

FRANCISCO JANSSEN

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE ENVELHECIMENTO
NAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS DE ISOLADORES
CERÂMICOS PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA

Dissertação apresentada como exigência parcial para a obtenção do título de Mestre em Física pelo Núcleo de Pós-graduação do Departamento de Física da Universidade Federal de Sergipe, sob a orientação do Prof. Dr. Mário Ernesto Giroldo Valerio.

Universidade Federal de Sergipe

São Cristóvão – 2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

FRANCISCO JANSSEN

INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE ENVELHECIMENTO
NAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS DE ISOLADORES
CERÂMICOS PARA SISTEMAS DE POTÊNCIA

Universidade Federal de Sergipe

São Cristóvão – 2005

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Mário Ernesto Giroldo Valerio e à Prof.^a Dra. Zélia Soares Macedo, pela confiança depositada, orientação, dedicação, paciência e amizade.

Aos colegas alunos, professores e funcionários do NPGFI e LPCM, pela colaboração, apoio e camaradagem.

A Silene, pelo apoio, carinho e paciência.

A Luís por... bem, por ainda não ter feito nada que destruísse este trabalho.

À Universidade Federal de Sergipe, ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Sergipe e às Faculdades Integradas Pio Décimo, pela viabilização deste trabalho e pelo apoio em instalações, equipamentos, materiais e serviços.

Às empresas Energipe S.A., Alves Barreto Ltda., Cerâmica Santa Terezinha S.A. e Isoladores Santana S.A. pela ajuda em materiais e informações.

A todos os amigos, colegas e parentes que de alguma forma contribuíram para este trabalho.

Este trabalho é dedicado a

Esterlita e Theodoro

“ Nada é impossível para quem
acredita, persevera e ama.”

Em homenagem a

Rui Vilarim Pimentel

“Mais importantes que tudo são as pessoas.”
R. V. P.

SUMÁRIO

Capítulo 1: Introdução	1
1.1. As cerâmicas como materiais elétricos.....	1
1.2. As cerâmicas técnicas de alta tensão	4
1.3. Escopo do trabalho: investigação do processo de envelhecimento	5
1.4. Organização do trabalho	6
Capítulo 2: Revisão bibliográfica	7
2.1. Sistemas de Potência	7
2.2. Coordenação de isolamento.....	11
2.2.1. Determinação das solicitações elétricas	11
2.2.1.1. Descargas atmosféricas	12
2.2.1.2. Pulsos de manobra.....	13
2.2.1.3. Sobretensões em frequência industrial	13
2.2.2. Dimensionamento dos dispositivos de proteção.....	14
2.2.3. Aceitabilidade de falhas	14
2.2.4. Dimensionamento do isolamento	14
2.3. Padronização de isoladores.....	15
2.4. Cerâmicas técnicas de alta tensão.....	19
2.5. Porcelana de quartzo C110.....	23
2.5.1. Composição	23
2.5.1.1. Argila.....	23
2.5.1.2. Feldspato.....	26
2.5.1.3. Quartzo	26
2.5.1.4. Vidrado	27
2.5.2. Processo de fabricação	27
2.5.3. Microestrutura	28
2.6. Polarização e perdas na porcelana	33
2.7. Espectroscopia de impedância.....	34
2.8. Ruptura dielétrica da porcelana	37
2.8.1. Ruptura térmica	37
2.8.2. Ruptura elétrica	37

2.9. Ensaio nos isoladores de porcelana.....	40
2.9.1. Ensaio com tensão contínua.....	41
2.9.2. Ensaio com tensão alternada na frequência industrial.....	41
2.9.3. Ensaio com tensão de pulso atmosférico.....	43
2.9.4. Ensaio com tensão de pulso de manobra.....	43
2.9.5. Ensaio de alta frequência.....	44
2.9.6. Ensaio de emissão de radiofrequência.....	44
2.9.7. Ensaio combinados de tensão elétrica e mecânica.....	45
2.9.8. Condições atmosféricas de ensaio.....	45
2.10. Difratomia de raios X.....	46
Capítulo 3: Metodologia.....	48
3.1. Introdução.....	48
3.2. Obtenção das amostras.....	49
3.3. Espectroscopia de impedância.....	55
3.4. Ensaio de rigidez dielétrica.....	57
3.4.1. Ensaio com tensão contínua.....	60
3.4.2. Ensaio em frequência industrial.....	61
3.4.3. Ensaio com pulsos atmosféricos.....	63
3.5. Difratomia de raios X.....	64
Capítulo 4: Análise dos resultados.....	65
4.1. Observações gerais.....	65
4.2. Espectroscopia de impedância.....	65
4.3. Rigidez dielétrica com tensão contínua.....	71
4.4. Rigidez dielétrica em frequência industrial.....	72
4.5. Ensaio com pulsos atmosféricos.....	73
4.6. Difratomia de raios X.....	74
4.7. Interpretação dos resultados.....	78
Capítulo 5: Conclusão.....	80
Referências bibliográficas.....	82
Anexo 1: Descrição da fonte de alta tensão DC.....	87
Anexo 2: Descrição do programa de controle do forno de impedancimetria.....	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1.: Isoladores telegráficos antigos.....	2
Figura 1.2.: Isolador U-937 de Fred M. Locke.....	3
Figura 1.3.: Diagrama de fases ternário da porcelana triaxial.....	5
Figura 2.1.: Custos de transmissão em função da tensão, distância e potência.....	8
Figura 2.2.: Custos relativos em função da tensão da linha.....	8
Figura 2.3.: Diagrama de níveis de um sistema de potência.....	9
Figura 2.4.: Campos elétrico e magnético em torno da linha de transmissão.....	10
Figura 2.5.: Circuito equivalente da linha de transmissão.....	11
Figura 2.6.: Forma de onda do pulso atmosférico.....	13
Figura 2.7.: Isoladores de pino.....	16
Figura 2.8.: Isoladores de pilar.....	17
Figura 2.9.: Isolador bastão.....	18
Figura 2.10.: Isoladores de disco.....	18
Figura 2.11.: Passa muro e bucha de transformador.....	19
Figura 2.12.: Estruturas cristalina e amorfa do SiO ₂	20
Figura 2.13.: Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) da caulinita.....	25
Figura 2.14.: Estrutura cristalina da caulinita.....	25
Figura 2.15.: Imagem de MEV da porcelana de quartzo.....	31
Figura 2.16.: Imagem de MEV de um grão de quartzo.....	31
Figura 2.17.: Sinais senoidais defasados.....	35
Figura 2.18.: Gráfico típico de espectroscopia de impedância.....	36
Figura 2.19.: Influência do tempo de ensaio na tensão de ruptura.....	39
Figura 2.20.: Ensaio de alta frequência.....	44
Figura 2.21.: Difratoograma da porcelana C110.....	47
Figura 3.1.: Isolador de pino perfurado.....	50
Figura 3.2.: Disco de corte diamantado adaptado a um motor DC.....	51
Figura 3.3.: Dispositivo para lixar amostras.....	52
Figura 3.4.: Microfotografia do pó para difratometria de raios X.....	53
Figura 3.5.: Amostras preparadas.....	54
Figura 3.6.: Porta amostras e forno para impedancimetria.....	55

