciclos de descargas atmosféricas.

4.1.1. Bloco varistor 05

Resultados dos ensaios antes e após a degradação do bloco varistor por ciclo de descargas atmosféricas:

- Curva característica tensão x capacitância e tensão x tangente δ (Tabela 6);
- Curva característica tensão x corrente, tensão x corrente resistiva e tensão x potência (Tabela 7);
- Tensão residual e tensão de referência (Tabela 8).

Devido a ocorrência de uma descarga externa pela superfície lateral do bloco varistor no ensaio de degradação por ciclo de descargas atmosféricas (Figura 45), não foi possível realizar as medições das curvas características e da tensão de referência após o ensaio de degradação por ciclo de descargas atmosféricas.

Podemos observar pelos resultados da Tabela 6 os valores dos pontos medidos após a degradação que a capacitância aumentou em média 10 % e para a tangente δ o aumento foi muito elevado em relação às medições iniciais, evidenciando assim uma degradação no varistor. Observamos que a capacitância diminui com o aumento da tensão aplicada, até próximo da tensão nominal do varistor quando aumenta novamente.

Tabela 6 - Resultado do ensaio da curva característica tensão X capacitância e tensão x tangente δ antes e após a degradação.

Tensão (kV)	Amostra 05			
	Capacitância (pF)		Tangente δ	
	Antes	Após	Antes	Após
0,4	167,5	180,0	0,033	0,063
0,8	165,7	188,3	0,033	0,112
1,2	164,5	-----	0,037	-----
1,6	162,8	-----	0,042	-----
2,0	158,6	-----	0,046	-----
2,4	156,2	-----	0,053	-----
2,8	153,3	-----	0,062	-----
3,0	151,7	-----	0,069	-----
3,2	150,3	-----	0,078	-----
3,4	149,4	-----	0,088	-----
3,6	149,2	-----	0,011	-----
3,8	149,1	-----	0,142	-----
4,0	150,7	-----	0,206	-----
4,2	153,2	-----	0,329	-----

Podemos observar que nas medições da corrente e potência, quanto mais a tensão se aproximava da tensão nominal do varistor há um aumento progressivo desses parâmetros, indicando uma tendência de instabilidade eletrotérmica.

Tabela 7 - Resultado do ensaio da curva característica tensão X corrente, tensão x corrente resistiva e tensão x potência antes e após a degradação.

Amostra 05						
Tensão (kV)	Corrente				Potência (mW)	
	Total (µA)		Resistiva (µA)		Antes	Após
	Antes	Após	Antes	Após		
0,4	31,3	-----	0,8	-----	0,7	-----
0,8	62,7	-----	1,7	-----	2,7	-----
1,2	92,5	-----	3,1	-----	6,3	-----
1,6	126,9	-----	4,9	-----	12,6	-----
2,0	156,7	-----	6,9	-----	22,4	-----
2,4	191,8	-----	11,9	-----	39,7	-----
2,8	218,5	-----	17,4	-----	66,4	-----
3,0	230,1	-----	20,5	-----	83,7	-----
3,2	243,1	-----	26,0	-----	113,4	-----
3,6	267,0	-----	47,6	-----	233,3	-----
3,8	276,6	-----	67,0	-----	349,2	-----
4,0	286,6	-----	99,2	-----	547,6	-----
4,2	297,7	-----	183,1	-----	1.066,9	-----

A medição da tensão residual ficou 0,35 % menor do que a medição antes da degradação; aparentemente não houve mudança nas suas características na região de alta corrente. Não foi possível a tensão de referência medir após o ensaio de degradação devido à descarga externa no varistor.

Tabela 8 - Resultado do ensaio da tensão residual e da tensão de referência antes e após a degradação.

Amostra 05				
	Antes		Após	
	Tensão (kV)	Corrente (kA)	Tensão (kV)	Corrente (kA)
Tensão residual 8/20 µs	11,4	10,1	11,0	10,7
Tensão de referência a 1 mA	4,4	0,001	-----	-----

Na Figura 48 podemos observar em detalhes o varistor 05, logo após o ensaio de degradação por ciclos de impulso atmosférico.

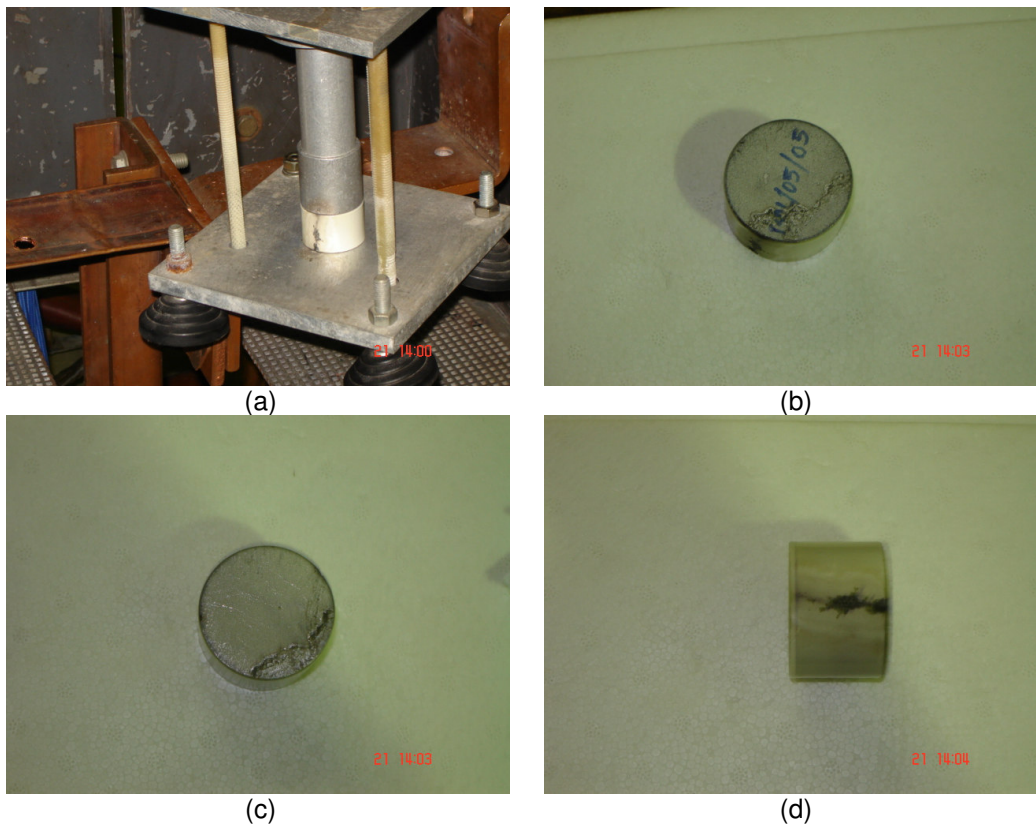


Figura 48 – Detalhe da amostra no arranjo de ensaio (a), detalhe da parte superior do varistor (b), detalhe da parte inferior do varistor (c) e detalhe da parte lateral do varistor (d).

Nas Figuras de 49 a 52 estão apresentados os gráficos das curvas característica “tensão x corrente total”, “tensão x corrente resistiva” e “tensão x potência” e das curvas característica “tensão x capacitância” e “tensão x tangente δ ”.

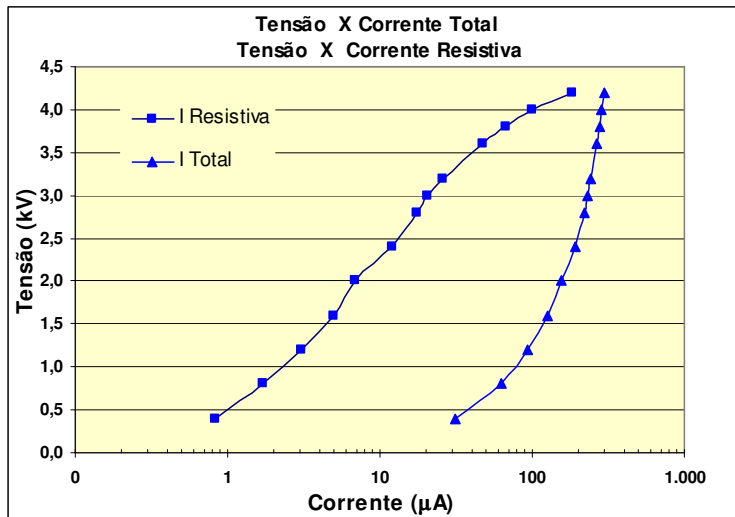


Figura 49 – Gráfico da tensão x corrente total e tensão x corrente resistiva.

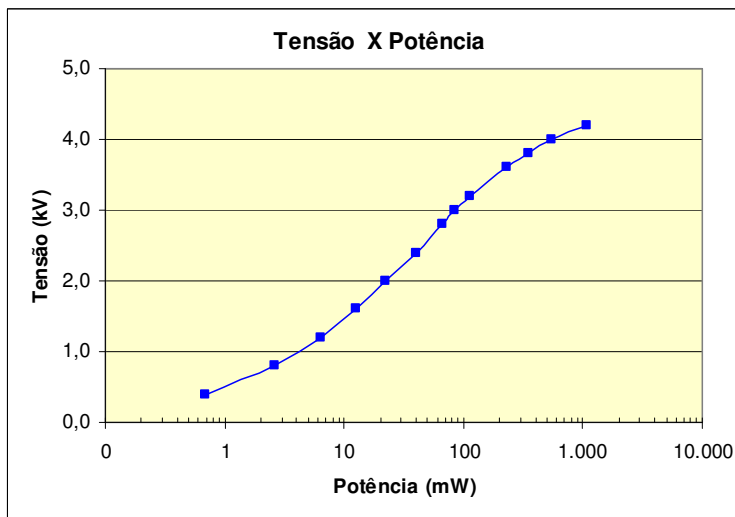


Figura 50 – Gráfico da tensão x potência.

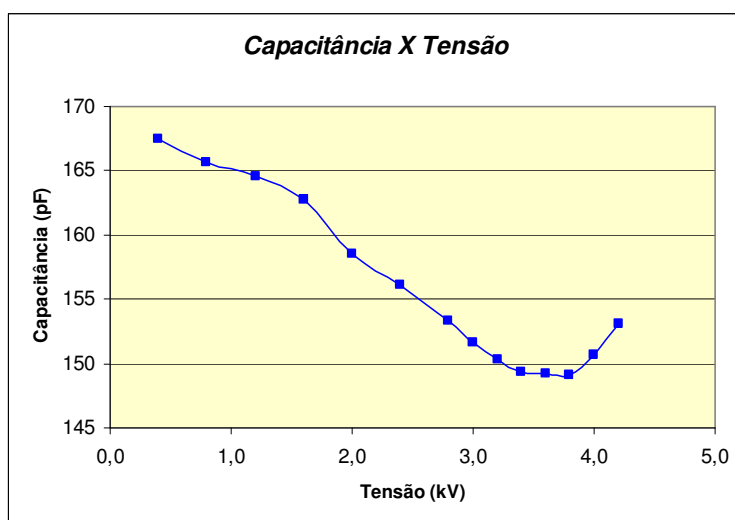


Figura 51 – Gráfico da tensão x capacitância.

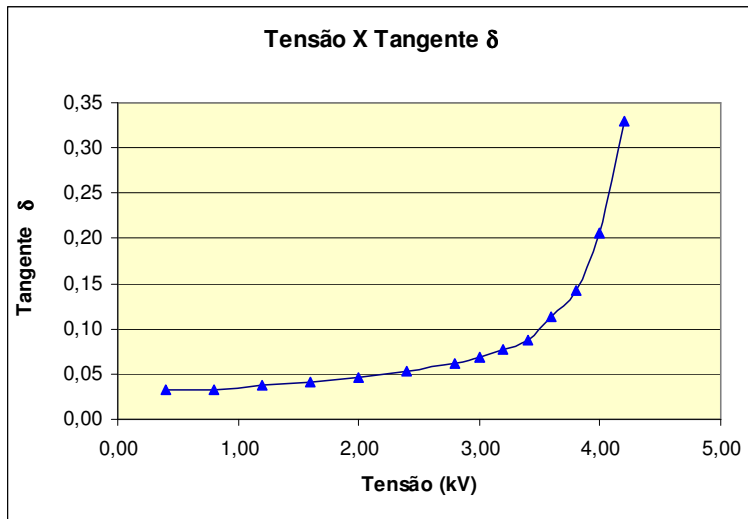


Figura 52 – Gráfico da tensão x tangente δ .

4.1.2. Bloco varistor 06

Resultados dos ensaios antes e após a degradação do varistor por ciclo de descargas atmosféricas:

- Curva característica tensão x capacitância e tensão x tangente δ (Tabela 9);
- Curva característica tensão x corrente, tensão x corrente resistiva e tensão x potência (Tabela 10);
- Tensão residual e tensão de referência (Tabela 11).
- Polarização / Despolarização

Observamos que houve um aumento da capacitância e da tangente δ após a degradação do bloco varistor, evidenciando com isso o envelhecimento. Pelo gráfico podemos verificar certo paralelismo da capacitância entre os valores de 1,0 e 3,0 kV. Observamos que a capacitância diminui com o aumento da tensão aplicada, até próximo a tensão nominal do varistor quando aumenta novamente, que pode ser observado na Figura 57.

Tabela 9 - Resultado do ensaio da curva característica tensão X capacitância e tensão x tangente δ antes e após a degradação.

Tensão (kV)	Amostra 06			
	Capacitância (pF)		Tangente δ	
	Antes	Após	Antes	Após
0,4	169,9	170,7	0,024	0,025
0,8	168,7	170,8	0,026	0,032
1,2	167,5	170,2	0,030	0,042
1,6	164,7	168,5	0,033	0,051
2,0	163,0	166,2	0,039	0,062
2,4	160,0	163,8	0,044	0,074
2,8	157,1	161,0	0,052	0,092
3,0	155,7	158,9	0,058	0,097
3,2	154,4	157,4	0,067	0,110
3,4	153,4	157,1	0,078	0,133
3,6	152,6	156,2	0,091	0,148
3,8	152,6	156,6	0,118	0,186
4,0	153,5	157,6	0,154	0,245
4,2	155,7	158,9	0,233	0,331

Observamos que a corrente e a potência a partir da tensão de 2,0 kV aumentaram em média de 90 % e a potência em torno de 40 %, evidenciando assim um envelhecimento do bloco resistor para a região de baixas correntes.

Tabela 10 - Resultado do ensaio da curva característica tensão x corrente tensão x corrente resistiva e tensão x potência antes e após a degradação.

Amostra 06						
Tensão (kV)	Corrente				Potência (mW)	
	Total (µA)		Resistiva (µA)		Antes	Após
	Antes	Após	Antes	Após		
0,4	31,3	33,0	0,9	1,0	1,1	0,6
0,8	67,2	67,0	2,0	2,6	3,9	2,7
1,2	97,0	96,0	3,5	4,7	8,1	7,4
1,6	126,8	124,0	5,7	10,4	15,4	24,3
2,0	156,7	150,0	8,1	15,2	26,0	42,0
2,4	194,2	200,0	11,5	21,2	37,5	83,9
2,8	223,3	220,0	16,4	29,6	62,9	110,8
3,0	235,8	230,0	19,5	34,0	80,1	134,3
3,2	248,7	250,0	24,2	41,0	105,0	176,3
3,6	275,4	280,0	42,1	70,0	206,3	344,2
3,8	289,4	290,0	63,0	94,0	330,7	470,1
4,0	299,3	300,0	89,6	141,0	491,7	755,7
4,2	311,0	340,0	146,4	240,0	859,7	1510,9

Observamos que os resultados de tensão residual e tensão de referência não apresentaram aumento em relação às medições antes da degradação. Aparentemente não houve mudança nas suas características na região de alta corrente e também na região altamente não linear.

Tabela 11 - Resultado do ensaio da tensão residual e da tensão de referência.

Amostra 06				
	Antes		Após	
	Tensão (kV)	Corrente (kA)	Tensão (kV)	Corrente (kA)
Tensão residual 8/20 µs	11,3	10,2	11,3	9,2
Tensão de referência a 1 mA	4,5	0,001	4,4	0,001

Na Figura 53 podemos observar em detalhes o varistor 06, logo após o ensaio de degradação por ciclos de impulso atmosférico.

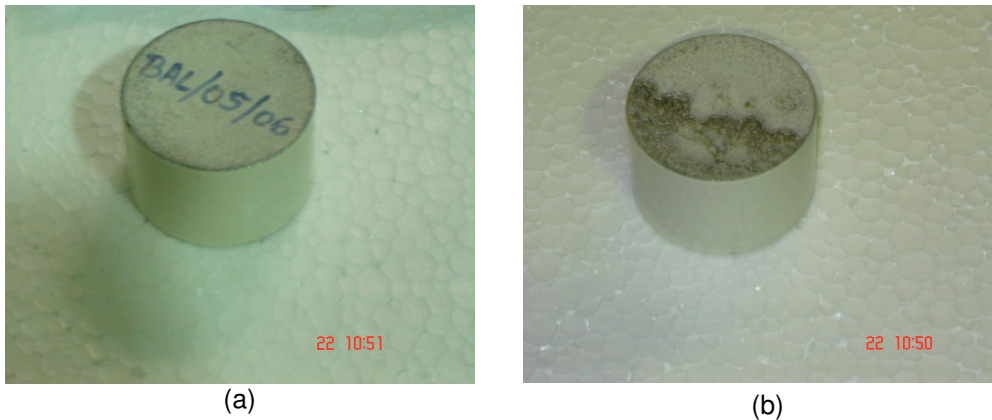


Figura 53 – Detalhe do varistor (a) parte superior do varistor; (b) parte inferior do varistor.

Em relação aos gráficos podemos afirmar que os varistores se degradaram, pois houve um aumento da corrente resistiva, potência, capacitância, tangente δ e correntes de polarização/despolarização, evidenciando essa degradação. Podendo ter ocorrido uma alteração na concentração e tipo de defeitos na camada intergranular gerando com isso uma diminuição da barreira de potencial e conseqüentemente um envelhecimento no varistor, na região de baixas correntes.

Nas Figuras 54 a 58 estão apresentados os gráficos comparativos das curvas característica “tensão x corrente total”, “tensão x corrente resistiva” e “tensão x perdas resistivas”, curva característica “tensão x capacitância” e “tensão x tangente δ ”.

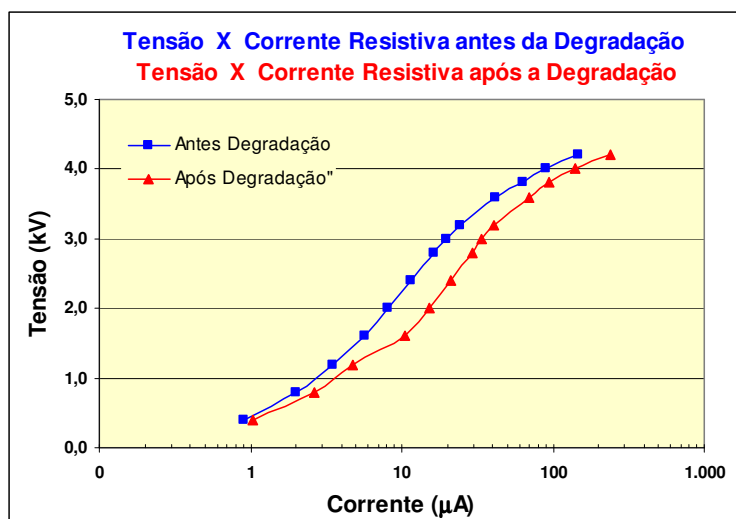


Figura 54 – Gráfico comparativo da curva característica tensão x corrente resistiva antes e após a degradação por ciclos de impulsos atmosféricos.

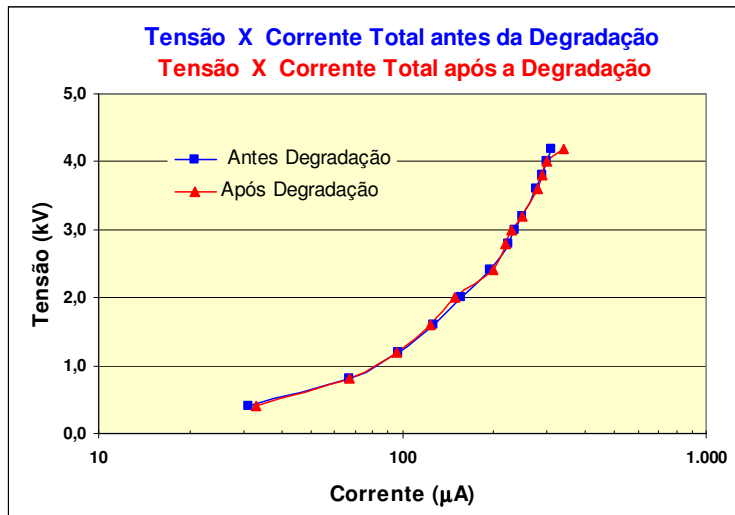


Figura 55 – Gráfico comparativo da curva característica tensão x corrente total antes e após a degradação por ciclos de impulsos atmosféricos.