Figura 3.7.: Montagem para espectroscopia de impedância.....	56
Figura 3.8.: Lei de Paschen para tensão de ruptura do ar	57
Figura 3.9.: Câmara pressurizada para ensaios de rigidez dielétrica.....	58
Figura 3.10.: Porta amostras e eletrodos para ensaios de rigidez dielétrica	59
Figura 3.11.: Fonte de alta tensão contínua	61
Figura 3.12.: Circuito da montagem para ensaio em frequência industrial.....	62
Figura 3.13.: Arranjo para ensaios em frequência industrial.....	62
Figura 3.14.: Transformador utilizado nos ensaios de pulso atmosférico	64
Figura 4.1.: Espectroscopia de impedância das amostras 1 e 3	66
Figura 4.2.: Interpolação para um circuito RC da impedancimetria da amostra 1	67
Figura 4.3.: Constantes dielétricas das amostras 1 e 7	69
Figura 4.4.: Diagrama de Arrhenius das amostras 1 e 7.....	70
Figura 4.5.: Oscilogramas e figuras de Lissajous da tensão e corrente da amostra...	70
Figura 4.6.: Microfotografias de amostras que sofreram ruptura térmica e elétrica .	72
Figura 4.7.: Gráfico da resistência da amostra em função dos pulsos aplicados.....	74
Figura 4.8.: Difratomogramas das amostras 1 a 8	75
Figura 4.9.: Principais picos de difração da amostra 1	76
Figura 4.10.: Comparação entre os difratogramas das amostras 6 e 7	77
Figura 4.11.: Comparação entre os difratogramas das amostras 1, 7 e 8	77
Figura 4.12.: Comparação entre os difratogramas das amostras 1 e 8	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.: Propriedades das porcelanas triaxiais	32
Tabela 2.2.: Rigidez dielétrica em relação à orientação cristalográfica	39
Tabela 3.1.: Numeração das amostras	54
Tabela 4.1.: Resistividade e constante dielétrica da amostra 1	68
Tabela 4.2.: Resistividade e constante dielétrica da amostra 7	68
Tabela 4.3.: Resultados dos ensaios de ruptura dielétrica	71
Tabela 4.4.: Resultados dos ensaios com tensão na frequência industrial	72
Tabela 4.5.: Resistência da amostra após os ciclos de pulsos atmosféricos.....	73

ABSTRACT

The triaxial quartz porcelain is one of the most used materials in high and low voltage line insulators. The exposition to the typical overhead transmission line voltages has effect in the microstructure and physical properties of the porcelain, and this is studied in this work. New and field aged samples were collected and prepared for some measures. Impedance spectroscopy, XRD (X-ray diffractometry), dielectric strength tests under DC (direct current), 60 Hz AC (alternating current) and simulated atmospheric discharge pulses. Dielectric strength test systems, voltage generators, chambers and electrodes were planned, built and tested as part of the present work. The aging process was simulated by the atmospheric pulse application, using the resistivity as comparison parameter. It was found that the vitreous phase increased and it was associate to the degradation of the electrical properties of the aged samples.

RESUMO

A porcelana triaxial de quartzo é ainda um dos materiais mais utilizados em isoladores de alta e baixa tensão. A exposição desse material às solicitações elétricas comuns em linhas de transmissão aéreas tem sua influência na microestrutura e nas propriedades físicas da porcelana estudada neste trabalho. Amostras novas e submetidas a condições variadas de uso foram coletadas e preparadas para os ensaios e medidas efetuadas. Foram feitas medições de espectroscopia de impedância e difratometria de raios X, assim como ensaios de ruptura dielétrica, com tensão contínua, em frequência industrial e com pulsos atmosféricos simulados. Os geradores de tensão, a câmara de ensaios e o porta amostras com eletrodos foram projetados, montados e testados como parte do presente trabalho, para os ensaios de rigidez dielétrica. O processo de envelhecimento foi simulado pela aplicação de pulsos atmosféricos, tendo a resistividade como fator de comparação. O aumento da fase vítrea e sua degradação foi associada ao envelhecimento elétrico.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. As cerâmicas como materiais elétricos

As primeiras porcelanas utilizadas como materiais elétricos surgiram a partir de 1830 [1], quando as linhas telegráficas passaram oferecer uma demanda crescente por isoladores elétricos. Os fios condutores de uma linha de transmissão devem ser mantidos eletricamente isolados entre si e do poste de sustentação, a fim de se evitar correntes indesejáveis que representam perda de energia. Diversos materiais disponíveis na época foram tentados, como madeira, vidro, mica, ebonite (borracha endurecida), entre outros, (figura 1.1.). Cada um desses materiais apresentava características distintas de resistência elétrica, mecânica e às intempéries e, entre esses materiais, o vidro é o que apresentava as melhores características, porém maiores dificuldades de produção. Em 1849, Werner von Siemens (1816 – 1892) adotou a mesma porcelana utilizada na louça doméstica para a produção dos isoladores a serem utilizados na linha telegráfica entre Frankfurt e Berlim. Apesar de na época ser considerada inferior ao vidro no que se refere às características físicas, a porcelana era mais econômica e fácil de produzir no formato desejado [1]. A porcelana, entretanto, exigia um controle muito rígido do processo de produção, pois era comum encontrar trincas, inclusões de ar e outros defeitos no corpo do isolador, que reduziam a capacidade de suportar as exigências elétricas e mecânicas de trabalho.



Figura 1.1. Isoladores telegráficos antigos.

Fonte: ICON (Insulators Collectors on the Net) www.insulators.com

Com as primeiras linhas de transmissão de energia elétrica na década de 1880, surgiu a necessidade de isoladores capazes de suportar tensões mais elevadas. As linhas telegráficas operavam com tensões de até 1 kV ou pouco mais, enquanto as linhas de transmissão de energia devem operar com dezenas ou centenas de kV para serem viáveis. O desenho dos isoladores teve que sofrer modificações para evitar que a água e a poluição depositada na superfície do isolador não constituíssem caminhos para a passagem de corrente elétrica e o tamanho das peças aumentou consideravelmente, para poder suportar a tensão elétrica maior. Como a produção de grandes peças de vidro temperado com desenho intrincado é um processo ainda hoje complexo e caro, a

porcelana e outras cerâmicas foram substituindo gradativamente o vidro nos isoladores de alta tensão [2].

Além dos problemas relacionados com defeitos de produção, as primeiras porcelanas eram produzidas por um processo onde a mistura de matérias primas era prensada a seco e queimada, resultando em um material poroso, que absorvia água e deixava de ser bom isolante. Um processo úmido foi desenvolvido por Fred M. Locke (1861 – 1930), na empresa “Imperial Porcelain Works” de Trenton, New Jersey, em que os componentes são misturados com água, moldados a vácuo, torneados, secos e então queimados. O material resultante é praticamente isento de bolhas de ar e suporta bem as intempéries e tensões elevadas [2]. Em 1896 a cerâmica produzida por Fred M. Locke foi utilizada pela primeira vez na linha de transmissão de 40 kV entre a hidrelétrica de Niagara Falls e a cidade de Buffalo, ambas no estado norte americano de New York, (figura 1.2.). Logo os isoladores cerâmicos virtualmente substituíram os isoladores de vidro e permaneceram como os mais utilizados até 1959, quando a empresa “General Electric” apresentou os primeiros isoladores poliméricos. Os materiais poliméricos representam uma drástica redução no peso e tamanho dos isoladores, possuem melhor resistência às intempéries a curto prazo e são quase imunes ao vandalismo. Apesar disso, em condições ambientes severas ou em aplicações onde a substituição do isolador é onerosa, como nas buchas de transformadores, os isoladores cerâmicos continuam sendo preferíveis, pois possuem melhor performance a longo prazo [3].



Figura 1.2. O isolador U-937 de Fred M. Locke, “The Helmet”, utilizado na linha de transmissão Niagara – Buffalo [11].

1.2. As cerâmicas técnicas de alta tensão

As cerâmicas técnicas para uso em sistemas de potência e suas especificações gerais são definidas na norma 60.672 do IEC (International Electrotechnical Commission). Entre as várias cerâmicas definidas nessa norma, foi dada atenção especial à porcelana C110, ou seja, porcelana triaxial de quartzo ou silicosa, devido à sua importância nos sistemas de potência de média e alta tensão dos países em desenvolvimento [4]. Tradicionalmente a porcelana é produzida com base em 3 matérias primas, cujas proporções determinam as características físicas do material resultante, (figura 1.3.). O caulim ($\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$) tem a função de dar plasticidade à massa não queimada, para que possa ser moldada e torneada na forma desejada. O quartzo (SiO_2) atua como agregado e o feldspato ($(\text{Na}, \text{K})\text{AlSi}_2\text{O}_3$) que pode ser potássico ou sódico, funde-se durante a queima da porcelana, dissolvendo parte dos outros componentes e formando o fluxo que solidifica-se durante a fase de resfriamento, conectando os elementos estruturais da porcelana [5]. Durante a sinterização da porcelana ocorrem vários processos químicos e físicos, que dão origem à mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3-2\text{SiO}_2$) e a outros materiais de menor importância, como a cristobalita e o corundum [6].

A microestrutura da porcelana silicosa consiste principalmente de grãos de quartzo, cristais de mulita, fase vítrea e poros ou inclusões de ar. O tamanho e o formato dos grãos de quartzo, dos cristais de mulita e dos poros, assim como a composição e a quantidade de fase vítrea são sensivelmente afetados pela variação na composição das matérias primas e no processo de fabricação, mas mantidos dentro de limites estreitos pelas normas técnicas [7]. A presença de grãos de quartzo na porcelana confere resistência mecânica à mesma, mas tem efeitos indesejáveis. Durante o resfriamento, o quartzo sofre a transformação $\beta \rightarrow \alpha$, que consiste no rearranjo dos átomos na estrutura do material e causa redução do tamanho dos grãos, não acompanhada pela fase vítrea, provocando tensões mecânicas e micro fissuras, o que afeta negativamente o desempenho mecânico e elétrico do material. Nas décadas de 50 e 60 muito esforço foi dedicado à solução desse problema, culminando com a substituição total ou parcial do quartzo pela alumina (Al_2O_3), que é um minério sintético, bem mais caro que o quartzo, obtido a partir da bauxita pelo processo de Bayer. As porcelanas aluminosas são

classificadas na norma IEC 60672 como C120 (porcelana de baixa alumina), com 20 a 30 % de alumina e 10 a 20 % de quartzo em sua composição, e C130 (porcelana de alta alumina), com 80 a 90 % de alumina em sua composição [8]. O alto custo da alumina tem motivado o estudo de materiais alternativos como peças rejeitadas [2], cinzas de usinas termelétricas [9] ou bauxita [10].