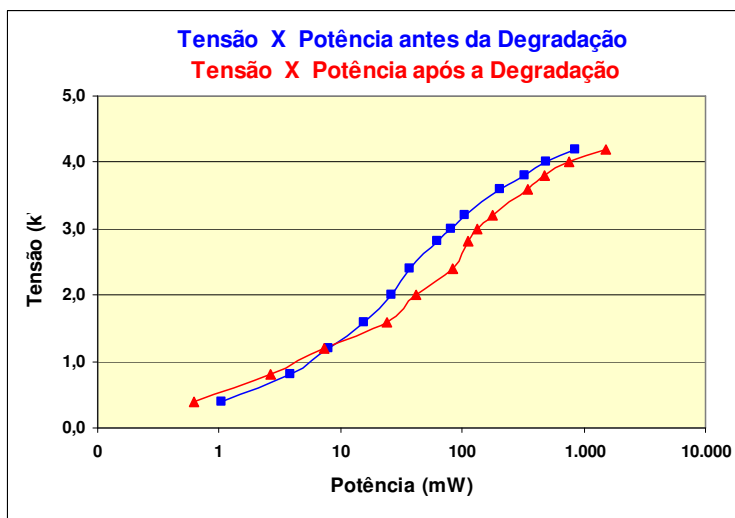


Figura 56 – Gráfico comparativo da curva característica tensão x potência antes e após a degradação por ciclos de impulsos atmosféricos.

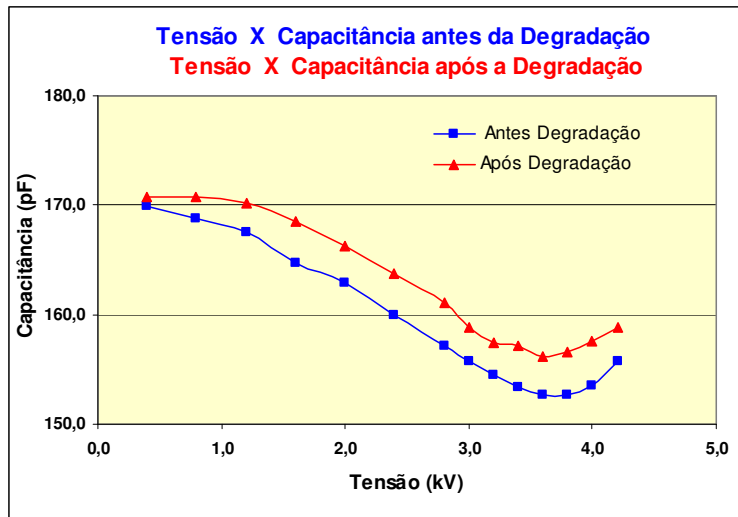


Figura 57 – Gráfico comparativo da curva característica tensão x capacitância antes e após a degradação por ciclos de impulsos atmosféricos.

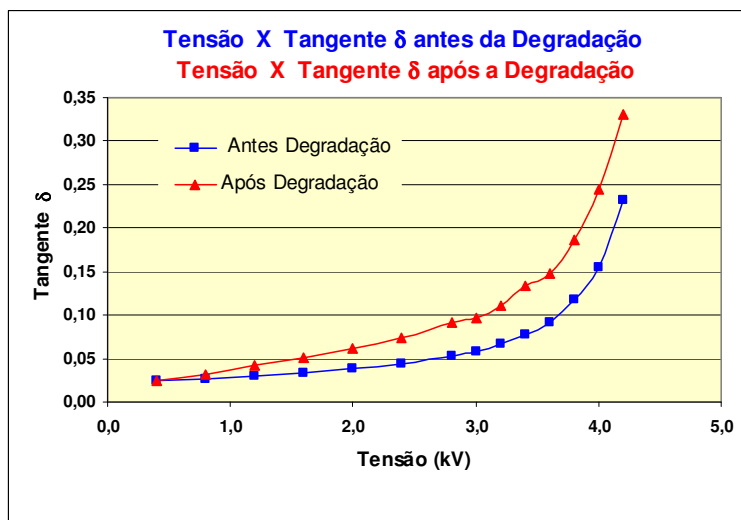
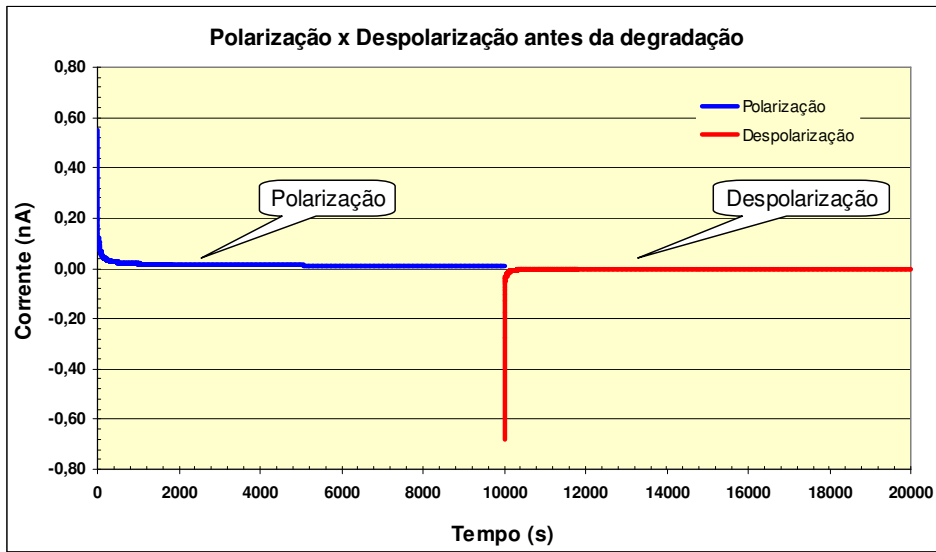
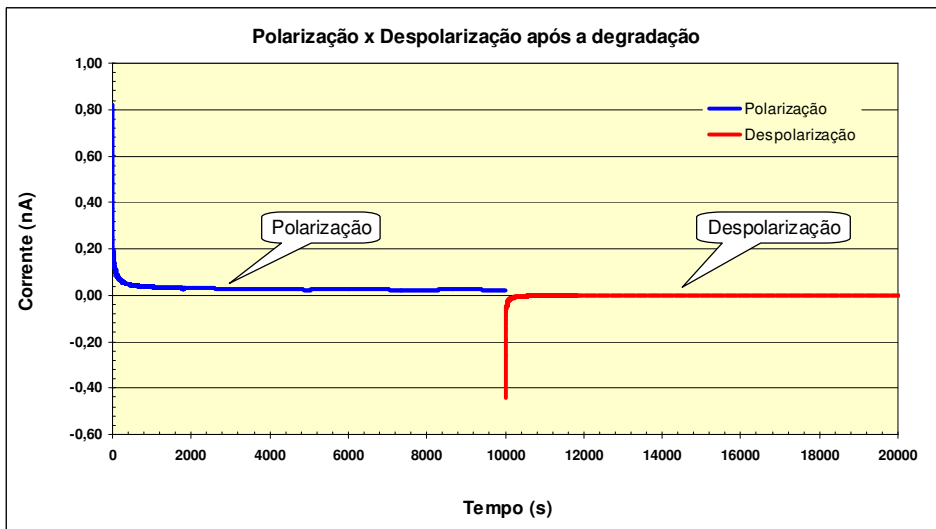


Figura 58 – Gráfico comparativo da curva característica tensão x tangente δ antes e após a degradação por ciclos de impulsos atmosféricos.



(a)



(b)

Figura 59 – Gráfico de polarização/despolarização antes (a) e após (b) a degradação.

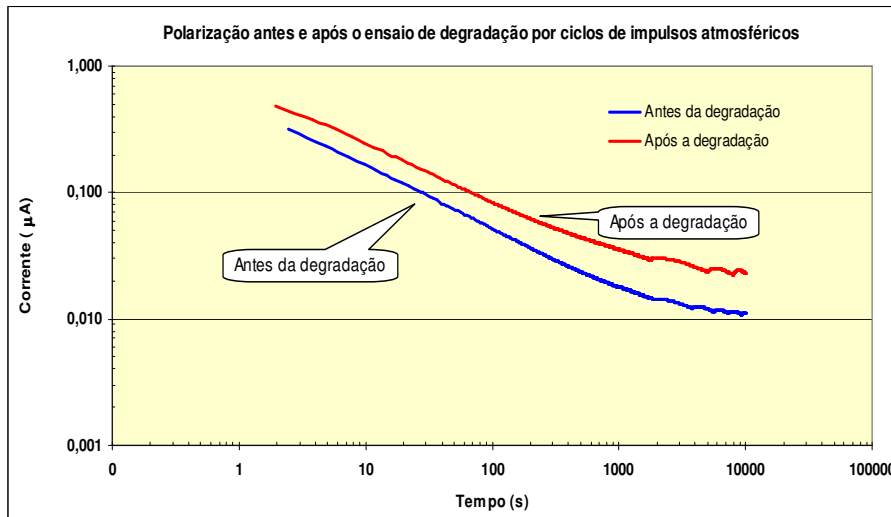


Figura 60 – Gráfico comparativo da corrente de polarização antes e após a degradação.

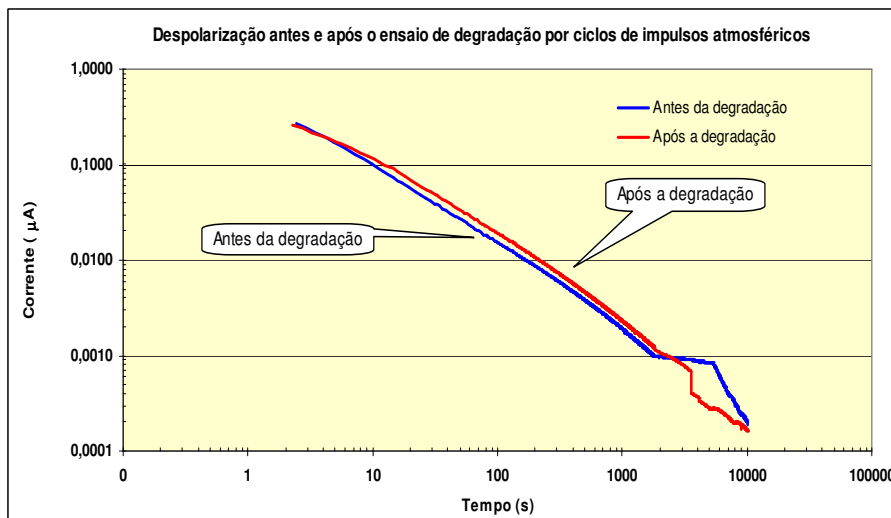


Figura 61 – Gráfico comparativo da corrente de despolarização antes e após a degradação.

4.1.3. Bloco varistor 16

Resultados dos ensaios antes e após a degradação do varistor por ciclo de descargas atmosféricas:

- Curva característica tensão x capacitância e tensão x tangente δ (Tabela 12);
- Curva característica tensão x corrente, tensão x corrente resistiva e tensão x potência (Tabela 13);
- Tensão residual e tensão de referência (Tabela 14).

Devido à ocorrência de uma descarga externa no bloco varistor no ensaio de degradação por ciclo de descargas atmosféricas (Figura 56), não foi possível realizar as medições das curvas características e da tensão de referência após o ensaio de degradação por ciclo de descargas atmosféricas.

Podemos observar da Tabela 12 os valores dos 2 pontos medidos após a degradação que a capacitância aumentou em média 35 % e para a tangente δ o aumento foi muito elevado em relação às medições iniciais, evidenciando assim uma degradação no varistor.

Tabela 12 - Resultado do ensaio da curva característica tensão X capacitância e tensão x tangente δ antes e após a degradação.

Tensão (kV)	Amostra 16			
	Capacitância (pF)		Tangente δ	
	Antes	Após	Antes	Após
0,4	207,4	281,9	0,027	0,559
0,8	207,2	279,0	0,030	1,11
1,2	206,2	-----	0,034	-----
1,6	203,2	-----	0,039	-----
2,0	200,6	-----	0,044	-----
2,4	197,2	-----	0,051	-----
2,8	193,1	-----	0,061	-----
3,0	191,6	-----	0,068	-----
3,2	187,5	-----	0,077	-----
3,4	187,6	-----	0,093	-----
3,6	185,5	-----	0,111	-----
3,8	186,6	-----	0,145	-----
4,0	188,2	-----	0,205	-----
4,2	191,7	-----	0,323	-----

Podemos observar que nas medições da corrente e potência, quanto mais a tensão se aproximava da tensão nominal do varistor, maior o aumento desses parâmetros.

Tabela 13 - Resultado do ensaio da curva característica tensão x corrente tensão x corrente resistiva e tensão x potência antes e após a degradação.

Amostra 16						
Tensão (kV)	Corrente				Potência (mW)	
	Total (µA)		Resistiva (µA)		Antes	Após
	Antes	Após	Antes	Após		
0,4	38,8	-----	0,8	-----	0,9	-----
0,8	77,6	-----	2,1	-----	3,4	-----
1,2	119,4	-----	3,2	-----	8,4	-----
1,6	156,7	-----	6,0	-----	16,1	-----
2,0	186,6	-----	8,7	-----	28,1	-----
2,4	240,2	-----	15,5	-----	50,9	-----
2,8	272,0	-----	22,3	-----	84,9	-----
3,0	285,0	-----	26,6	-----	108,9	-----
3,2	300,3	-----	33,7	-----	147,8	-----
3,6	333,8	-----	63,2	-----	311,3	-----
3,8	349,6	-----	93,8	-----	466,4	-----
4,0	363,6	-----	144,0	-----	799,3	-----
4,2	378,1	-----	258,0	-----	1.517,9	-----

Observamos que os resultados de tensão residual não apresentou nenhum aumento relevante em relação às medições antes da degradação. Aparentemente não houve mudança nas suas características na região de alta corrente. Não foi possível medir a tensão de referência após o ensaio de degradação devido à descarga externa no varistor.

Tabela 14 - Resultado do ensaio da tensão residual e da tensão de referência.

Amostra 16				
	Antes		Após	
	Tensão (kV)	Corrente (kA)	Tensão (kV)	Corrente (kA)
Tensão residual 8/20 µs	10,9	10,2	10,7	10,7
Tensão de referência a 1 mA	4,5	0,001	-----	-----

Na Figura 62 podemos observar em detalhes o varistor 16, logo após o ensaio de degradação por ciclos de impulso atmosférico.

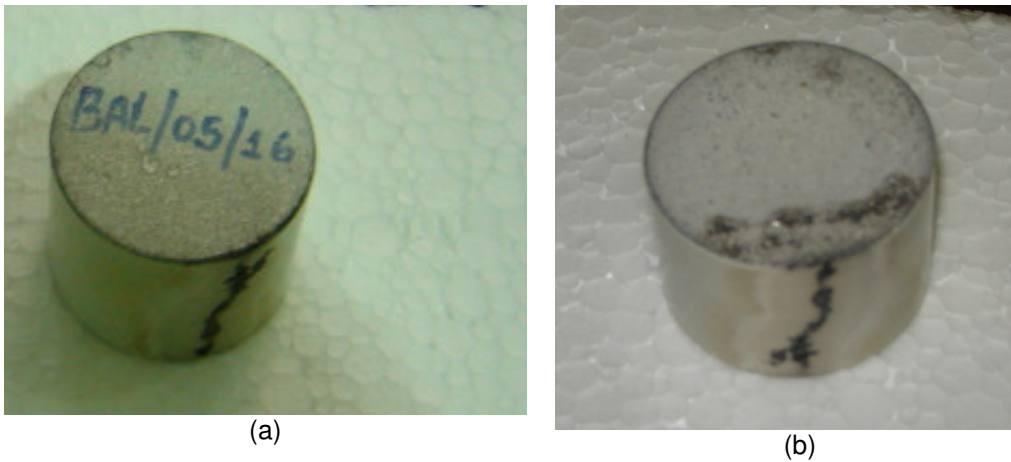


Figura 62 – Detalhe da parte superior do varistor (a), detalhe da parte inferior do varistor (b).

Nas Figuras 63 a 66 estão apresentados os gráficos das curvas característica “tensão x corrente total”, “tensão x corrente resistiva” e “tensão x potência”, curva característica “tensão x capacitância” e “tensão x tangente de δ ” antes da degradação do varistor.

Observamos que a capacitância diminui com o aumento da tensão aplicada, até próximo a tensão nominal do varistor quando aumenta novamente, que pode ser observado na Figura 65.

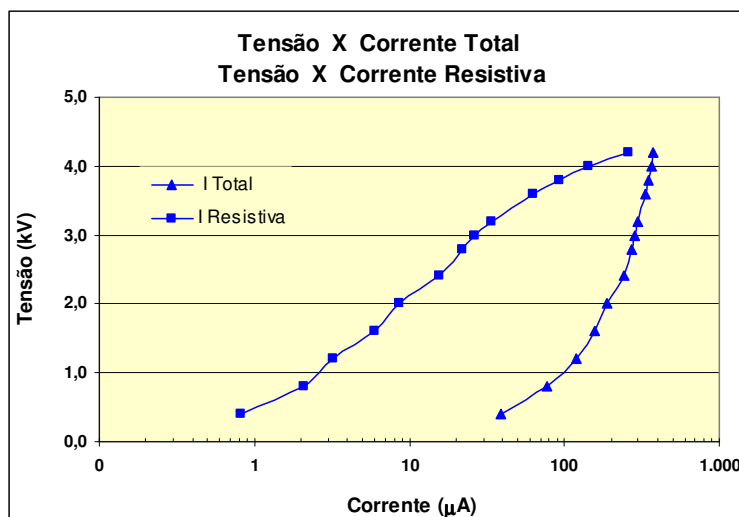


Figura 63 – Gráfico da tensão x corrente total e tensão x corrente resistiva.

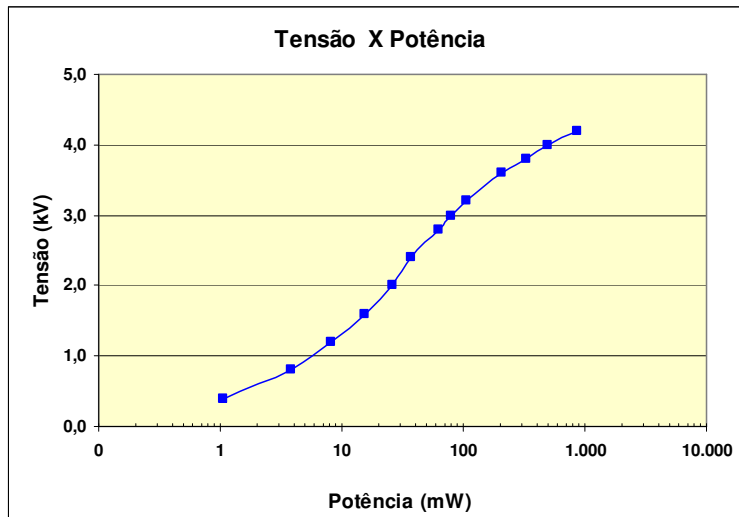


Figura 64 – Gráfico da tensão x potência.

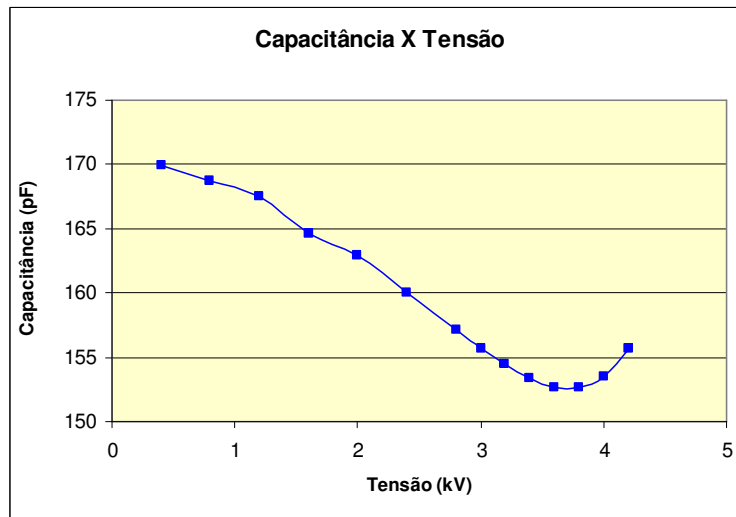


Figura 65 – Gráfico da tensão x capacitância.