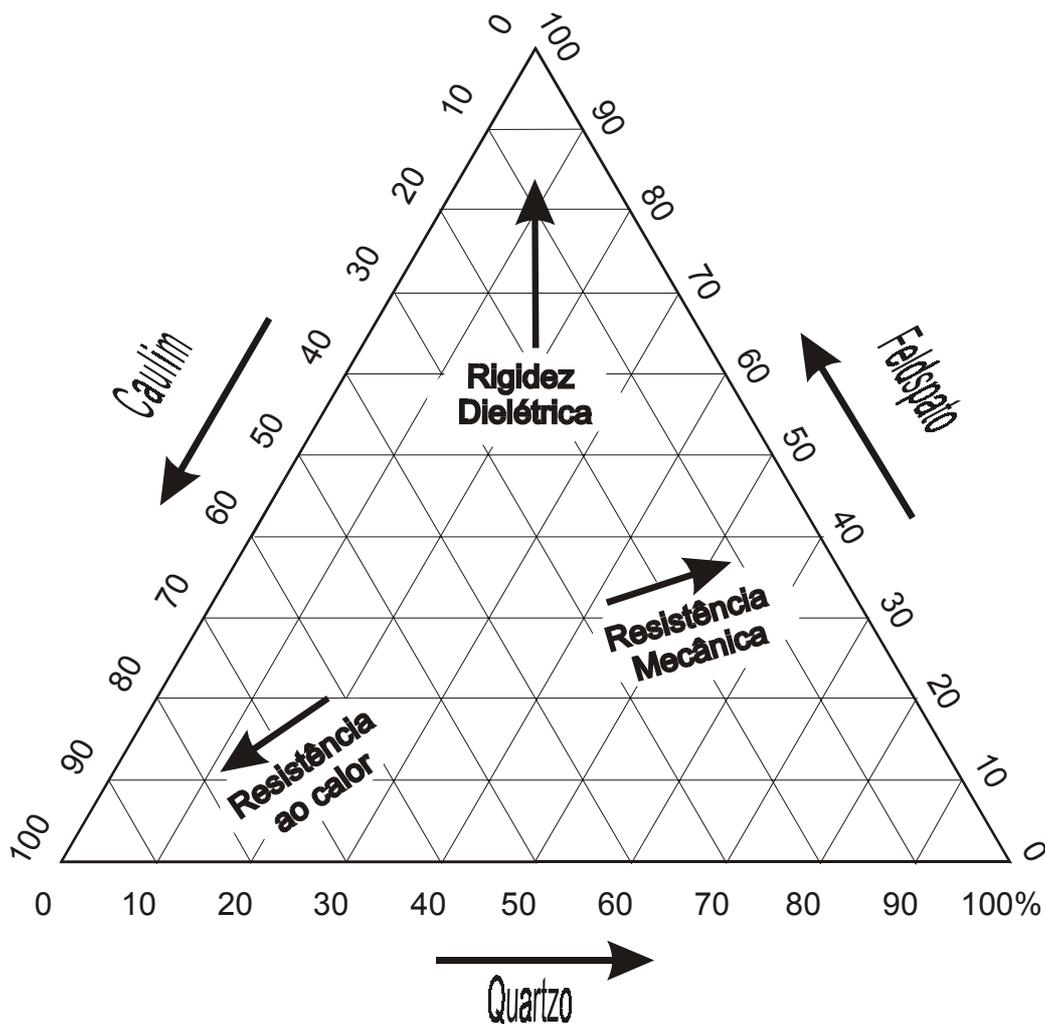


Figura 1.3. Diagrama de fases ternário e características da porcelana triaxial [4].

1.3. Escopo do trabalho: investigação do processo de envelhecimento

A exposição da porcelana às condições de trabalho, especialmente aos campos elétricos criados pela linha de transmissão por ocasião de descargas atmosféricas,

manobras ou acidentes, pode causar alterações permanentes na microestrutura do material, que deterioram suas propriedades elétricas e mecânicas e podem levar à destruição da peça. Sabe-se que a porcelana resiste indefinidamente a um regime normal de tensão elétrica, mas pode degradar-se quando submetida a gradientes elevados de tensão [4]. O objetivo deste trabalho é investigar como as frentes de onda de tensão observáveis em uma linha de transmissão podem afetar a microestrutura da porcelana, quais os efeitos destas alterações nas características físicas do material e estimar a suportabilidade do material a esses transientes.

Amostras de isoladores comerciais novos e envelhecidos em campo foram estudados com o objetivo de determinar a composição, microestrutura e propriedades elétricas, visando investigar as alterações causadas pelo envelhecimento em campo. Amostras novas foram submetidas a ciclos de trabalho em laboratório e analisadas, buscando correlação com as modificações encontradas nas amostras envelhecidas em campo.