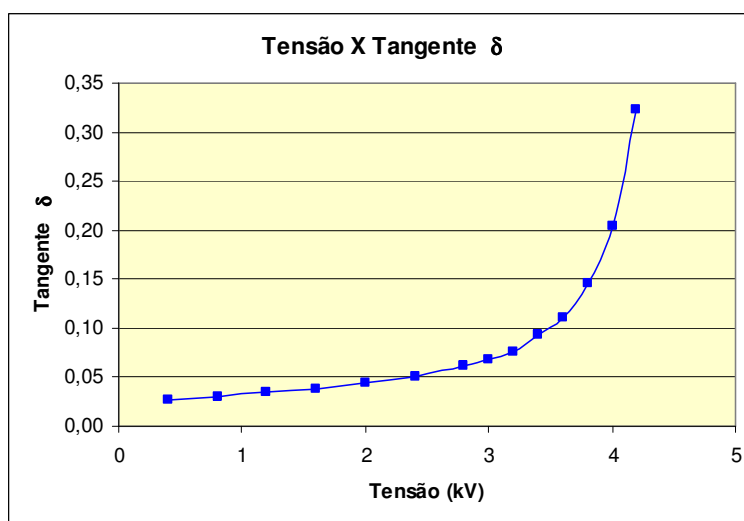


Figura 66 – Gráfico da tensão x tangente δ .

4.1.4. Bloco varistor 22

Devido a ocorrência de uma descarga externa pelo varistor no ensaio de degradação por ciclo de descargas atmosféricas e por aparentar estar mais degradado do que os outros varistores o bloco 22 foi escolhido para as observações metalográficas. Na Figura 67 podemos observar o varistor após o ensaio de degradação.

As fotos micrografias estão apresentadas na Figura 68 e na Figura 69 apresentamos o EDS. Podemos observar que comparativamente (em relação ao varistor 04) a micrografia do varistor 22 após degradação não apresentou diferença em sua microestrutura em relação ao varistor degradado.

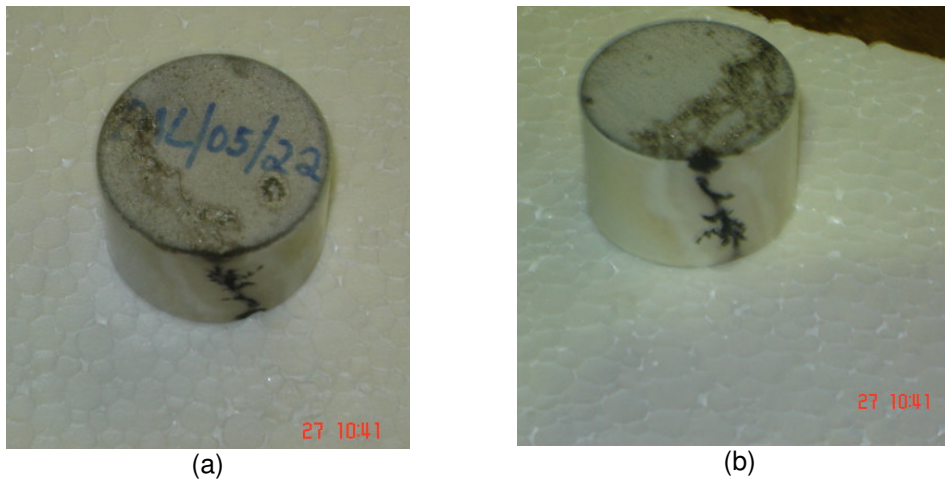
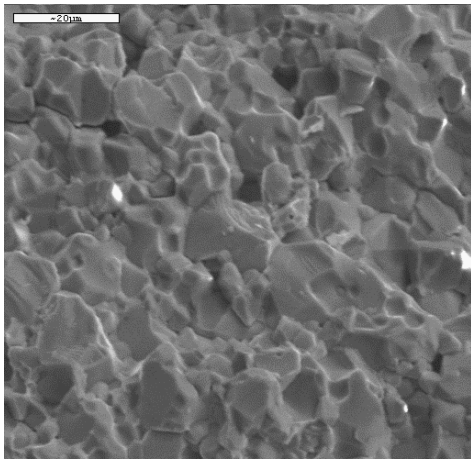
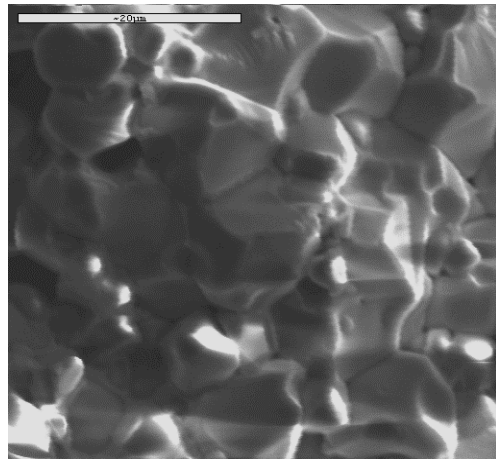


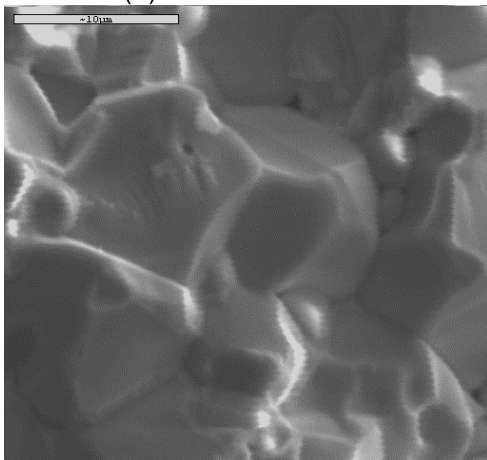
Figura 67 – Detalhe da parte superior do varistor (a), detalhe da parte inferior do varistor (b).



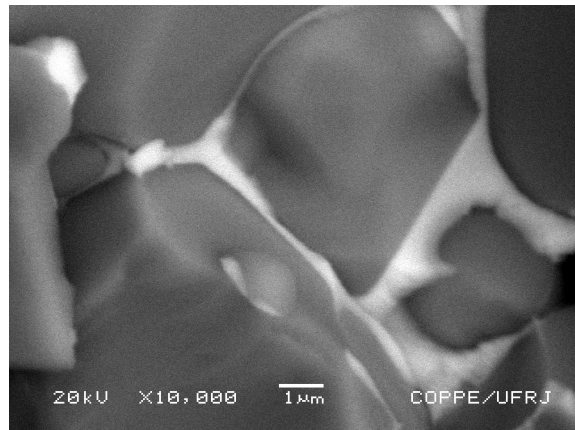
(a) Aumento 1000x



(b) Aumento 2000x



(c) Aumento 3000x



(d) Aumento 10000x

Figura 68 - Fotomicrografia (MEV) da superfície de fratura do varistor 22.

Verificamos que na análise do EDS os principais elementos que compõem o varistor estão presentes na análise.

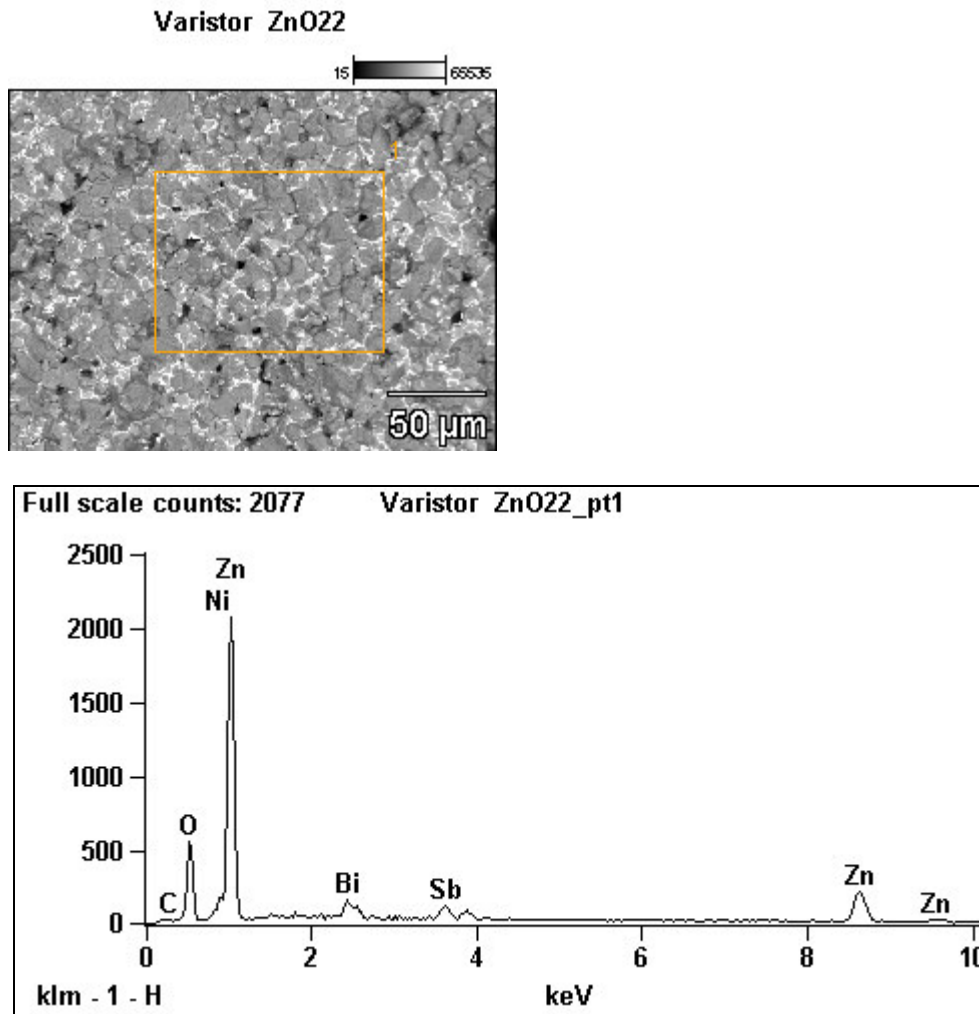


Figura 69 - Resultado da análise química elemental do EDS, do varistor 22.

4.2. Degradação dos varistores por impulsos de múltiplas descargas

A Figura 70 mostra os blocos varistores, 10, 11, 12 e 13, antes de sofrerem a degradação por impulso de múltiplas descargas. Nas Tabelas de 15 a 23 e nas Figuras de 71 a 89 são apresentados todos os resultados dos ensaios e os gráficos comparativos dos resultados antes e após a degradação das amostras 10, 11 e 12 por impulso de múltiplas descargas. Nas Figuras 90 e 91 são apresentados a foto e os resultados das micrografias e EDS, da amostra 13.



Figura 70 – A Figura mostra os varistores 10, 11, 12 e 13 antes do ensaio de degradação.

4.2.1. Bloco varistor 10

Resultados dos ensaios antes e após a degradação do varistor por impulsos de múltiplas descargas:

- Curva característica tensão x capacitância e tensão x tangente δ (Tabela 15);
- Curva característica tensão x corrente, tensão x corrente resistiva e tensão x potência (Tabela 16);
- Tensão residual e tensão de referência (Tabela 17).

Devido à ocorrência de uma descarga externa pela superfície lateral do bloco varistor no ensaio de degradação por impulsos de múltiplas descargas (Figura 71) não foi possível realizar as medições das curvas características e da tensão de referência após o ensaio de degradação por ciclo de descargas atmosféricas.

Podemos observar pelos resultados da Tabela 15 que os valores nos três pontos medidos que a capacitância diminuiu e logo aumentou ocorrendo o efeito inverso das medições iniciais. No entanto na tangente δ o aumento foi muito elevado em relação às medições iniciais, evidenciando assim uma degradação no varistor.

Tabela 15 - Resultado do ensaio da Curva Característica Tensão x Capacitância antes e após a degradação.

Tensão (kV)	Amostra 10			
	Capacitância (pF)		Tangente δ	
	Antes	Após	Antes	Após
0,4	161,0	145,6	0,031	0,038
0,8	161,0	154,3	0,034	0,166
1,2	160,8	163,6	0,038	0,342
1,6	159,5	-----	0,043	-----
2,0	157,4	-----	0,049	-----
2,4	154,3	-----	0,055	-----
2,8	152,1	-----	0,064	-----
3,0	151,1	-----	0,071	-----
3,2	149,4	-----	0,079	-----
3,4	147,7	-----	0,092	-----
3,6	147,8	-----	0,114	-----
3,8	147,9	-----	0,142	-----
4,0	149,9	-----	0,211	-----
4,2	152,5	-----	0,319	-----

Podemos observar que nas medições iniciais da corrente e potência, quanto mais a tensão se aproximava da tensão nominal do varistor havia um aumento progressivo desses parâmetros.

Tabela 16 - Resultado do ensaio da Curva Característica Tensão X Corrente antes e após a degradação.

Amostra 10						
Tensão (kV)	Corrente				Potência (mW)	
	Total (μA)		Resistiva (μA)		Antes	Após
	Antes	Após	Antes	Após		
0,4	37,6	-----	0,9	-----	0,8	-----
0,8	67,7	-----	2,1	-----	2,7	-----
1,2	92,7	-----	3,4	-----	6,2	-----
1,6	122,8	-----	5,4	-----	12,7	-----
2,0	157,9	-----	7,1	-----	22,4	-----
2,4	188,0	-----	13,3	-----	43,7	-----
2,8	214,9	-----	18,9	-----	72,1	-----
3,0	227,0	-----	22,3	-----	91,0	-----
3,2	240,9	-----	28,9	-----	126,6	-----
3,6	265,7	-----	53,5	-----	262,9	-----
3,8	275,6	-----	77,3	-----	406,7	-----
4,0	286,4	-----	119,1	-----	663,8	-----
4,2	316,8	-----	231,4	-----	1.377,7	-----

Observamos que os resultados de tensão residual não apresentaram aumento relevante em relação à medição antes da degradação. Aparentemente não houve mudança nas suas características na região de alta corrente. Não foi possível medir a tensão de referência após o ensaio de degradação devido a descarga externa no varistor.

Tabela 17 - Resultado do ensaio da tensão residual e da tensão de referência.

Amostra 10				
	Antes		Após	
	Tensão (kV)	Corrente (kA)	Tensão (kV)	Corrente (kA)
Tensão residual 8/20 μs	11,4	10,1	11,2	9,5
Tensão de referência a 1 mA	4,4	0,001	-----	-----

Na Figura 71 podemos observar em detalhes o varistor 10, logo após o ensaio de degradação por impulsos de múltiplas descargas.



Figura 71 – Detalhe da parte superior do varistor 10 (a), e detalhe da descarga pela superfície lateral do varistor 10 (b).

Nas Figuras 72 a 75 estão apresentados os gráficos das curvas características “tensão x corrente total”, “tensão x corrente resistiva” e “tensão x perdas resistivas”, curva característica “tensão x capacitância” e “ tensão x tangente de δ ”.

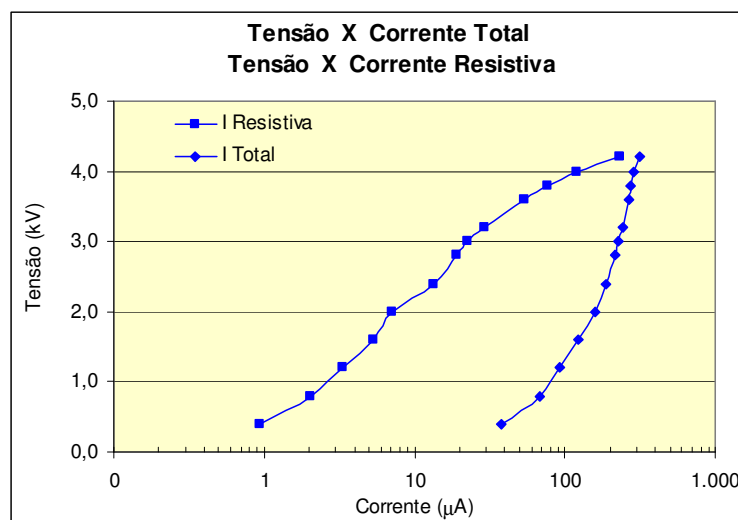


Figura 72 – Gráfico da tensão x corrente total e tensão x corrente resistiva.

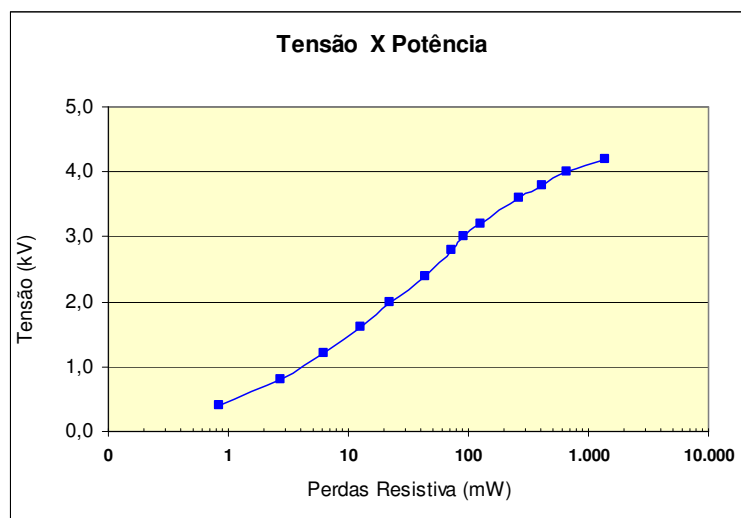


Figura 73 – Gráfico da tensão x potência.

Pela Figura 74 podemos observar que há uma diminuição da capacitância para valores mais baixos de tensão aplicada e quando a tensão se eleva até próximo a tensão de referência do varistor a capacitância volta a aumentar.

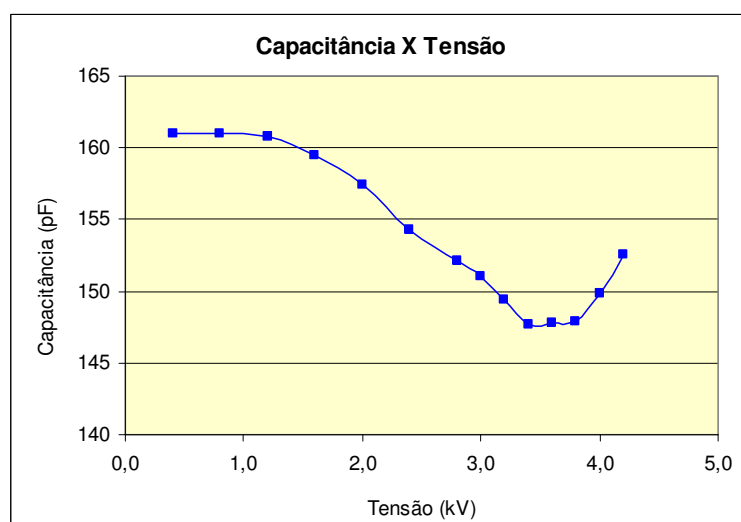


Figura 74 – Gráfico da capacitância x tensão.

Pela Figura 75 podemos observar que há um aumento da tangente δ até próximo à tensão de referência do varistor, que pode ser explicado pela diminuição da resistividade do varistor.

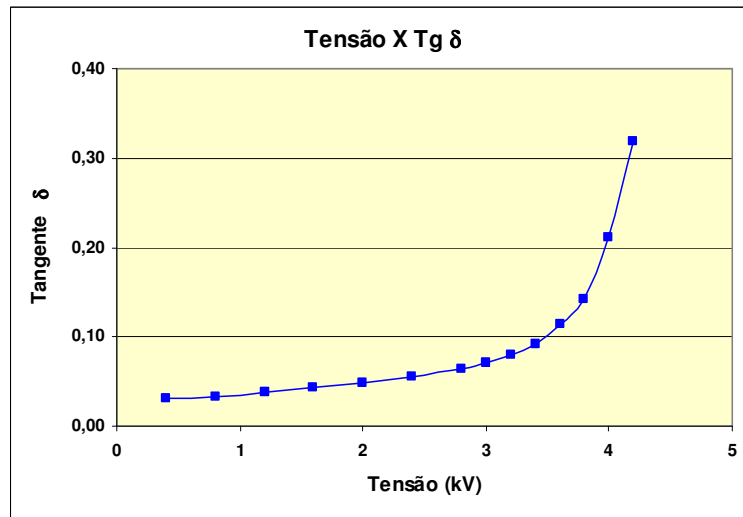


Figura 75 – Gráfico da tangente δ x tensão.

4.2.3. Bloco Varistor 11

Resultados dos ensaios antes e após a degradação do varistor por impulsos de múltiplas descargas:

- Curva característica tensão x capacitância e tensão x tangente δ (Tabela 18);
- Curva característica tensão x corrente, tensão x corrente resistiva e tensão x potência (Tabela 19);
- Tensão residual e tensão de referência (Tabela 20).
- Polarização/despolarização

Podemos observar pelos resultados da Tabela 18 que os valores de capacitância diminuíram após a degradação o que não é o esperado. No entanto na tangente δ o valor foi um pouco maior que nas medições iniciais.