1.4. Organização do trabalho

O trabalho começa com a revisão bibliográfica, com uma rápida abordagem da teoria dos sistemas de potência, da coordenação de isolamento e da caracterização das solicitações elétricas comuns em uma linha de transmissão. A seguir são estudados os materiais cerâmicos utilizados em isoladores de alta tensão, com especial enfoque na porcelana triaxial de quartzo, abordando sua composição, fabricação, microestrutura e polarização elétrica. A teoria dos métodos de medição e ensaios utilizados é abordada, concluindo a revisão bibliográfica. Os procedimentos realizados para a coleta e preparação de amostras, assim como para as medidas e ensaios, são descritos no capítulo 3, incluindo a montagem de equipamentos e dispositivos desenvolvidos especialmente para este trabalho e a solução de problemas encontrados durante os procedimentos. Os resultados são apresentados e analisados no capítulo 4 e as conclusões ocupam o capítulo 5.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sistemas de potência

O problema da transmissão de energia elétrica das fontes geradoras para os centros de consumo sempre foi encarado como uma das maiores dificuldades para o uso da energia elétrica. No final do século XIX a empresa “Niagara Falls Power Company” ofereceu 100 mil dólares a quem desenvolvesse um método de transmitir eletricidade a longas distâncias, prêmio recebido por Nicola Tesla (1856 – 1943) em 1893 [11]. Ao contrário do que possa parecer, não se trata apenas de interligar com fios o gerador e o consumidor, pois a tensão adequada de funcionamento das máquinas elétricas geradoras não permite a construção de uma linha de transmissão viável. Um gerador típico fornece uma tensão entre 0,5 e 20 kV, o que implica em correntes da ordem de milhares de ampères. Para transportar correntes dessa magnitude sem perdas exageradas, seriam necessários cabos elétricos muito espessos, o que tornaria a linha de transmissão inviável tanto do ponto de vista técnico como econômico. Para que o sistema seja realizável, é preciso que a tensão gerada nas usinas seja elevada para um valor adequado para a linha de transmissão (dezenas ou centenas de kV) e então gradualmente abaixada conforme as linhas de transmissão ramificam-se e aproximam-se dos pontos de consumo [12]. Na figura 2.1. pode-se ver como o aumento na tensão reduz os custos com a transmissão de energia em linhas construídas na década de 1960 nos Estados Unidos da América. Não se pode entretanto elevar indiscriminadamente a tensão de uma linha de transmissão, pois quanto maior a tensão, maior a distância mínima entre os cabos e as torres e o solo, o que leva a estruturas maiores e mais complexas, tanto para

as torres como para os isoladores, aumentando os custos com a construção e a manutenção da linha. Forma-se então uma contraposição entre os custos fixos com a implantação e manutenção da linha de transmissão e os custos relativos à perda de energia, o que implica na existência de um ponto ótimo para a tensão de um linha de transmissão, (figura 2.2.) [13]. O nível adequado de tensão é função da potência transmitida e da distância percorrida pela linha de transmissão, entre outros fatores.

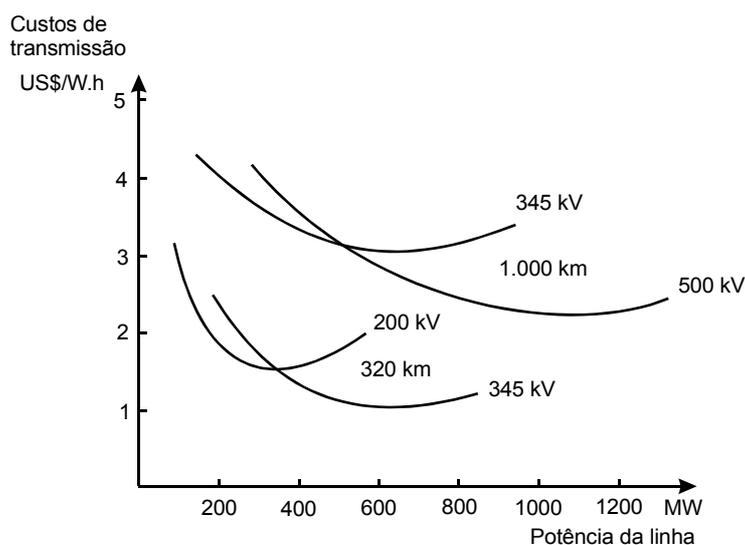


Fig. 2.1. Custos de transmissão em função da tensão, do comprimento e da potência da linha [13].

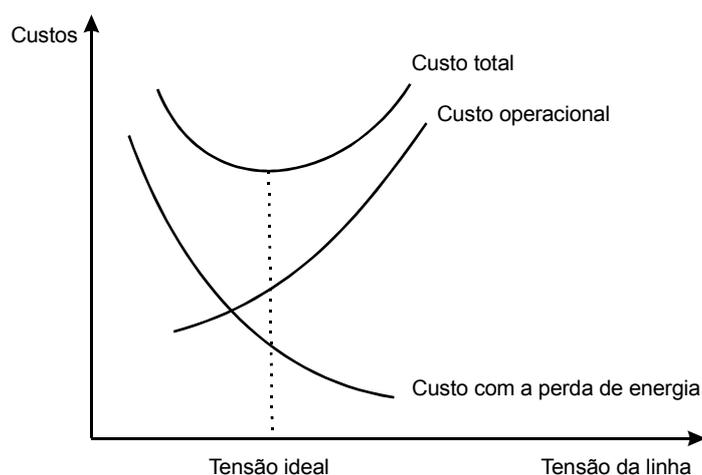


Fig. 2.2. Custos relativos em função da tensão da linha de transmissão [13].

Os equipamentos mais adequados para elevar e abaixar a tensão elétrica são os transformadores, que somente operam em corrente alternada [4]. A discussão sobre qual seria o melhor sistema para transmissão de energia elétrica deu origem à inimizade entre Thomas Edson (1847 – 1931), que defendia o uso de corrente contínua, e Nicola Tesla, que defendia o sistema de corrente alternada utilizado até hoje [14]. Os transformadores são montados junto com equipamentos de proteção e manobra e fazem a transição entre os níveis do sistema, como pode ser visto na figura 2.3. Por exemplo, os geradores da usina hidrelétrica de Xingó, em Canindé do São Francisco – SE, geram uma tensão de 18 kV e uma corrente que pode chegar a 10 kA em cada uma das três fases de cada um dos seis geradores. A tensão fornecida pelos geradores é elevada por transformadores na própria usina para 500 kV. Nesse nível de tensão a energia é distribuída para linhas de transmissão com destino a estações em Sergipe, Bahia, Alagoas e Pernambuco. Na subestação Jardim em Nossa Senhora do Socorro – SE, transformadores reduzem a tensão de 500 kV para 69 kV, que é conduzida por linhas de transmissão até subestações dentro da cidade de Aracaju – SE, como a subestação de Grageru, por exemplo. Lá a tensão é reduzida para 13,8 kV e distribuída para diversas linhas de transmissão que percorrem as ruas da cidade. Transformadores instalados em postes reduzem esta tensão para 127/220 V (tensão neutro – fase / tensão fase – fase) que é o nível de tensão de consumo em Aracaju.