Tabela 18 - Resultado do ensaio da Curva Característica Tensão x Capacitância antes e após a degradação.

Tensão (kV)	Amostra 11			
	Capacitância (pF)		Tangente δ	
	Antes	Após	Antes	Após
0,4	154,4	139,4	0,023	0,024
0,8	154,4	139,5	0,026	0,028
1,2	153,9	138,8	0,030	0,033
1,6	153,3	138,1	0,034	0,038
2,0	150,8	137,2	0,039	0,043
2,4	148,4	136,4	0,045	0,053
2,8	145,9	135,2	0,054	0,063
3,0	145,0	134,8	0,060	0,070
3,2	143,8	134,4	0,068	0,079
3,4	142,1	134,3	0,080	0,093
3,6	141,9	134,2	0,100	0,111
3,8	141,6	134,7	0,131	0,139
4,0	142,8	135,9	0,183	0,194
4,2	145,4	138,0	0,303	0,293

Podemos observar que nas medições iniciais da corrente e potência, quanto mais à tensão se aproximava da tensão de referência do varistor há um aumento progressivo nesses parâmetros.

Tabela 19 - Resultado do ensaio da Curva Característica Tensão X Corrente antes e após a degradação.

Amostra 11						
Tensão (kV)	Corrente				Potência (mW)	
	Total (μA)		Resistiva (μA)		Antes	Após
	Antes	Após	Antes	Após		
0,4	29,9	32,0	0,7	1,0	0,8	0,6
0,8	62,7	62,0	1,6	2,6	2,9	2,7
1,2	89,6	92,0	2,8	4,7	6,7	7,4
1,6	119,4	122,0	4,5	8,0	13,0	16,1
2,0	141,8	152,0	5,6	13,8	21,8	38,6
2,4	178,2	190,0	9,9	18,6	33,0	62,1
2,8	200,8	200,0	13,8	24,0	52,9	95,7
3,0	214,5	220,0	17,6	29,6	72,4	121,7
3,2	226,6	240,0	22,3	38,4	97,0	159,5
3,6	252,3	260,0	43,4	70,8	213,3	331,6
3,8	261,3	270,0	64,1	99,0	334,3	520,4
4,0	271,3	280,0	101,8	190,0	564,4	1.057,6
4,2	289,6	490,0	208,3	400,0	1.229,5	1.343,0

Observamos que os resultados de tensão residual e da tensão de referência não apresentaram aumento relevante em relação à medição antes da degradação. Aparentemente não houve mudança nas suas características na região de alta corrente e na região de altamente não linear.

Tabela 20 - Resultado do ensaio da tensão residual e da tensão de referência.

Amostra 11				
	Antes		Após	
	Tensão (kV)	Corrente (kA)	Tensão (kV)	Corrente (kA)
Tensão residual 8/20 μs	11,6	10,1	11,5	9,1
Tensão de referência a 1 mA	4,4	0,001	4,3	0,001

Na Figura 76 podemos observar em detalhes o varistor 11, logo após o ensaio de degradação por impulsos de múltiplas descargas.



Figura 76 – Detalhe da parte superior do varistor 11.

Nas Figuras 75 a 84 estão apresentados os gráficos comparativos das medições antes e após a degradação dos varistores, as curvas características “tensão x corrente total”, “tensão x corrente resistiva” e “tensão x perdas resistivas” e as curvas características “tensão x capacitância” e “tensão x tangente δ ”.

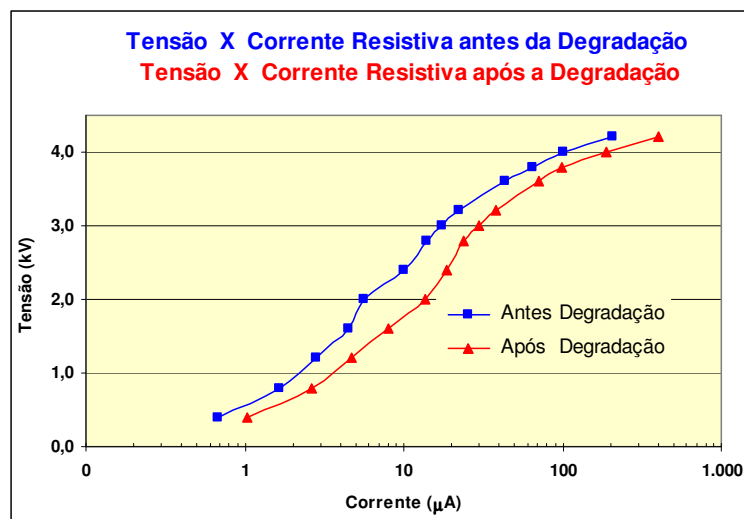


Figura 77 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x corrente resistiva antes e após a degradação por impulsos de múltiplas descargas.

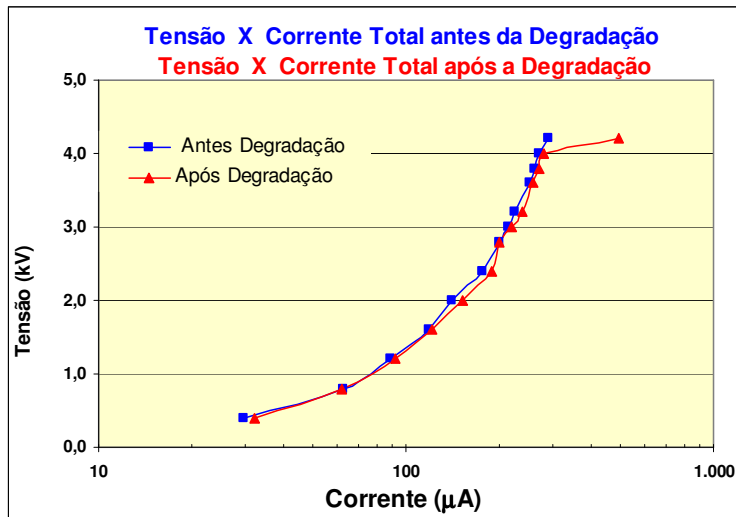


Figura 78 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x corrente total antes e após a degradação por impulsos de múltiplas descargas.

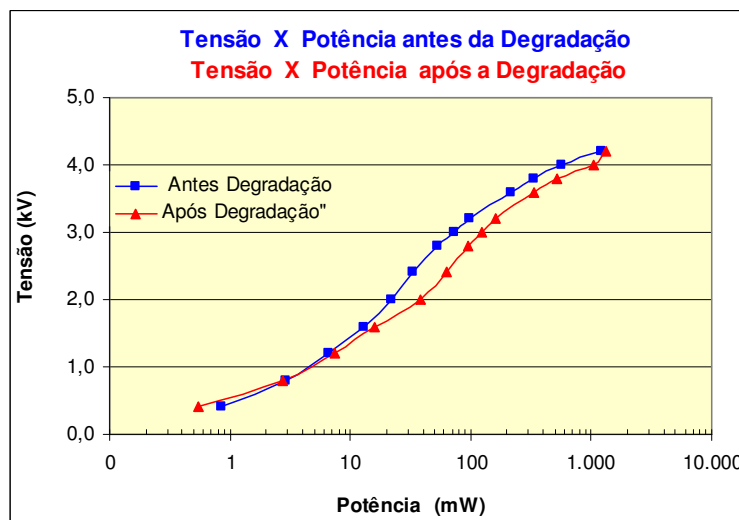


Figura 79 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x potência antes e após a degradação por impulsos de múltiplas descargas.

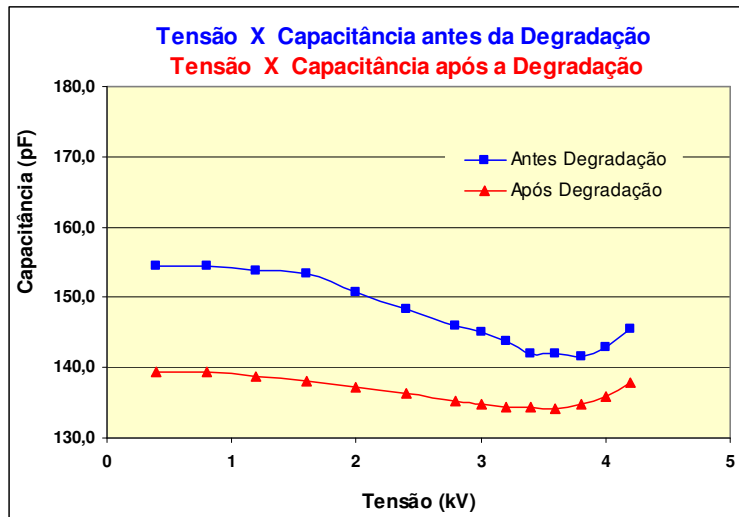


Figura 80 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x capacitância antes e após a degradação por impulsos de múltiplas descargas.

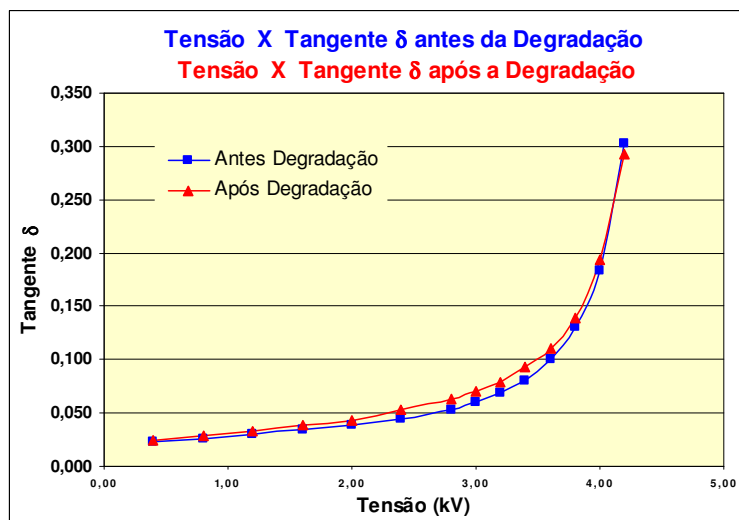
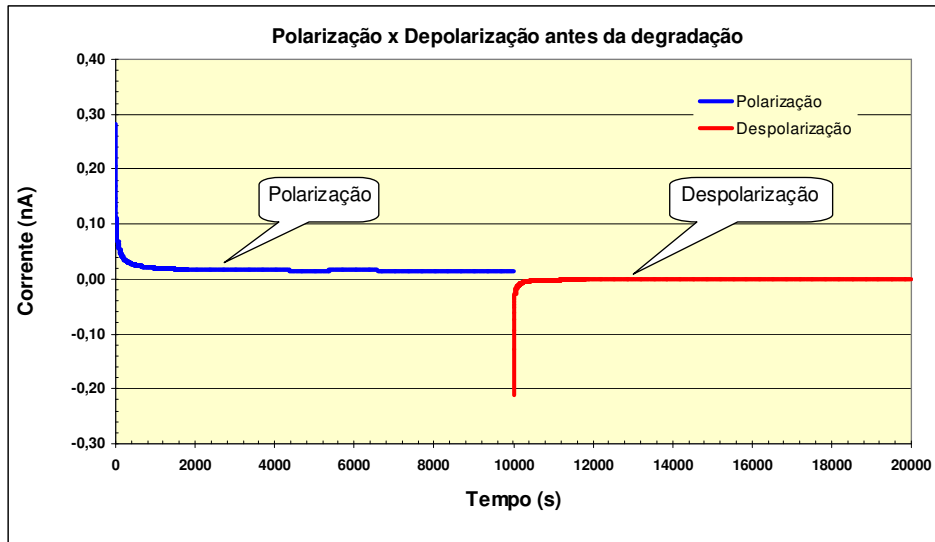
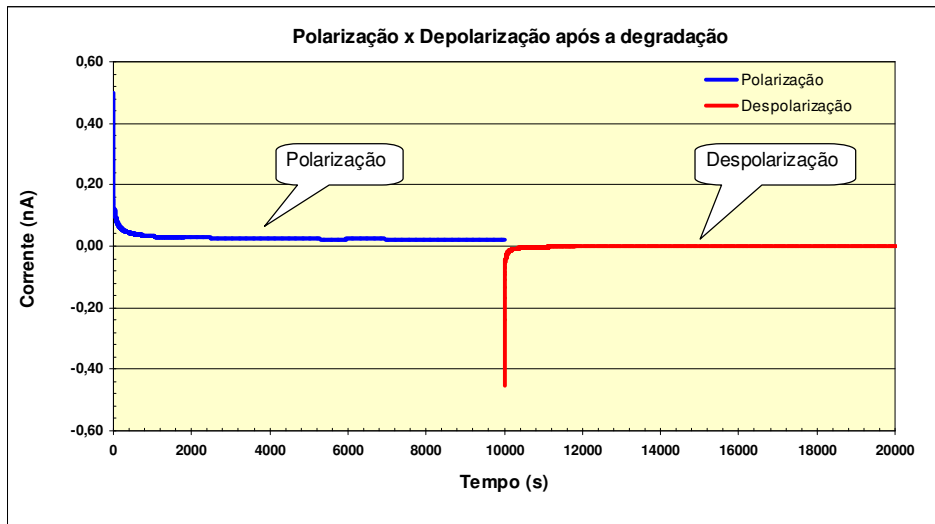


Figura 81 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x tangente δ antes e após a degradação por impulsos de múltiplas descargas .



(a)



(b)

Figura 82 - Gráfico de polarização/despolarização antes (a) e após (b) a degradação por impulsos de múltiplas descargas.

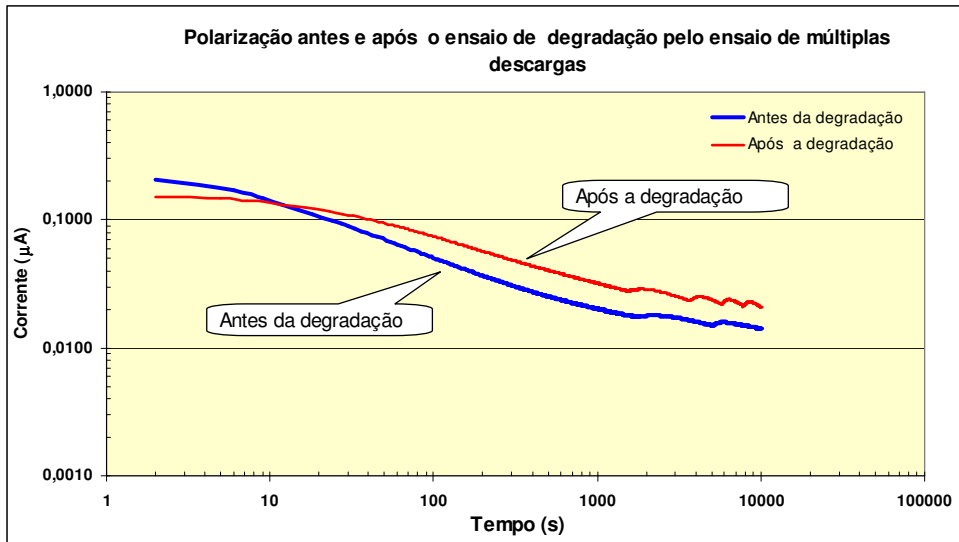


Figura 83 – Gráfico comparativo da corrente de polarização antes e após o ensaio de degradação por impulsos de múltiplas descargas.

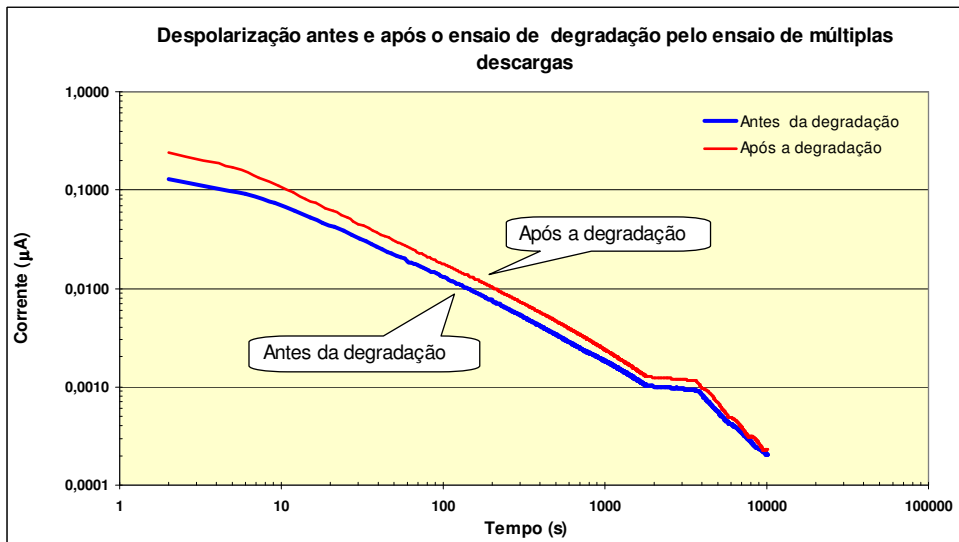


Figura 84 – Gráfico comparativo da corrente de despolarização antes e após o ensaio de degradação por impulsos de múltiplas descargas.

4.2.3. Bloco varistor 12

Resultados dos ensaios antes e após a degradação do varistor por impulsos de múltiplas descargas:

- Curva característica tensão x capacitância e tensão x tangente δ (Tabela 21);
- Curva característica tensão x corrente, tensão x corrente resistiva e tensão x potência (Tabela 22);
- Tensão residual e tensão de referência (Tabela 23).

Podemos observar pelos resultados da Tabela 21 que nas duas medidas realizadas a capacitância diminuiu após a degradação, o mesmo ocorrido com os varistores 10 e 11. No entanto na tangente δ o valor foi um pouco maior que nas medições iniciais.

Tabela 21 - Resultado do ensaio da Curva Característica Tensão x Capacitância antes e após a degradação.

Tensão (kV)	Amostra 12			
	Capacitância (pF)		Tangente δ	
	Antes	Após	Antes	Após
0,4	163,2	141,7	0,028	0,036
0,8	163,1	147,0	0,031	0,072
1,2	162,1	-----	0,035	-----
1,6	160,1	-----	0,039	-----
2,0	157,6	-----	0,043	-----
2,4	154,7	-----	0,050	-----
2,8	151,7	-----	0,058	-----
3,0	150,7	-----	0,066	-----
3,2	149,4	-----	0,073	-----
3,4	148,4	-----	0,086	-----
3,6	147,7	-----	0,106	-----
3,8	148,0	-----	0,140	-----
4,0	149,7	-----	0,200	-----
4,2	152,1	-----	0,323	-----

Podemos observar que nas medições iniciais da corrente e potência, quanto mais à tensão aplicada se aproximava da tensão de referência do varistor há um aumento aproximadamente exponencial nesses parâmetros.

Tabela 22 - Resultado do ensaio da Curva Característica Tensão X Corrente antes e após a degradação.

Amostra 12						
Tensão (kV)	Corrente				Potência (mW)	
	Total (μ A)		Resistiva (μ A)		Antes	Após
	Antes	Após	Antes	Após		
0,4	29,9	-----	0,7	-----	0,9	-----
0,8	62,7	-----	1,8	-----	2,8	-----
1,2	97,0	-----	3,3	-----	7,4	-----
1,6	119,4	-----	4,9	-----	13,5	-----
2,0	149,3	-----	7,2	-----	24,6	-----
2,4	190,6	-----	11,6	-----	38,0	-----
2,8	216,6	-----	16,5	-----	63,0	-----
3,0	228,8	-----	20,1	-----	82,2	-----
3,2	239,6	-----	25,1	-----	108,8	-----
3,6	266,0	-----	50,9	-----	249,4	-----
3,8	274,2	-----	69,6	-----	362,1	-----
4,0	285,7	-----	117,3	-----	651,5	-----
4,2	308,5	-----	222,7	-----	1.312,1	-----

Observamos que os resultados de tensão residual não apresentaram aumento relevante em relação à medição antes da degradação. Aparentemente não houve mudança nas suas características na região de alta corrente. A tensão de referência não foi medida devido à descarga externa do varistor.

Tabela 23 - Resultado do ensaio da tensão residual e da tensão de referência.

Amostra 12				
	Antes		Após	
	Tensão (kV)	Corrente (kA)	Tensão (kV)	Corrente (kA)
Tensão residual 8/20 μ s	11,3	10,2	10,8	11,0
Tensão de referência a 1 mA	4,4	0,001	-----	-----

Na Figura 85 podemos observar em detalhes o varistor 12, logo após o ensaio de degradação por impulsos de múltiplas descargas.

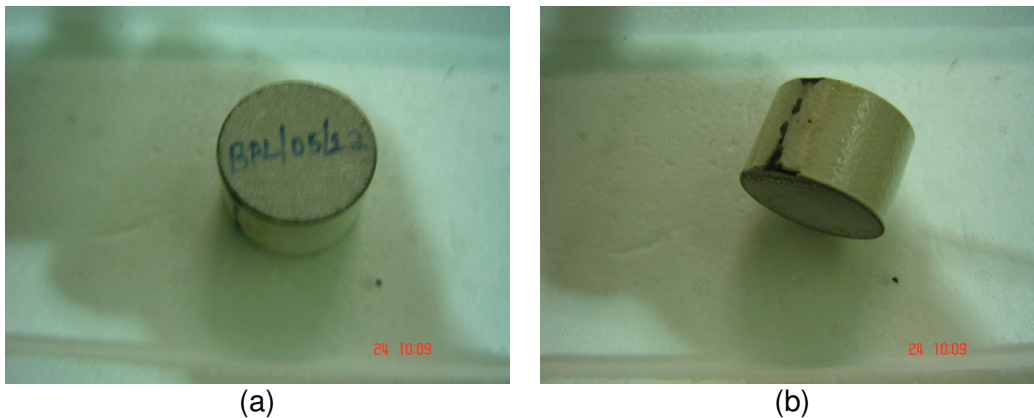


Figura 85 – Detalhe da parte superior do varistor 12 (a), e detalhe da descarga pela superfície lateral do varistor 12 (b).

Nas Figuras 86 a 89 estão apresentados os gráficos das medições antes da degradação dos varistores, as curvas características “tensão x corrente total”, “tensão x corrente resistiva” e “tensão x perdas resistivas” e as curvas características “tensão x capacitância” e “tensão x tangente δ ”.

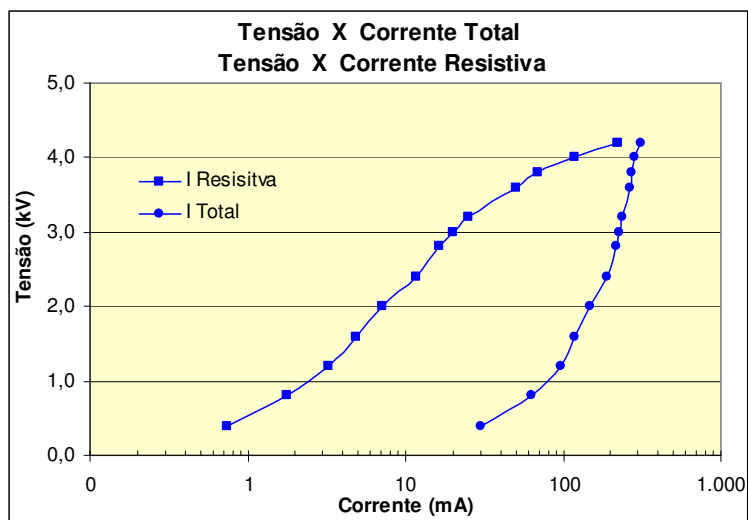


Figura 86 - Gráfico das curvas características “tensão x corrente total” e “tensão x corrente resistiva” antes da degradação por impulsos de múltiplas descargas.

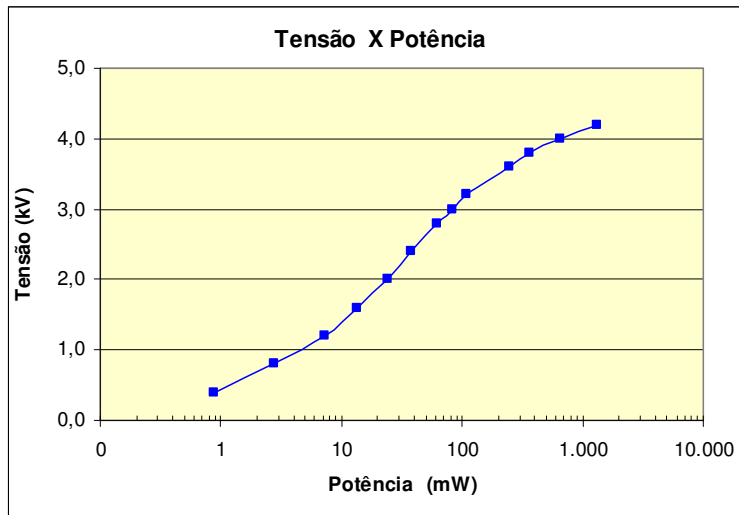


Figura 87 - Gráfico da curva característica “tensão x potência” antes da degradação por impulsos de múltiplas descargas.

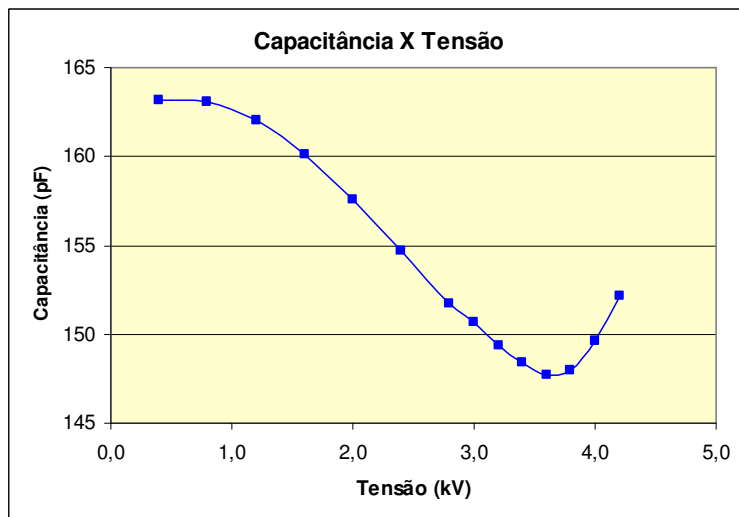


Figura 88 - Gráfico da curva característica “tensão x capacitância” antes da degradação por impulsos de múltiplas descargas.

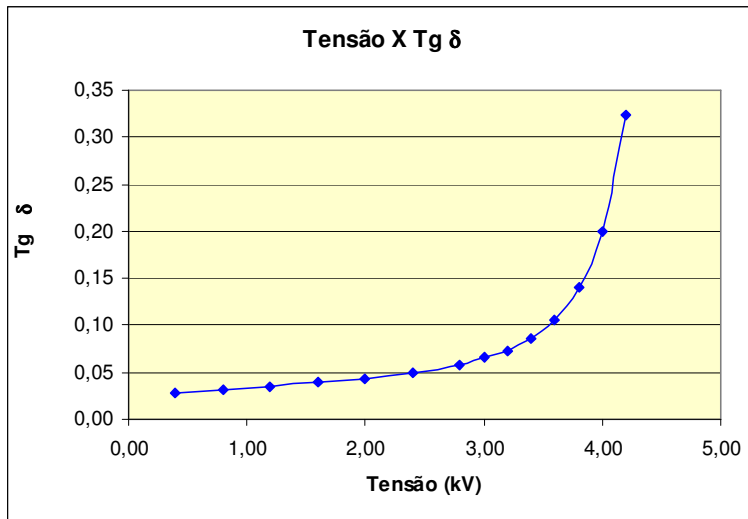


Figura 89 - Gráfico da curva característica “tensão x capacitância” antes da degradação por impulsos de múltiplas descargas.

4.2.4. Bloco varistor 13

Na Figura 90 podemos observar o varistor após o ensaio de degradação por impulsos de múltiplas descargas.

As fotomicrografias estão apresentadas na Figura 90 e na Figura 91 apresentamos o EDS. Podemos observar que comparativamente (em relação ao varistor 04) a micrografia do varistor 13 após o ensaio de degradação não apresentou nenhuma diferença em sua microestrutura em relação ao varistor que não foi degradado.

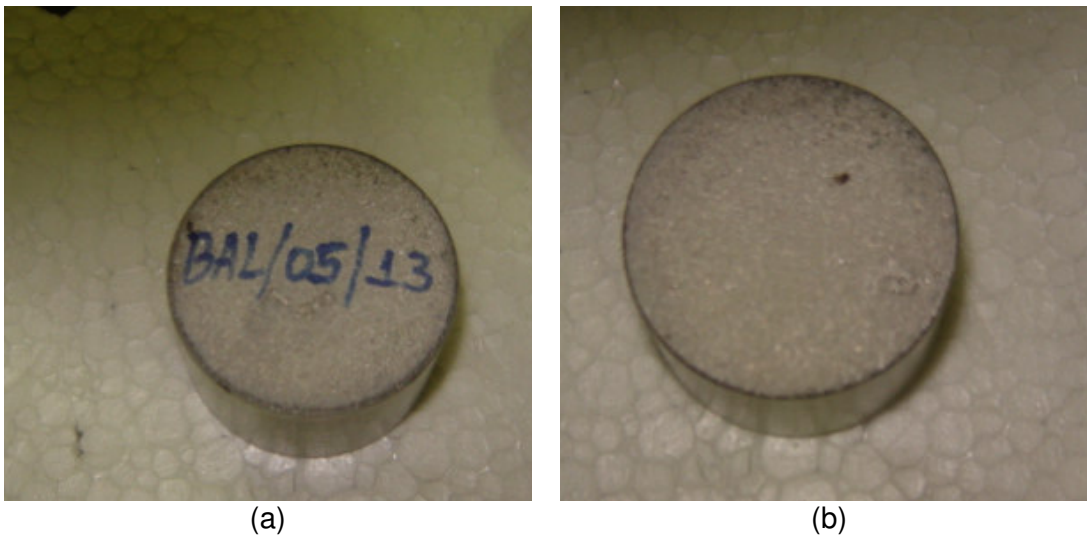
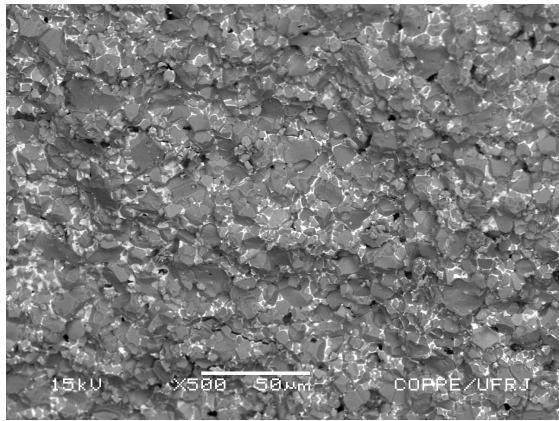
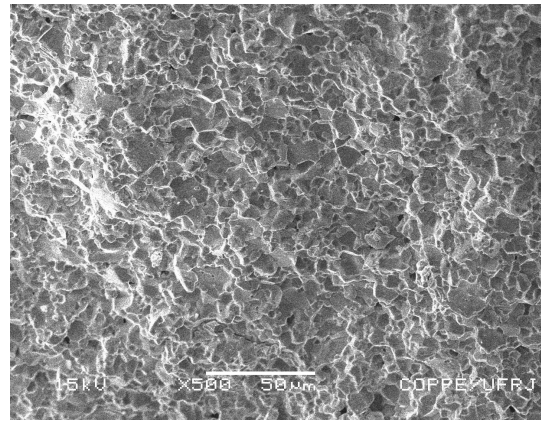


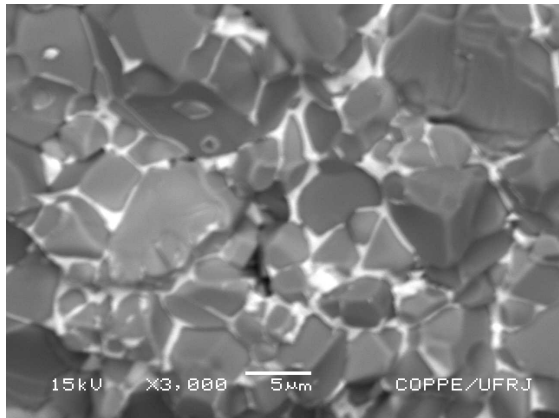
Figura 90 – Detalhe da parte superior do varistor 13 (a), detalhe da parte inferior do varistor 13 (b).



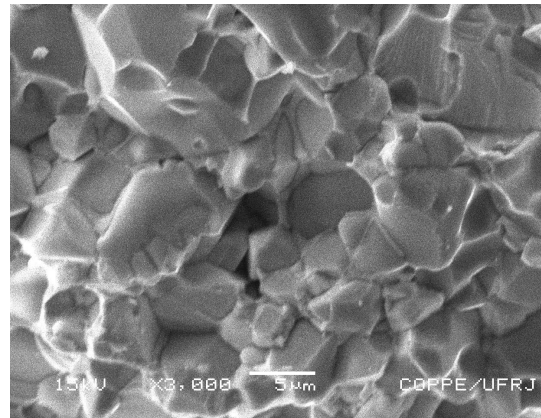
(a) Aumento 500x



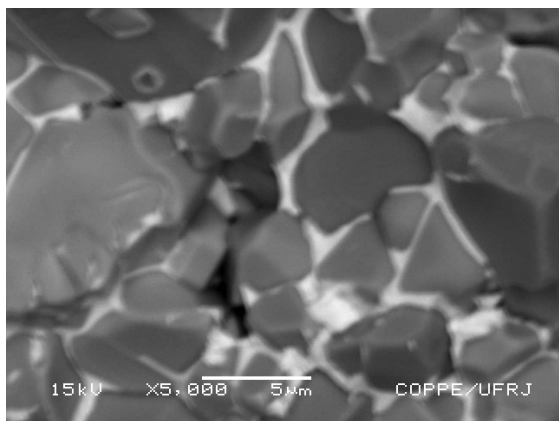
(b) Aumento 500x



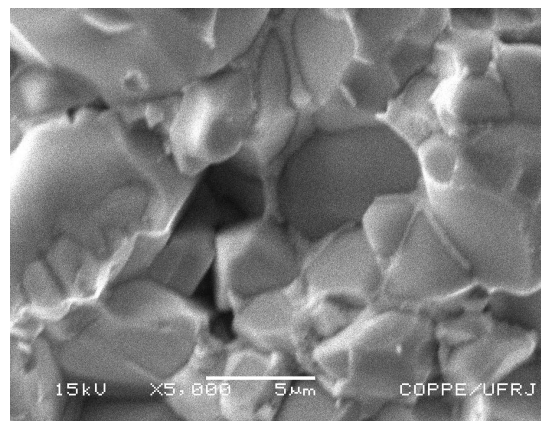
(c) Aumento 3000x



(d) Aumento 3000x



(e) Aumento 5000x



(f) Aumento 5000x

Figura 91 – Fotomicrografias (MEV) da superfície da fratura do varistor 13.

Verificamos que na análise do EDS os principais elementos que compõem o varistor 13 estão presentes na análise.

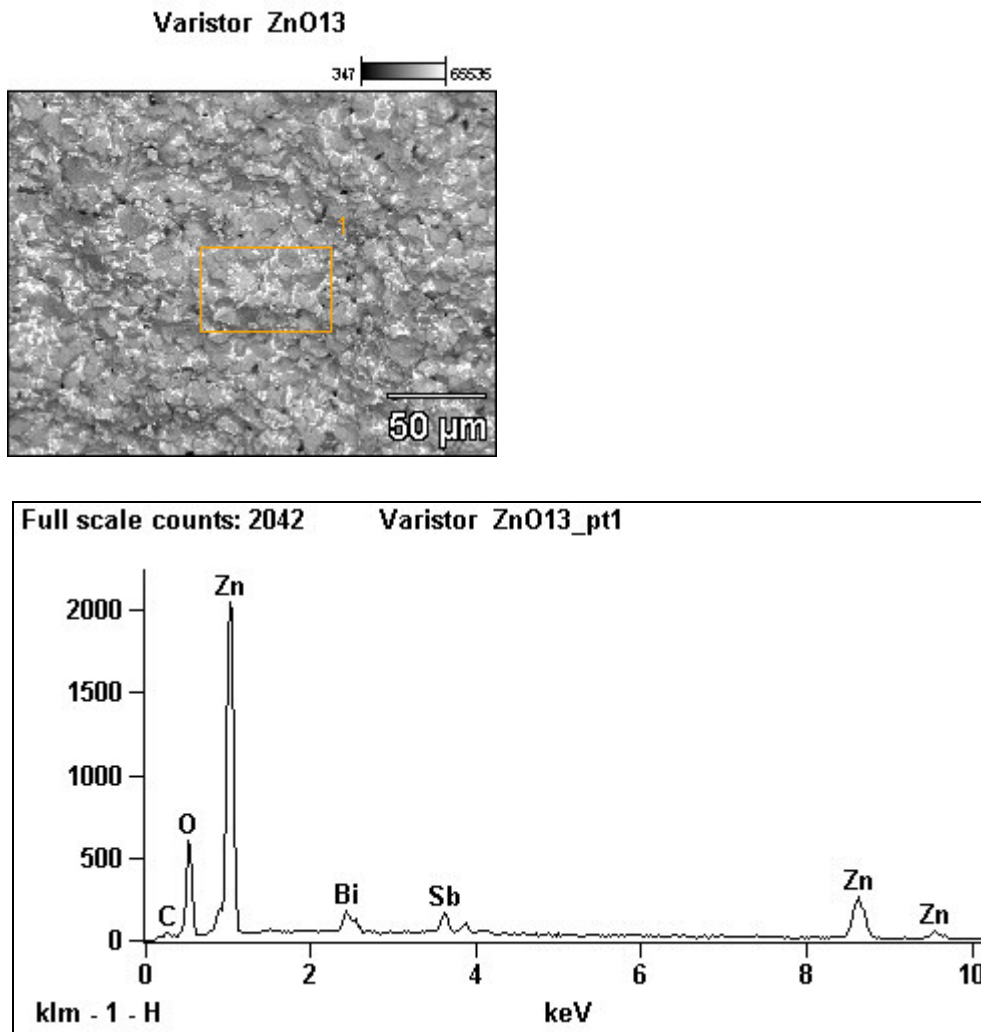
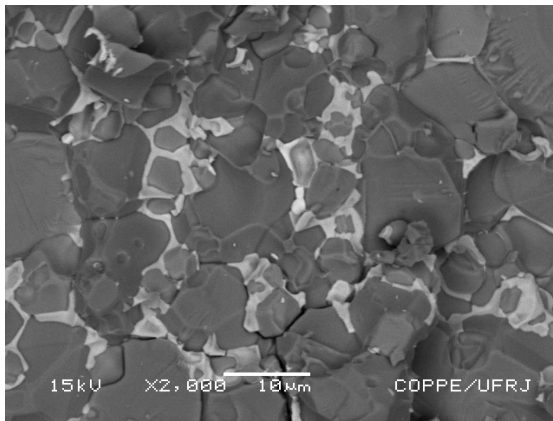


Figura 92 - Resultado da análise química elemental do EDS do varistor 13.

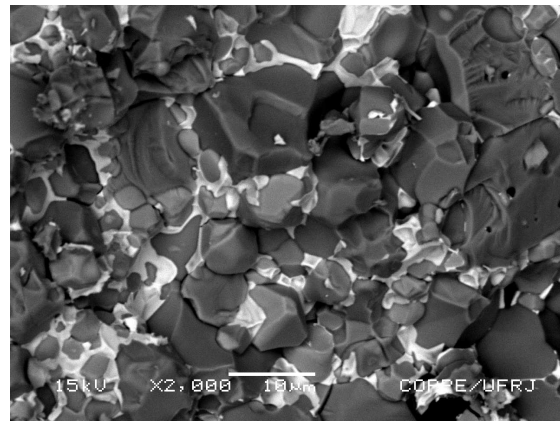
Foi realizada também no varistor 12 observações micrográficas, pois apresentava uma descarga pela superfície lateral (Figura 90) e não foi possível a realização de alguns ensaios não destrutivos após o ensaio de degradação por impulsos de múltiplas descargas.

As fotomicrografias estão apresentadas na Figura 93.

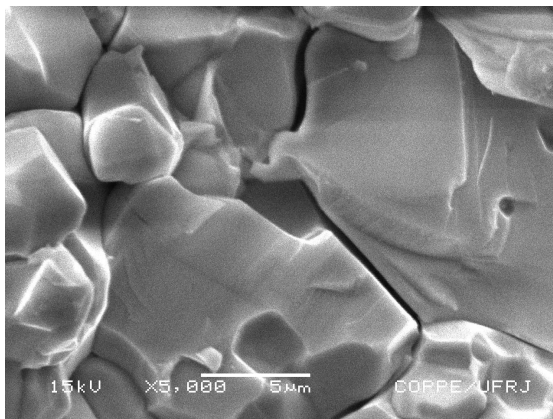
Podemos observar que comparativamente a fotomicrografia do varistor 12 após o ensaio de degradação não apresentou nenhuma diferença em sua microestrutura em relação ao varistor 13, que foram degradados da mesma maneira.