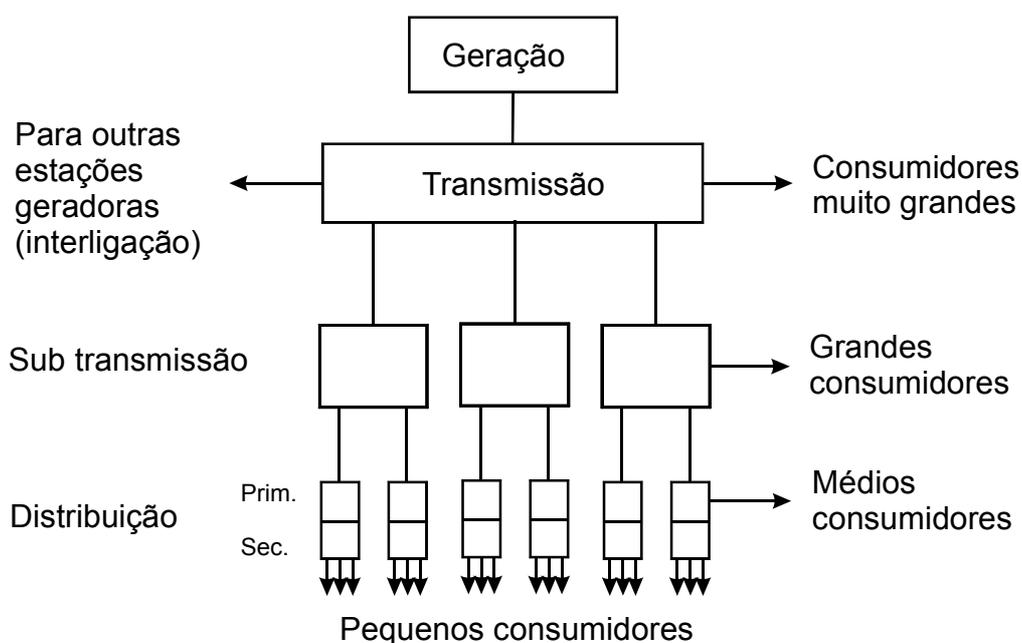


Fig. 2.3. Diagrama de níveis de um sistema de potência [12].

As linhas de transmissão não são apenas condutores e representam papel importante no sistema, armazenando e dissipando energia. A corrente que passa pelos fios cria um campo magnético que armazena energia e atua sobre os outros condutores da linha de transmissão. O campo magnético cria o caráter indutivo da linha de transmissão. O campo elétrico criado pela tensão a que são submetidos os condutores da linha de transmissão cria o caráter capacitivo da linha de transmissão, também armazenando energia e influenciando na tensão e corrente dos outros condutores da linha, (figura 2.4.). Parte do campo elétrico e do campo magnético é perdida e, junto com a energia perdida pela queda de tensão nos condutores e pelas correntes de fuga nos isoladores, contribuem para as perdas de energia que representam o caráter resistivo da linha de transmissão. A linha de transmissão pode então ser entendida por meio de um circuito equivalente composto por inúmeros indutores, capacitores e resistores, (figura 2.5.). Quando faz-se tender para infinito o número de elementos desse circuito, obtém-se o comportamento real da linha de transmissão, que por isso classifica-se como um circuito de parâmetros distribuídos. Um circuito composto por um número finito de componentes é denominado circuito de parâmetros concentrados. As equações decorrentes dessa análise mostram que a energia propaga-se pela linha de transmissão por ondas eletromagnéticas, o que implica em fenômenos como a reflexão e formação de ondas estacionárias [15].

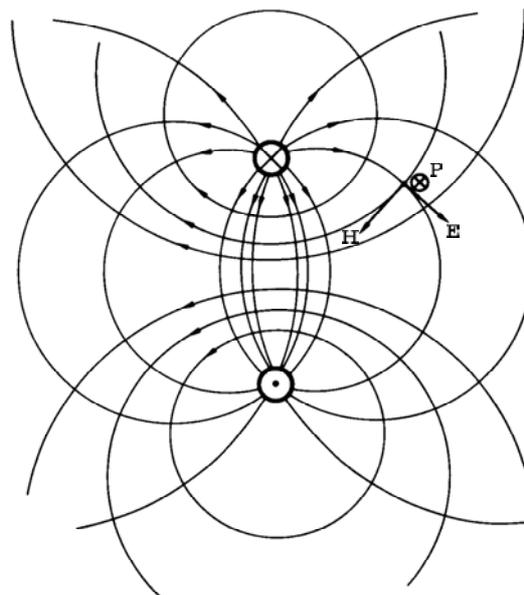


Fig. 2.4. Campo elétrico e magnético em torno dos condutores de uma linha de transmissão [13].

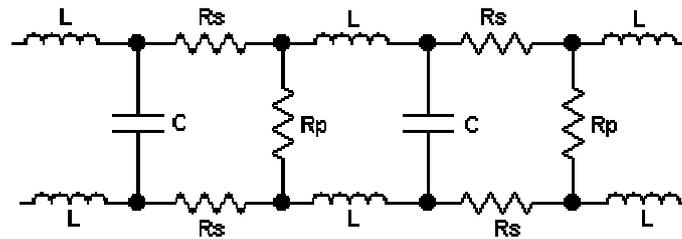


Fig. 2.5 Representação do circuito equivalente de uma linha de transmissão [4].

A ocorrência de descargas atmosféricas, acidentes ou manobras nos equipamentos conectados às linhas de transmissão dão origem a perturbações de corrente e tensão nas linhas de transmissão, denominadas transitórios eletromagnéticos, que se propagam pelas linhas e podem causar problemas para a linha e para os equipamentos a ela conectados [15]. São importantes para este trabalho os transitórios de tensão observáveis na linha provocados por manobras e descargas atmosféricas, que são estudados a seguir.

2.2. Coordenação de isolamento

Pode-se definir a coordenação de isolamento como sendo o estudo do problema de dimensionamento do isolamento e dos equipamentos de proteção em função das solicitações elétricas esperáveis [16]. Quatro tópicos devem ser estudados para a correta solução desse problema, relacionados a seguir.

2.2.1. Determinação das solicitações elétricas

Os isoladores e equipamentos de uma linha de transmissão são submetidos a tensões maiores que a tensão nominal da linha em determinadas circunstâncias. Em 1941, um comitê formado pelo AIEE (American Institute of Electrical Engineers), pelo EEI (Edson Electric Institute) e pela NEMA (National Electrical Manufacturers Association) apresentou um relatório sobre um estudo de 10 anos realizado junto a

empresas fabricantes de equipamentos e operadoras de sistemas de potência, onde são estabelecidas as formas de onda e amplitudes típicas das sobretensões e os níveis básicos de isolamento necessários para suportá-las. Esse estudo serviu de base para a elaboração das normas técnicas internacionais sobre ensaios de alta tensão e coordenação de isolamento[16]. As solicitações elétricas são agrupadas em três categorias, de acordo com a origem da sobretensão.

2.2.1.1. Descargas atmosféricas

Quando um raio atinge um condutor de uma linha de transmissão, um pulso de corrente de grande intensidade e curta duração é injetado na linha. A tensão que desenvolve-se é função da intensidade da descarga e da impedância da linha no ponto de contato. Duas frentes de tensão propagam-se, uma em cada direção, sobrepostas à tensão normal da linha. Na figura 2.6. é mostrada a forma de onda aproximada de uma descarga atmosférica típica em uma linha de transmissão. A duração desse pulso varia entre 10^{-5} e 10^{-3} segundos, com valores típicos de 1,2 microssegundos para subida (T_1) e 50 microssegundos de duração (T_2). Por esse motivo, essa forma de onda é conhecida também por 1,2 x 50 ou pulso de frente muito rápida [16]. O rápido crescimento da tensão, que pode atingir 10^{13} V/s, tem grande potencial para provocar danos nos materiais dielétricos [4]. Como o raio tem polaridade, pode ser mais fácil haver ruptura com uma polaridade que em outra, caso o isolador possua assimetria em seu formato ou estrutura. Raios que caem nas torres, cabos pára-raios ou próximo às torres também produzem, com menor intensidade, transientes elétricos nas linhas de transmissão. A incidência de raios nas linhas de transmissão pode variar entre 0,5 e 3 raios por quilômetro a cada ano, com intensidade média de 5.000 A [17]. A ocorrência de raios entretanto é um dos fenômenos naturais menos compreendidos e mais surpreendentes. Enquanto um trecho da linha de transmissão parece ser imune a raios, o trecho imediatamente seguinte é assolado por descargas frequentes, sem nenhuma razão aparente [18].

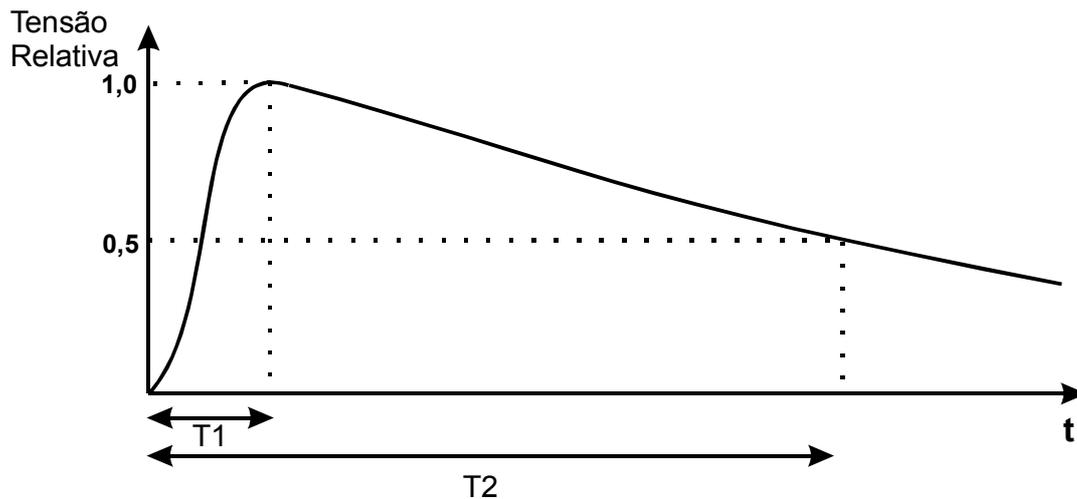


Fig. 2.6 Forma de onda aproximada do pulso atmosférico [16].

2.2.1.2. pulsos de manobra

A comutação de cargas e equipamentos conectados às linhas de transmissão provocam súbitas mudanças nas correntes e tensões da linha, que se propagam pela mesma, assim como os pulsos atmosféricos. A diferença é que geralmente os pulsos de manobra têm amplitude menor e duração maior que os pulsos atmosféricos. O pulso de manobra tem forma de onda semelhante à do pulso atmosférico, mas a duração desses pulsos pode variar entre 10^{-3} e 10^{-1} segundos e o pulso típico tem 250 microssegundos de subida (T_1) e 2500 microssegundos de duração (T_2). Acidentes com a linha como curtos-circuitos e rompimentos de cabos geram transitórios semelhantes aos de manobra e não merecem atenção especial, do ponto de vista dos efeitos sobre o isolamento [16].