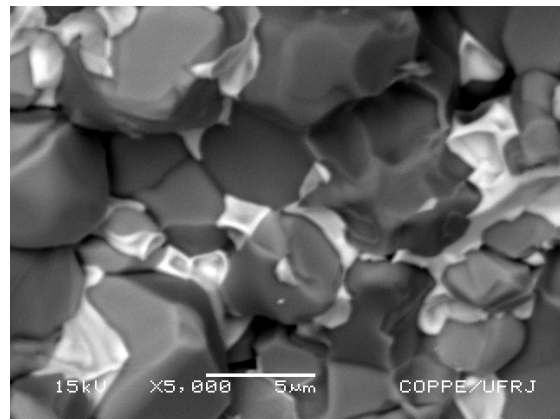
(a) Aumento 2000x



(b) Aumento 2000x



(c) Aumento 5000x



(d) Aumento 5000x

Figura 93 - Fotomicrografias (MEV) da superfície da fratura do varistor 12.

4.3. Degradação dos varistores por corrente suportável de longa duração

Os blocos varistores, 08, 20, 29 e 30 foram degradados por corrente suportável de longa duração. Nas Tabelas de 24 a 32 e nas Figuras de 94 a 120 são apresentados todos os resultados dos ensaios e os gráficos comparativos dos resultados antes e após a degradação das amostras 20, 29 e 30 por corrente suportável de longa duração.

4.3.1. Bloco Varistor 20

Resultados dos ensaios antes e após a degradação do varistor por corrente suportável de longa duração:

- Curva característica tensão x capacitância e tensão x tangente δ (Tabela 24);
- Curva característica tensão x corrente, tensão x corrente resistiva e tensão x potência (Tabela 25);
- Tensão residual e tensão de referência (Tabela 26).

Podemos observar pelos resultados da Tabela 24 que os valores de capacitância e tangente δ após a degradação não se alteraram.

Tabela 24 - Resultado do ensaio da Curva Característica Tensão x Capacitância antes e após a degradação.

Tensão (kV)	Amostra 20			
	Capacitância (pF)		Tangente δ	
	Antes	Após	Antes	Após
0,4	206,0	206,1	0,026	0,024
0,8	205,5	205,7	0,029	0,027
1,2	204,7	204,5	0,033	0,031
1,6	202,6	202,1	0,038	0,036
2,0	200,4	198,0	0,044	0,041
2,4	197,5	195,0	0,054	0,048
2,8	193,2	192,2	0,061	0,058
3,0	190,0	189,4	0,068	0,065
3,4	185,3	187,7	0,075	0,076
3,2	185,6	186,8	0,090	0,092
3,6	186,2	186,0	0,113	0,115
3,8	186,6	186,1	0,148	0,151
4,0	188,1	187,4	0,207	0,208
4,2	191,0	190,4	0,317	0,346

Podemos observar que nas medições iniciais da corrente e potência, quanto mais a tensão se aproximava da tensão de referência do varistor há um aumento progressivo nesses parâmetros. Porém as medições antes e depois praticamente não se alteraram.

Tabela 25 - Resultado do ensaio da Curva Característica Tensão X Corrente antes e após a degradação.

Amostra 20						
Tensão (kV)	Corrente				Potência (mW)	
	Total (µA)		Resistiva (µA)		Antes	Após
	Antes	Após	Antes	Após		
0,4	37,3	41,2	0,8	1,73	0,9	1,0
0,8	74,6	90,0	2,1	3,64	3,5	4,1
1,2	113,4	120,0	3,9	5,56	8,2	10,3
1,6	145,5	168,0	6,1	9,56	16,1	21,0
2,0	179,1	244,0	8,8	10,20	27,4	31,1
2,4	237,0	248,0	14,9	16,80	49,0	57,1
2,8	272,0	280,0	22,6	26,2	87,3	102,4
3,0	286,7	292,0	28,0	28,4	115,1	114,2
3,2	302,8	308,0	36,2	37,2	160,0	157,8
3,6	334,2	340,0	66,0	64,0	325,4	302,2
3,8	348,9	350,0	95,8	96,0	502,6	503,6
4,0	363,2	380,0	148,0	142,0	817,0	755,5
4,2	414,4	400,0	321,0	272,0	1901,0	1510,9

Observamos que os resultados de tensão residual e da tensão de referência não apresentaram nenhum aumento relevante em relação à medição antes da degradação. Aparentemente não houve mudança nas suas características na região de alta corrente e na região de altamente não linear.

Tabela 26 - Resultado do ensaio da tensão residual e da tensão de referência.

Amostra 20				
	Antes		Após	
	Tensão (kV)	Corrente (kA)	Tensão (kV)	Corrente (kA)
Tensão residual 8/20 µs	10,5	10,0	10,7	9,2
Tensão de referência a 1 mA	4,4	0,001	4,3	0,001

Nas Figuras 94 a 98 estão apresentados os gráficos comparativos das medições antes e após a degradação dos varistores, as curvas características “tensão x corrente total”, “tensão x corrente resistiva” e “tensão x perdas resistivas” e as curvas características “tensão x capacitância” e “tensão x tangente δ ”.

Podemos observar que pelos gráficos não houve degradação varistor.

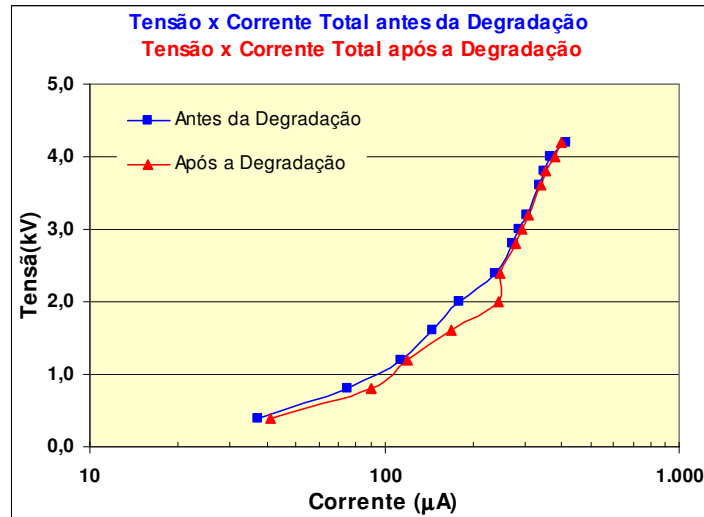


Figura 94 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x corrente total antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

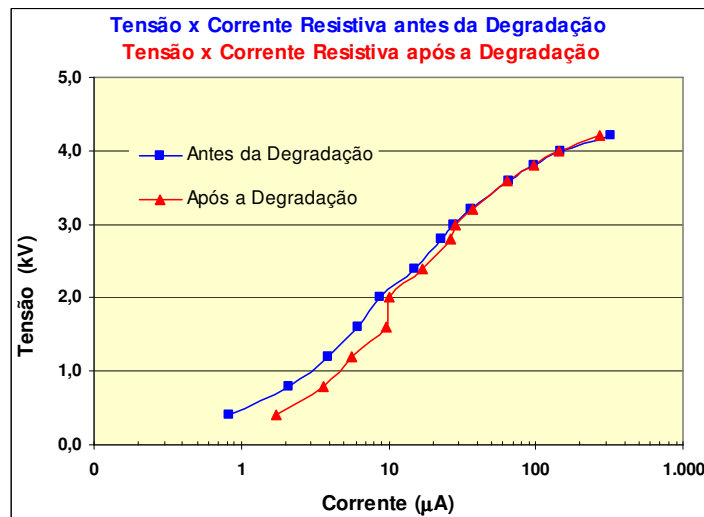


Figura 95 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x corrente resistiva antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

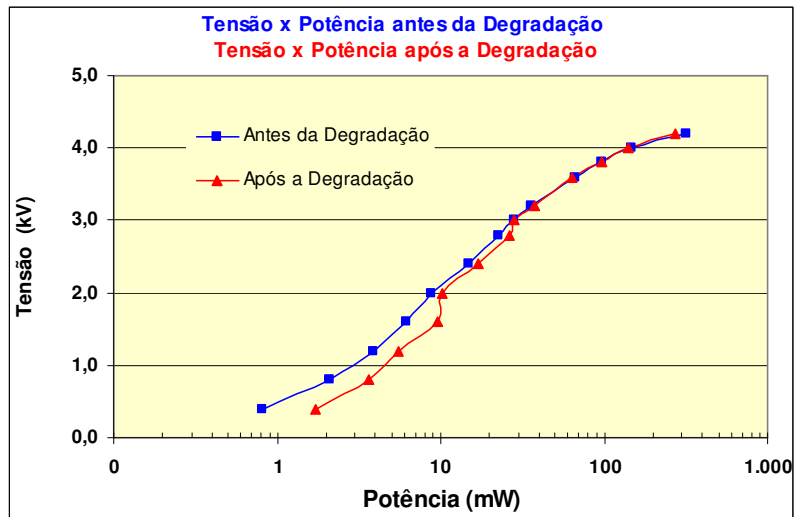


Figura 96 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x potência antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

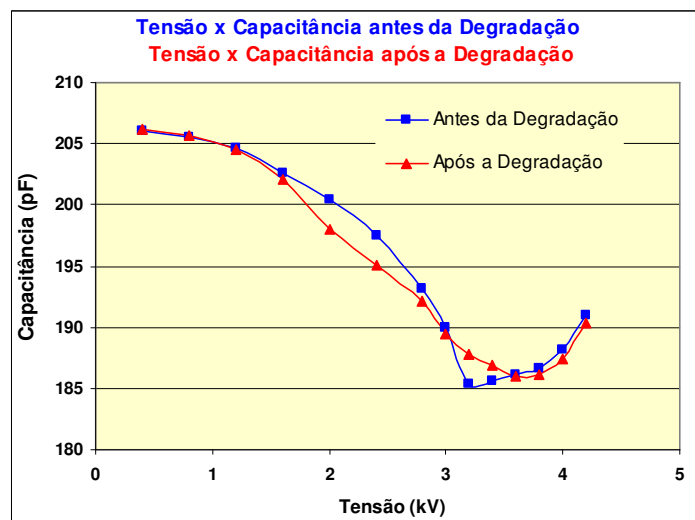


Figura 97 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x capacitância antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

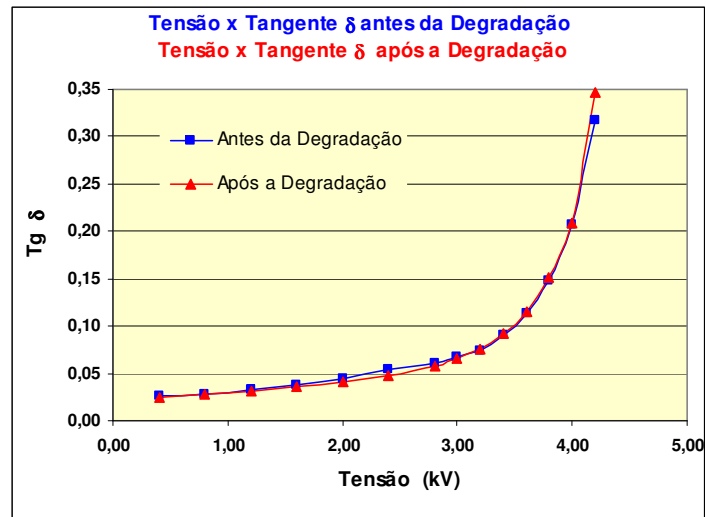


Figura 98 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x tangente δ antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

4.3.2. Bloco Varistor 29

Resultados dos ensaios antes e após a degradação do varistor por corrente suportável de longa duração:

- Curva característica tensão x capacitância e tensão x tangente δ (Tabela 27);
- Curva característica tensão x corrente, tensão x corrente resistiva e tensão x potência (Tabela 28);
- Tensão residual e tensão de referência (Tabela 29).

Podemos observar pelos resultados da Tabela 27 que os valores de capacitância e tangente δ após a degradação não se alteraram.

Tabela 27 - Resultado do ensaio da Curva Característica Tensão x Capacitância antes e após a degradação.

Tensão (kV)	Amostra 29			
	Capacitância (pF)		Tangente δ	
	Antes	Após	Antes	Após
0,4	169,4	170,8	0,024	0,023
0,8	169,2	170,4	0,028	0,026
1,2	168,7	169,6	0,032	0,031
1,6	167,2	166,6	0,037	0,035
2,0	165,1	164,3	0,043	0,041
2,4	162,4	160,0	0,050	0,047
2,8	159,1	157,2	0,059	0,056
3,0	157,8	156,4	0,066	0,063
3,4	156,3	153,3	0,075	0,072
3,2	155,5	153,4	0,088	0,085
3,6	154,9	153,6	0,107	0,104
3,8	155,1	153,7	0,140	0,136
4,0	157,1	155,7	0,199	0,195
4,2	158,2	158,4	0,284	0,301

Podemos observar que nas medições iniciais da corrente e potência, quanto mais à tensão se aproximava da tensão de referência do varistor há um aumento progressivo nesses parâmetros.

Tabela 28 - Resultado do ensaio das curvas características antes e após a degradação.

Amostra 29						
Tensão (kV)	Corrente				Potência (mW)	
	Total (μA)		Resistiva (μA)		Antes	Após
	Antes	Após	Antes	Após		
0,4	32,8	37,0	1,3	1,3	1,2	0,8
0,8	65,7	70,0	3,4	2,9	4,8	3,1
1,2	104,5	104,0	5,8	4,8	11,4	8,2
1,6	134,3	136,0	9,3	8,1	22,4	16,7
2,0	156,7	166,0	11,2	10,9	32,9	29,4
2,4	197,9	208,0	13,7	16,0	44,8	50,4
2,8	226,6	232,0	19,6	22,0	74,6	80,6
3,0	239,0	248,0	23,7	26,2	96,8	104,1
3,2	249,8	256,0	28,7	32,8	124,1	137,7
3,6	276,9	288,0	54,7	60,0	270,1	285,4
3,8	288,2	296,0	76,6	84,0	400,4	499,7
4,0	300,5	312,0	120,4	130,0	669,0	696,7
4,2	312,1	324,0	207,8	210,0	1225,0	1192,0

No término do ensaio das curvas características ocorreu uma operação indevida que acarretou na elevação de tensão sobre o varistor 29 e conseqüentemente a sua entrada em avalanche térmica, como pode ser observado na Figura 19. Como o varistor se quebrou foi realizado também fotomicrografias, que podem ser observadas nas Figuras 103 e 104.

Observamos que os resultados da tensão de referência não apresentaram aumento relevante em relação à medição antes da degradação. Aparentemente não houve mudança nas suas características na região altamente não linear. Não houve medição da tensão residual.

Tabela 29 - Resultado do ensaio da tensão residual e da tensão de referência.

Amostra 29				
	Antes		Após	
	Tensão (kV)	Corrente (kA)	Tensão (kV)	Corrente (kA)
Tensão residual 8/20 μ s	10,8	10,0	-----	-----
Tensão de referência a 1 mA	4,5	0,001	4,3	0,001

Nas Figuras 99 a 103 estão apresentados os gráficos comparativos das medições antes e após a degradação dos varistores, as curvas características “tensão x corrente total”, “tensão x corrente resistiva” e “tensão x perdas resistivas” e as curvas características “tensão x capacitância” e “tensão x tangente de δ ” e as correntes de polarização/despolarização.

Podemos observar que pelos gráficos não houve degradação varistor.

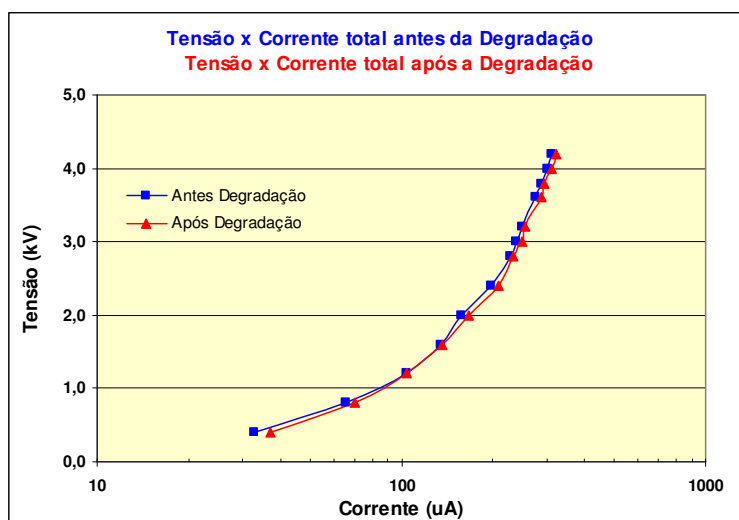


Figura 99 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x corrente total antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

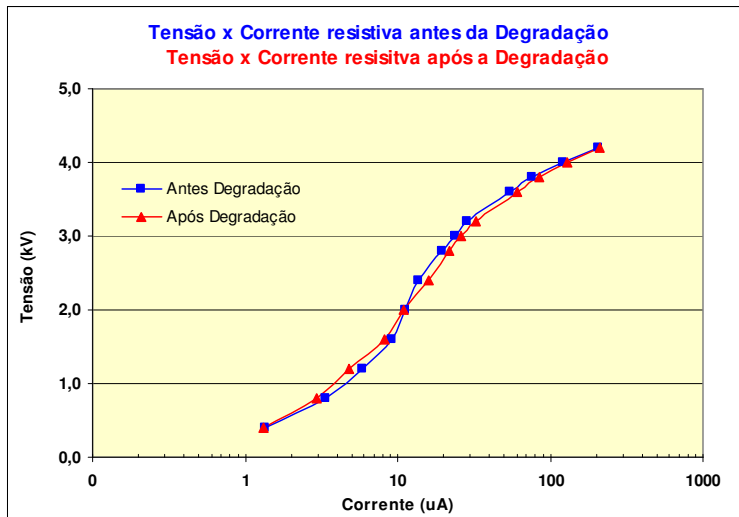


Figura 100 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x corrente resistiva antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

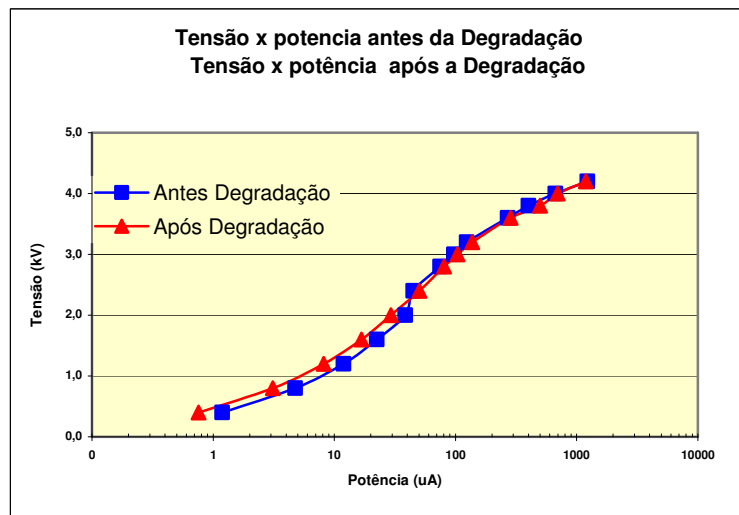


Figura 101 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x potência antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

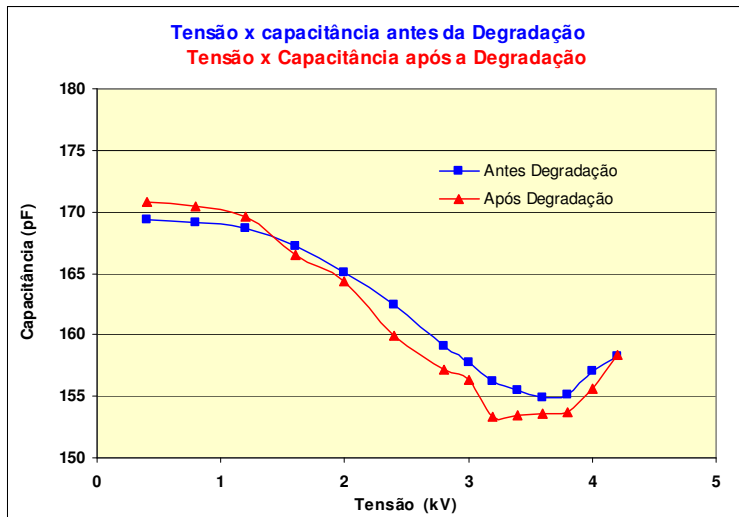


Figura 102 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x capacitância antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

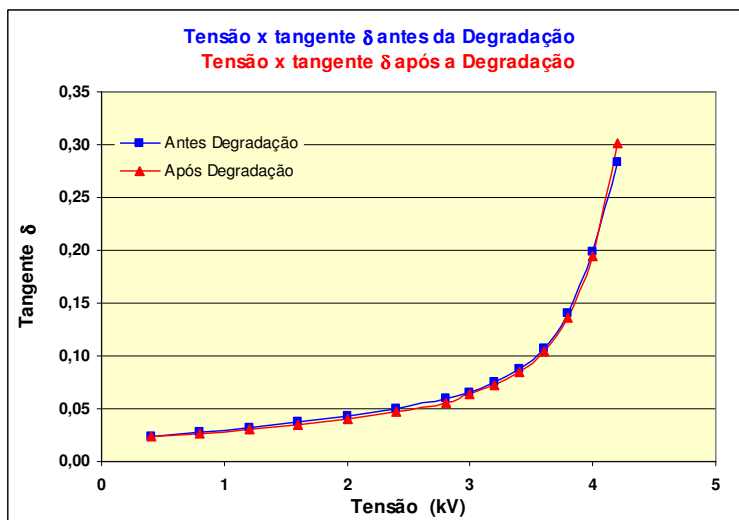


Figura 103 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x tangente δ antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

Os resultados das fotos micrografias e análises de EDS referentes a amostra 29 estão apresentadas nas Figuras 104 e 105, respectivamente.

Podemos observar que a micrografia do varistor 29 após a avalanche térmica está bem definida a área de fusão, ou seja, uma grande destruição na microestrutura do material. Houve uma grande elevação de temperatura e conseqüentemente a queima das camadas intergranulares.

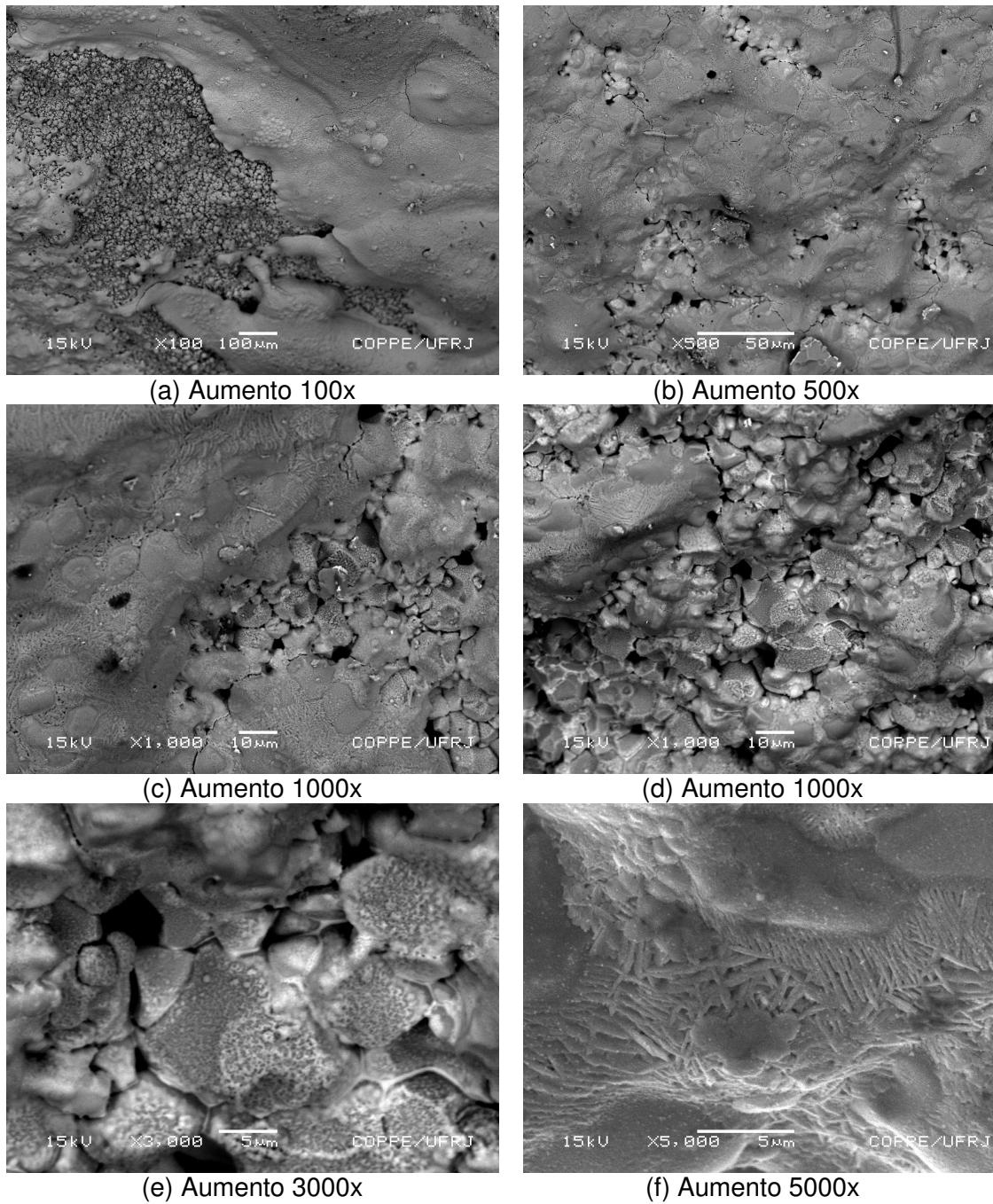


Figura 104 – Fotomicrografias (MEV) da superfície da fratura do varistor 29.

Verificamos que na análise do EDS os principais elementos que compõem o varistor estão presentes na análise.

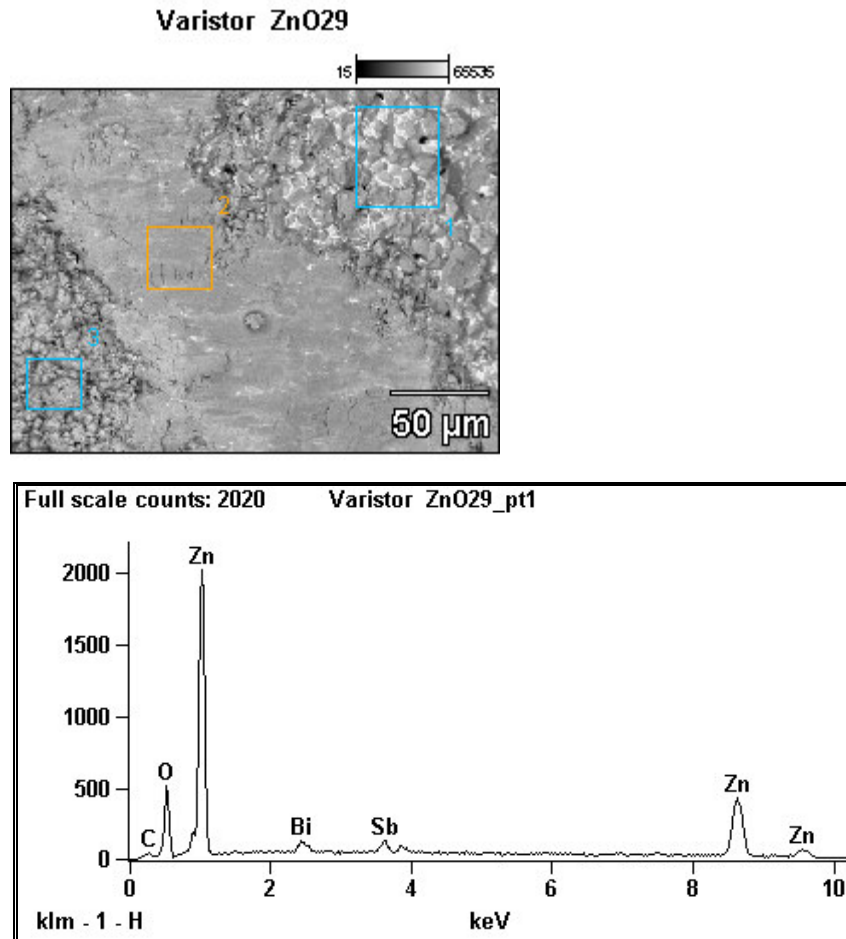


Figura 105 – Resultado da análise química elementar do EDS do varistor 29.

4.3.3. Bloco Varistor 30

Resultados dos ensaios antes e após a degradação do varistor por corrente suportável de longa duração:

- Curva característica tensão x capacitância e tensão x tangente δ (Tabela 30);
- Curva característica tensão x corrente, tensão x corrente resistiva e tensão x potência (Tabela 31);
- Tensão residual e tensão de referência (Tabela 32).
- Polarização/despolarização.

Podemos observar pelos resultados da Tabela 30 que os valores de capacitância aumentaram em relação às medições antes. A tangente δ após a degradação praticamente não se alterou.

Tabela 30 - Resultado do ensaio da Curva Característica Tensão x Capacitância antes e após a degradação.

Tensão (kV)	Amostra 30			
	Capacitância (pF)		Tangente δ	
	Antes	Após	Antes	Após
0,4	171,3	188,2	0,024	0,024
0,8	171,0	187,9	0,028	0,027
1,2	170,1	187,2	0,032	0,033
1,6	168,4	184,5	0,038	0,038
2,0	166,3	182,3	0,045	0,045
2,4	163,8	180,0	0,050	0,054
2,8	160,7	172,2	0,062	0,062
3,0	159,1	172,8	0,070	0,072
3,4	157,5	172,1	0,079	0,082
3,2	157,0	171,7	0,094	0,100
3,6	156,3	171,3	0,115	0,123
3,8	156,5	172,1	0,152	0,162
4,0	158,0	173,5	0,215	0,220
4,2	160,2	172,7	0,325	0,345

Podemos observar que nas medições iniciais da corrente e potência, quanto mais a tensão se aproxima da tensão de referência do varistor, há um aumento progressivo destes parâmetros.

Tabela 31 - Resultado do ensaio da Curva Característica Tensão X Corrente antes e após a degradação.

Amostra 30						
Tensão (kV)	Corrente				Potência (mW)	
	Total (µA)		Resistiva (µA)		Antes	Após
	Antes	Após	Antes	Após		
0,4	38,8	40,0	1,6	2,0	1,4	1,0
0,8	74,6	80,0	3,5	5,0	5,1	5,7
1,2	104,5	116,0	5,7	6,5	11,2	10,4
1,6	141,8	164,0	8,0	9,4	21,0	21,8
2,0	171,6	192,0	11,2	13,0	38,6	36,9
2,4	219,7	230,0	17,5	20,0	60,7	63,0
2,8	249,6	260,0	26,0	28,0	99,6	104,9
3,0	263,3	270,0	31,7	35,2	130,3	134,3
3,2	275,3	280,0	38,1	42,8	165,5	184,7
3,6	303,5	300,0	67,5	78,0	336,9	436,5
3,8	319,0	310,0	102,9	112,0	540,1	570,8
4,0	333,6	340,0	156,3	180,0	883,6	973,7
4,2	365,9	380,0	260,2	316,0	1527,0	1863,5

Observamos que os resultados de tensão residual e da tensão de referência não apresentaram aumento relevante em relação à medição antes da degradação. Aparentemente não houve mudança nas suas características na região de alta corrente e na região altamente não linear.

Tabela 32 - Resultado do ensaio da tensão residual e da tensão de referência.

Amostra 30				
	Antes		Após	
	Tensão (kV)	Corrente (kA)	Tensão (kV)	Corrente (kA)
Tensão residual 8/20 µs	10,6	9,9	10,8	9,1
Tensão de referência a 1 mA	4,4	0,001	4,3	0,001

Nas Figuras 106 a 113 estão apresentados os gráficos comparativos das medições antes e após a degradação dos varistores, as curvas características “tensão x corrente total”, “tensão x corrente resistiva” e “tensão x perdas resistivas” e as curvas características “tensão x capacitância” e “tensão x tangente δ ”.

Podemos observar que pelos gráficos não houve degradação do varistor. Somente houve alteração nos valores da capacitância.

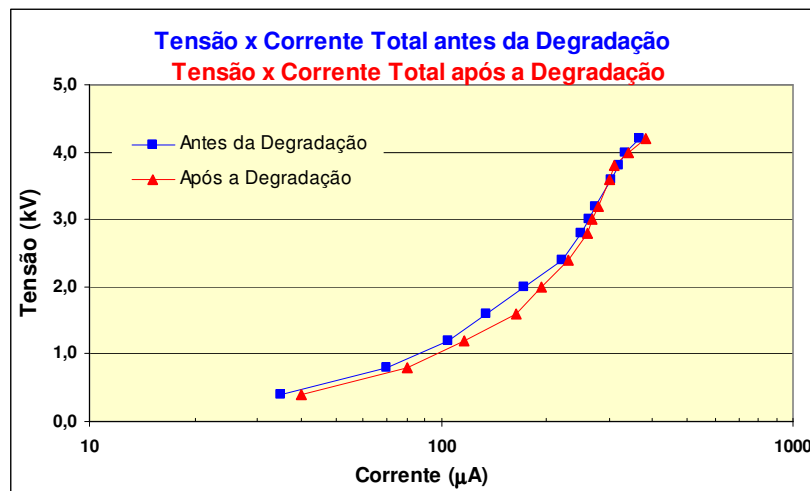


Figura 106 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x corrente resistiva antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

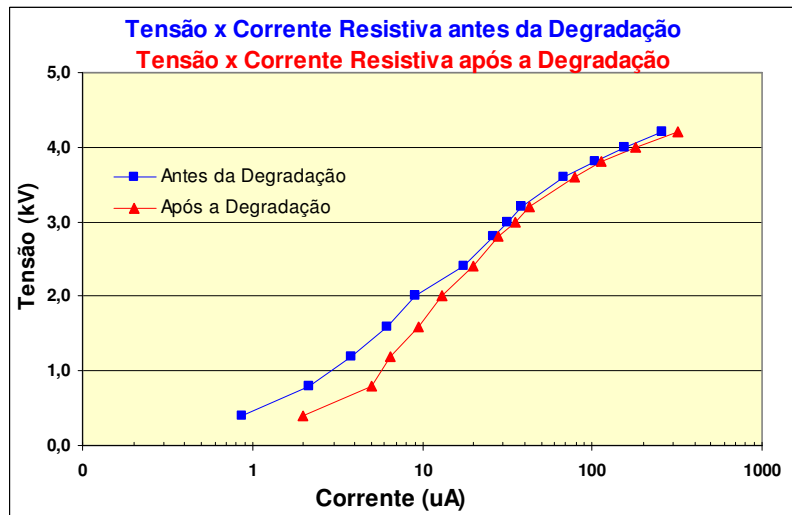


Figura 107 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x corrente total antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

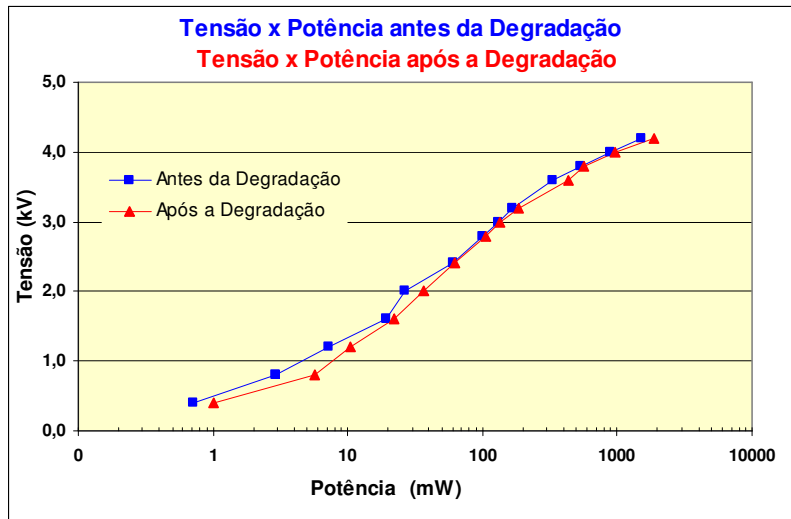


Figura 108 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x potência antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

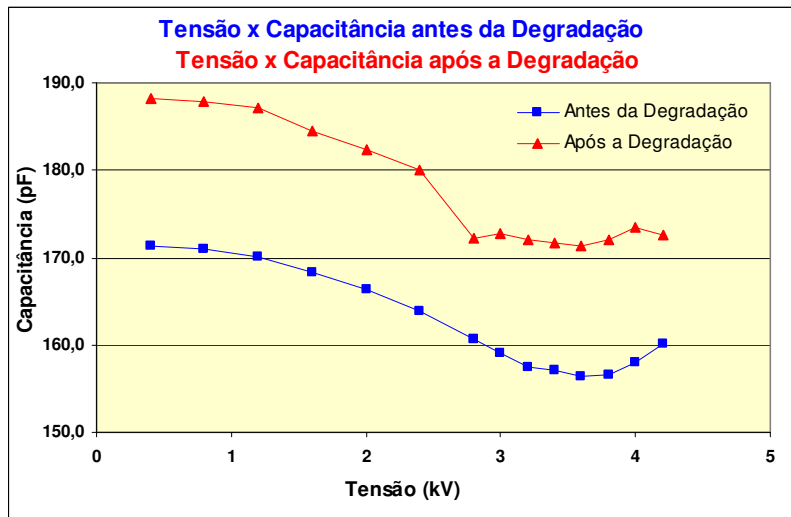


Figura 109 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x capacitância antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

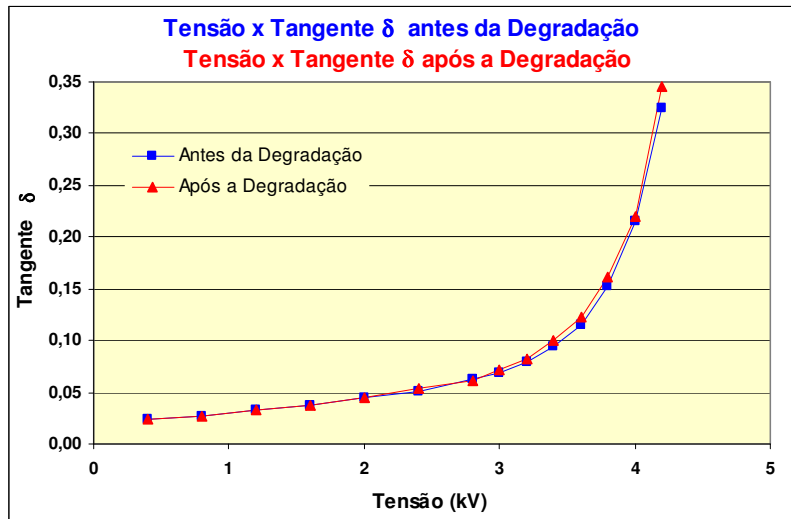
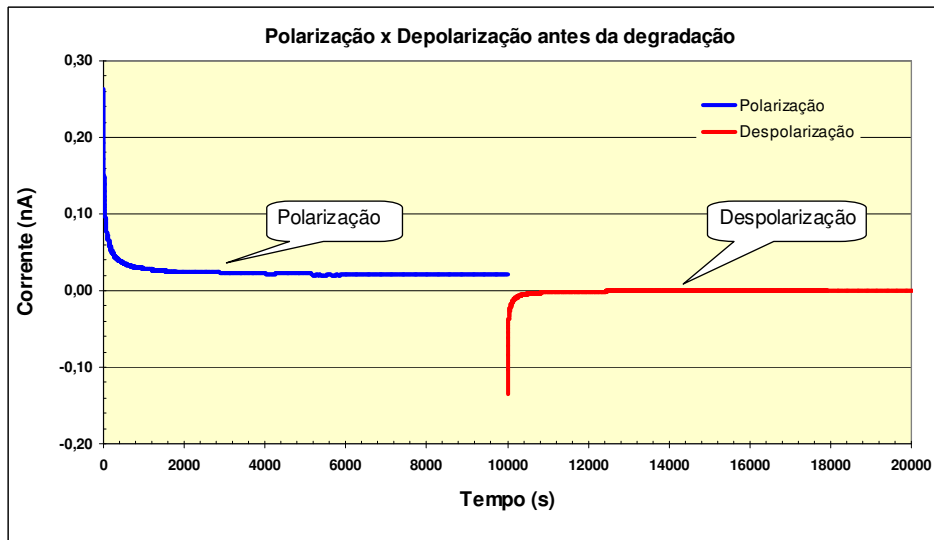
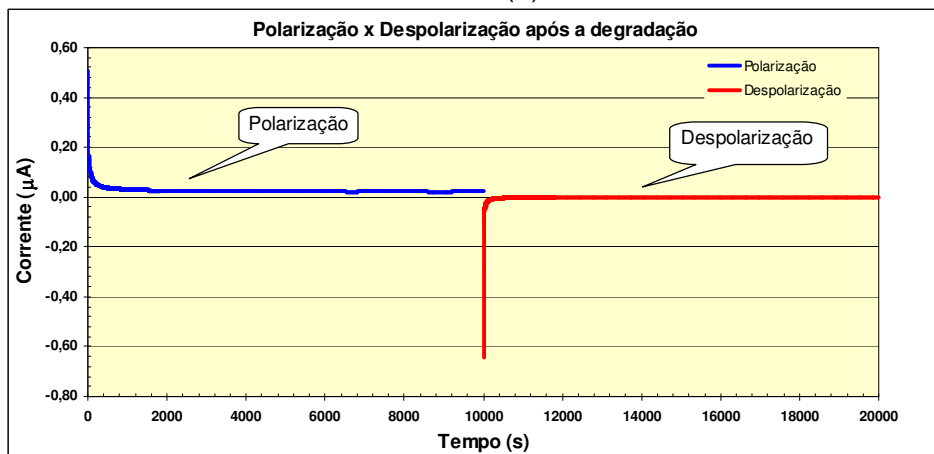


Figura 110 - Gráfico comparativo da curva característica tensão x tangente δ antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.



(a)



(b)

Figura 111 – Gráfico de polarização/despolarização antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

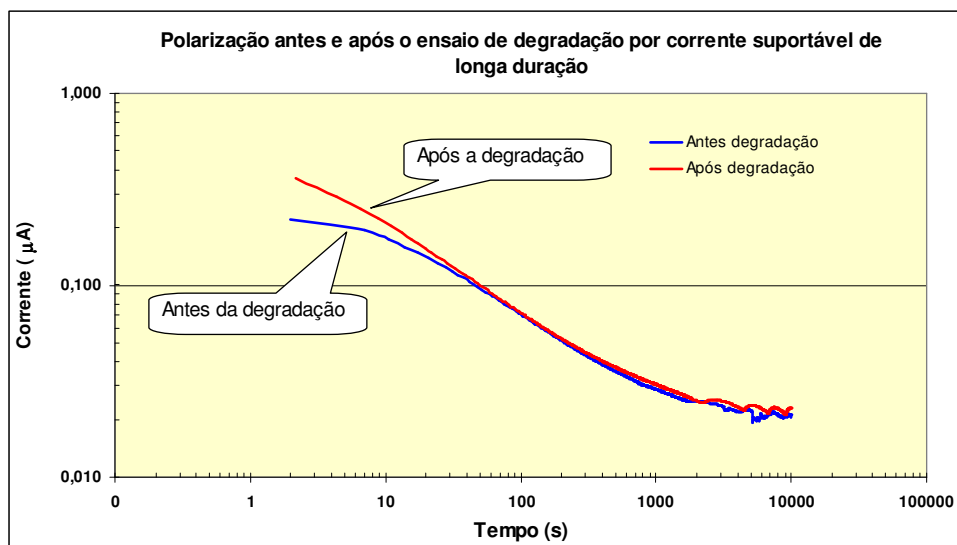


Figura 112 – Gráfico comparativo das correntes de polarização antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

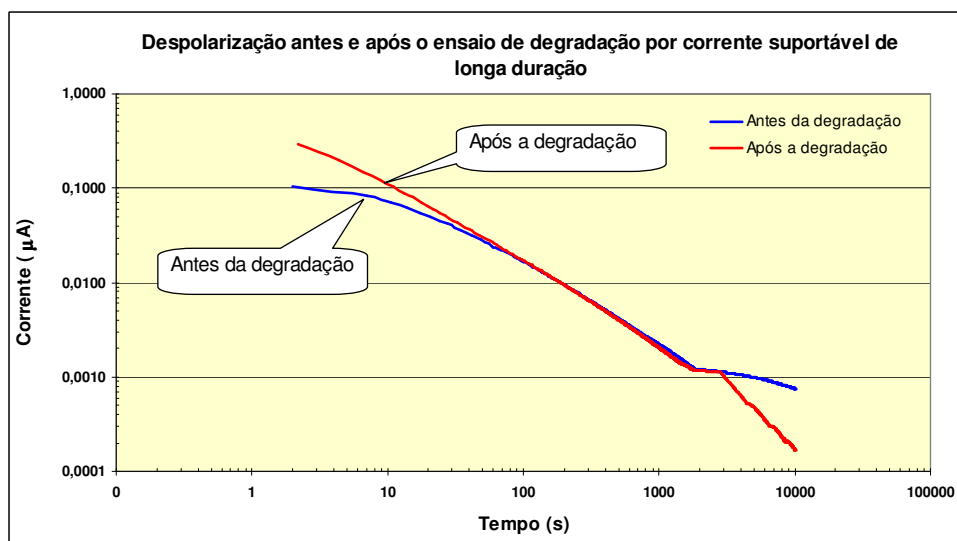


Figura 113 – Gráfico comparativo das correntes de polarização antes e após a degradação por corrente suportável de longa duração.

4.3.4. Bloco varistor 08

Após o ensaio de degradação foram realizadas observações metalográficas na amostra 08.

As fotomicrografias estão apresentadas na Figura 114 e na Figura 115 apresentamos o EDS. Podemos observar que comparativamente (em relação ao varistor 04) as fotomicrografias do varistor 08 após o ensaio de degradação aparentemente não apresentaram diferença em sua microestrutura em relação ao varistor que não foi degradado.

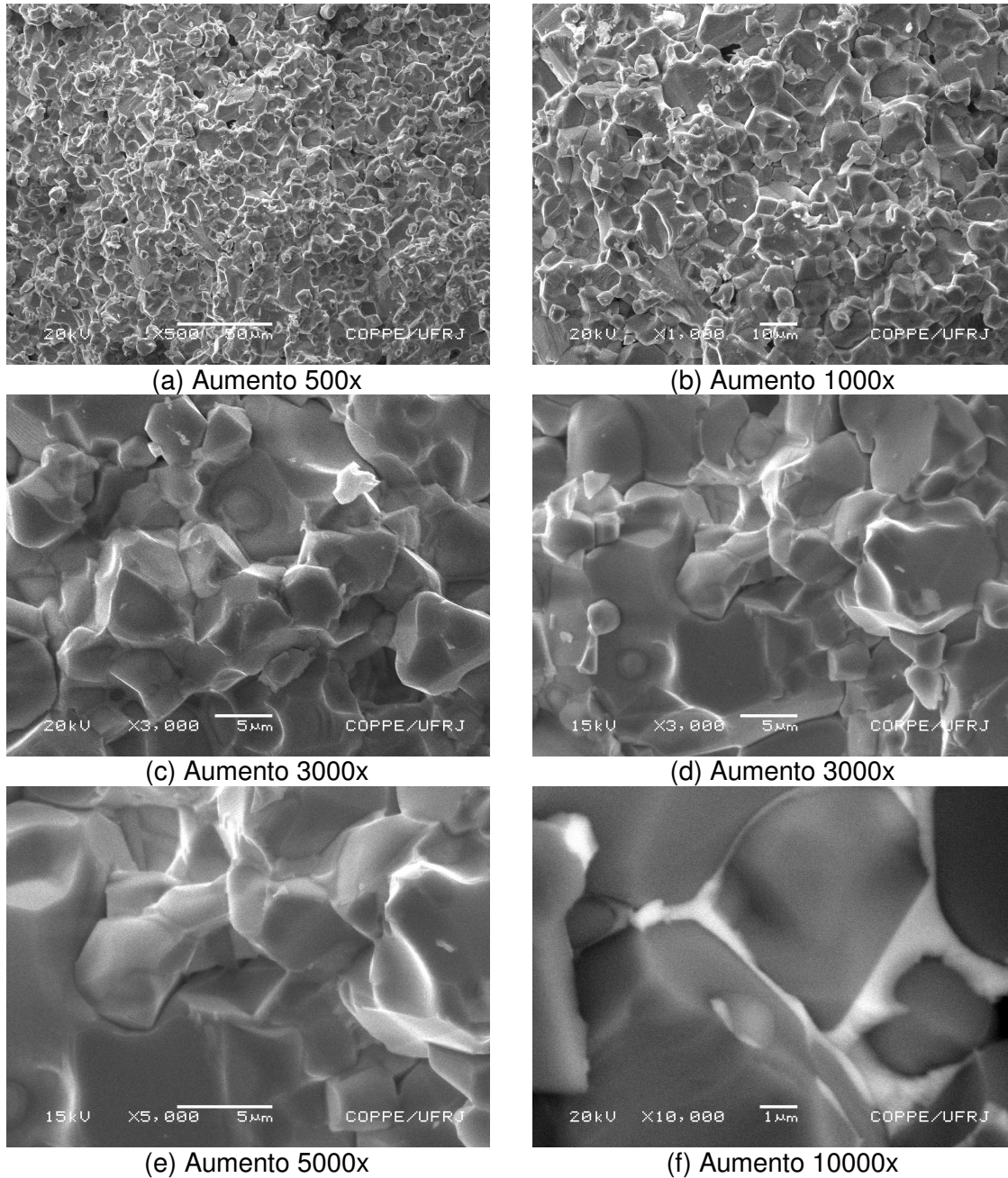


Figura 114 – Fotomicrografias (MEV) da superfície da fratura do varistor 08.

Verificamos que na análise do EDS os principais elementos que compõem o varistor estão presentes na análise.

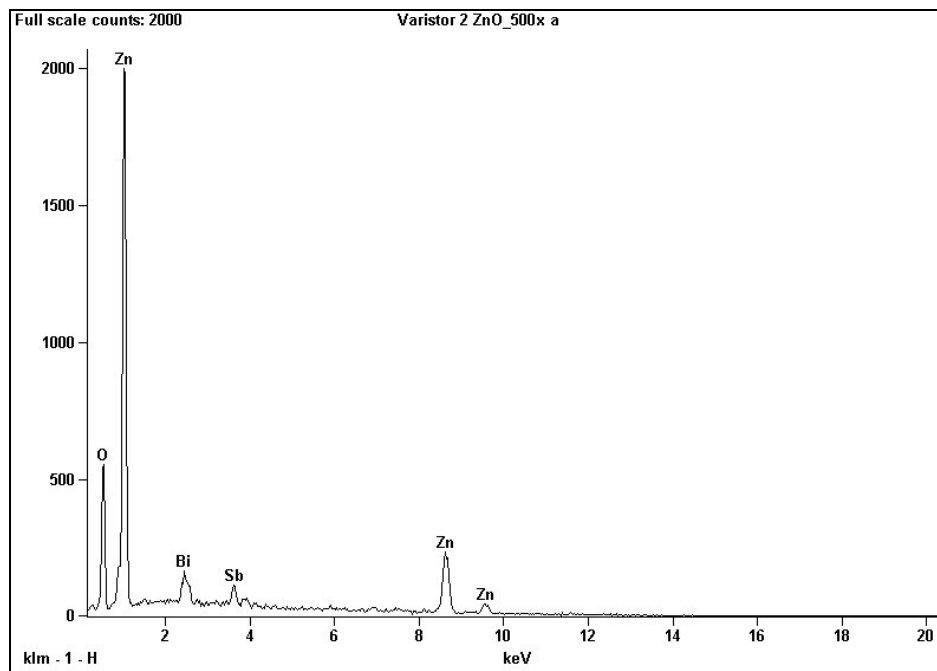


Figura 115 - Resultado da análise química elemental do EDS do varistor 08.

4.4. Análise por difração de raio x

Para a determinação das fases presentes nos varistores utilizamos um difratômetro de raio X. Realizamos medições nos varistores 29, 22, 13 e 12 e os resultados mostraram a predominância de ZnO e fases de Espinélio e Bi_2O_3 , como esperado. A Figura 116 mostra os gráficos da difração no varistor. Não se verificou nenhuma alteração nas fases da microestrutura.

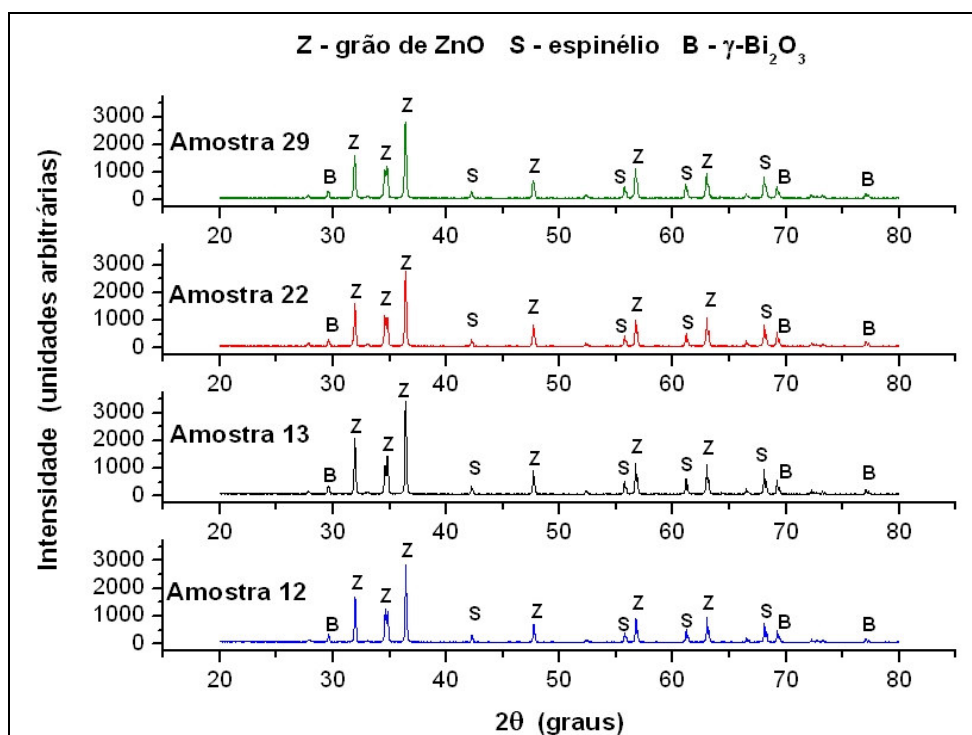


Figura 116 – Gráficos de difração das amostras 29, 22, 13 e 12.

4.5. Coeficiente de não-linearidade

Calculado o coeficiente de não-linearidade para as correntes de 1,0 e 10,0 mA do varistor 18 que não sofreu degradação, e dos varistores 06, 20 e 11 que foram degradados cada um de uma forma diferente, os resultados estão apresentados na Tabela 33.

Podemos observar que o coeficiente de não-linearidade dos varistores variou em aproximadamente 7 %, e, portanto a degradação não foi suficiente para envelhecer o varistor, no que diz respeito ao seu desempenho elétrico.

Os cálculos foram realizados de acordo com a equação 2.

A Tabela 33 mostra os valores calculados para o coeficiente de não-linearidade.

Tabela 33 – Cálculo do coeficiente de não-linearidade.

Amostra 18 nova sem degradação		
I (mA)	V (V)	α
1,1	4280	42
10,8	4530	

Amostra 06 degradação por impulsos atmosféricos		
I (mA)	V (V)	α
1,12	4320	39
10,0	4570	

Amostra 11 degradação por impulsos de múltiplas descargas		
I (mA)	V (V)	α
0,97	4210	45
10,0	4430	

Amostra 20 degradação por corrente suportável de longa duração		
I (mA)	V (V)	α
1,1	4250	44
10,0	4470	

5. CONCLUSÕES

Durante a realização deste trabalho de pesquisa por meio dos estudos efetuados e com base nos resultados dos ensaios apresentados é possível apresentar as seguintes conclusões:

- (1) As condições de degradação estudadas não foram suficientes para promover alterações no desempenho elétrico dos varistores analisados. Contudo, a partir de medidas dielétricas, de capacitância, de perdas dielétricas e da componente resistiva da corrente podemos observar que houve alguma degradação no varistor, visto que estas medições são mais sensíveis a pequenas alterações em níveis inferiores àqueles observados na avaliação microestrutural.
- (2) A técnica de monitoramento da componente resistiva da corrente de fuga mostrou-se como sendo a principal técnica para avaliação dos blocos varistores estudados.
- (3) Verificou-se que a região do comportamento elétrico do varistor mais sensível às condições de degradação estudadas foi a região linear (pré-ruptura), o que corrobora a literatura técnica que aponta o crescimento da corrente de fuga como o principal problema da atual tecnologia de varistores.

6. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Durante a realização deste trabalho de pesquisa por meio dos estudos efetuados e com base nos resultados dos ensaios podemos apresentar alguns trabalhos futuros:

1. Após a degradação dos varistor realizar análise por espectroscopia de impedância ou admitância, de forma a verificar alterações no nível dos defeitos químicos estruturais.
2. Análise em outras formulações de varistores a base de ZnO, bem como outros tipos de varistores, por exemplo: SnO₂, TiO₂, WO₃ e SiC.
3. Análise da microestrutura do material degradado por microscopia eletrônica de transmissão de alta resolução.
4. Em relação a degradação para uma maior solicitação dos blocos varistores podemos considerar que além dos ciclos de impulsos atmosféricos, a aplicação de uma determinada tensão sobre o varistor no momento dos ciclos de impulsos, pode ser uma melhor combinação para verificação da degradação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] VERDOLIN, R. T., *Avaliação do Desempenho de Pára-Raios e Sic e Zno por meio de Ensaio de Laboratório*. Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ – Centro de Tecnologia – Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Setembro de 1983

[2] Franco, J.L., *Estudo das Propriedades Elétricas dos Varistores de Zno na Região de Baixas Tensões Aplicadas*. Tese de M. Sc., Universidade Federal de Campina Grande – Área de Processamento de Energia – Paraíba, PB, Junho de 1993.

[3] Franco, J.L., *Curso sobre Pára-raios - Aplicação em sistemas de Potência*, CIGRÉ BRASIL BR.CE A3, 2003

[4] Oliveira, M. J., *Avaliação do efeito geográfico-termal na capacidade de absorção de energia em pára-raios de ZnO* - Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ – Centro de Tecnologia – Rio de Janeiro, RJ, Brasil, – Dezembro de 2004.

[5] Furtado, J. G. M., *Características elétricas e microestruturais de varistores à base de ZnO dopados com óxidos de terras raras*, Tese de M. Sc., COPPE/UFRJ – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – Fevereiro de 2001.

[6] Cavenaghi, J. M., *Efeito da Prensagem sobre as Propriedades Elétricas e Microestruturais de um Varistor de ZnO* – Tese de M. Sc., Universidade São Francisco – Programa de Pós Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – Itatiba, SP, Brasil – 2005.

[7] MATSUOKA, M., “Non-ohmic properties of Zinc Oxide Varistors”, *Jpn. J. Appl. Phys.*, v. 10, n. 6, pp.736-746, 1971.

[8] www.lattron.co.kr agosto de 2005

[9] MATSUOKA, M., "Progress in Research and Development of Zinc Oxide Varistors", *Adv. In Ceramics*, v. 7, pp. 290-308, 1981.

[10] LIEC – São Carlos – Laboratório de Cerâmica - Varistores – <http://www.liec.ufscar.br/ceramica/pesquisa/varistores/index.html>.

[11] CALLISTER, W. D.Jr., "*Materials Science and engineering – An introduction*", 4th ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, USA, p. 80, 1997.

[12] Clarke, D. R. "Varistor Ceramics" *J. Am. Ceram. Soc.*, 82, no 3, pp 485–502 (1999)

[13] Ribeiro, M.R., El-Mann, M., "Modelagem de pára-raios de óxido de zinco sem centelhador" – Projeto final de graduação – Universidade Federal do Rio de Janeiro – Departamento de Eletrotécnica – Dezembro, 1997.

[14] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT/CB-03– COMITÊ BRASILEIRO DE ELETRICIDADE – ABNT CE 03:037.07-001 – "Comissão de estudos de Pára-raios de resistor não linear à óxido metálico sem centelhadores para circuitos de potência de corrente alternada - Especificação"

[15] Franco, J.L., "Curso sobre Pára-raios aplicação em redes de distribuição, subestações e linhas de transmissão", Franco engenharia, pp. 37-51, 2000.

[16] ABNT – Associação brasileira de normas técnicas – NBR 6936 – abr/1992 – "Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão".

[17] K. P. Mardira, T. K. Saha, R. A. Sutton "Investigation of Diagnostic Techniques for Metal Oxide Surge Arresters" 1070-9878 - 2005 IEEE.

[18] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. International Standard IEC 60099-4 second edition 2004-05 – Part 4: Metal-oxide surge arresters without gaps for a. c. Systems”.

[19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT/CB-03– COMITÊ BRASILEIRO DE ELETRICIDADE – ABNT CE 03:037.07-001 – “Comissão de estudos de Pára-raios de resistor não linear à óxido metálico sem centelhadores para circuitos de potência de corrente alternada – Métodos de ensaio”

[20] M. Darveniza, D. Roby, L. R. Tumma, “Laboratory and Analytical Studies of the Effects of Multipulse Lightning Current on Metal Oxide Arresters”, IEEE Trans. Power Del., Vol. 9, pp. 764_71, 1994.

[21] M. Darveniza, C. J. Andrews, D. R. Mercer and T. M. Parnell, “A Multiple Lightning Impulse Generator”, 6th Int. Sympos. High Voltage Engineering, New Orleans, USA, paper 47.07,1989.

[22] Oliveira Filho, O. B., Da Silva, A. N. – “Medição das perdas Joule em pára-raios de ZnO” – Relatório Técnico CEPEL, no 075/85, p 18, 1985.

[23] Oliveira, M. J., Franco, J. L., “Ensaio de tensão residual e ensaio de ciclo de operação” – Apostila Técnica do “Curso sobre Pára-Raios de Distribuição, Estação e Linhas de Transmissão” (CPAR) – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) – Outubro de 1997.