2.2.1.3. Sobretensões na frequência industrial

As sobretensões em frequência industrial são elevações da amplitude da tensão presente na linha, sem modificações significativas na forma de onda e na frequência da mesma. São causadas principalmente por desequilíbrios entre as fases, ressonâncias do sistema e funcionamento inadequado do mecanismo de regulação do gerador. Essas solicitações podem permanecer por períodos de várias horas, antes que a causa seja

solucionada. Durante este período, os isoladores podem ter sua temperatura elevada em decorrência do efeito Joule, chegando à ruptura térmica. Estudos também mostram que a porcelana submetida a campos elétricos por longos períodos à temperaturas entre 100 e 300 °C apresentam deterioração substancial em suas propriedades elétricas e mecânicas [19].

2.2.2. Dimensionamento dos dispositivos de proteção

Os dispositivos de proteção contra sobre tensão, inicialmente os centelhadores e recentemente os varistores de óxido metálico, permitem limitar a amplitude das solicitações elétricas, porém possuem custo elevado e seu uso deve ser bem planejado para manter aceitável a relação custo – confiabilidade do sistema. Os dispositivos de proteção são normalmente utilizados com a finalidade de proteger os transformadores e outros equipamentos de alto custo e não para proteger os isoladores, uma vez que o custo dos protetores é maior que o dos isoladores [12].

2.2.3. Aceitabilidade de falhas

A legislação estabelece limites para a aceitabilidade de falhas do serviço de fornecimento de energia elétrica. Em sistemas de transmissão, onde uma falha provoca falta de energia em cidades inteiras, a repercussão pública é também um fator a ser considerado [16].

2.2.4. Dimensionamento do isolamento

Estabelecido o regime de tensão e a aceitabilidade de falhas, é possível calcular o nível de isolamento necessário. Na prática os sistemas são padronizados e os dispositivos, entre eles os isoladores, são classificados em tipo e classe de tensão [12].

2.3. Padronização de isoladores

Os isoladores utilizados em linhas de transmissão são classificados quanto à forma em três tipos principais.

A) Isoladores de pino

Os isoladores de pino são fixados à estrutura por um pino de aço forjado que possui uma cabeça com rosca na qual é atarraxado o isolador, ver figura 2.7. Os isoladores de pino permitem uma construção simples e econômica de linha de transmissão, mas não são adequados para linhas de potência elevada, pois os pinos não suportam os esforços mecânicos de cabos pesados. São amplamente utilizados em linhas de distribuição de 13,8 kV e em linhas de 69 kV de eletrificação rural e de pequenas cidades [12]. Os isoladores de pino podem ser constituídos por uma única peça, nesse caso são denominados monocorpo, ou constituídos por duas ou mais peças unidas por cimento, nesse caso denominados multicorpo. Os isoladores multicorpo podem ser maiores e ter desenho mais complexo, suportando tensões maiores, porém não suportam bem grandes variações de temperatura, devido a diferenças no coeficiente de dilatação entre as peças e o cimento [4]. O isolador da esquerda na figura 2.7. é um exemplo típico de isolador de pino monocorpo e o isolador da direita é um isolador multicorpo.

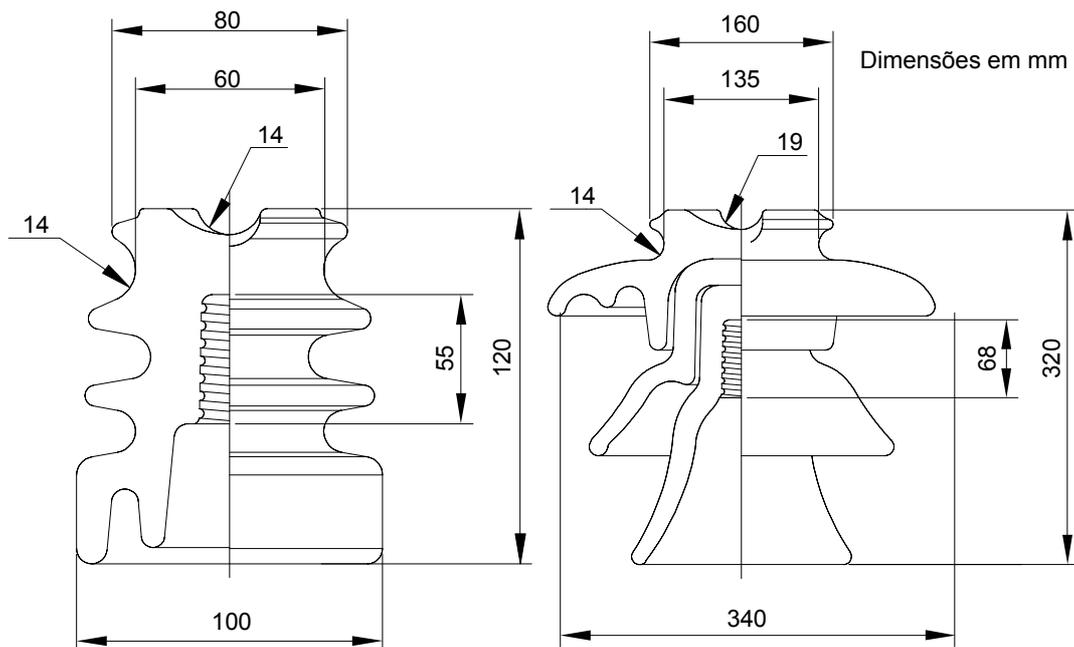


Fig. 2.7. Isoladores de pino classe 15 kV, à esquerda, e 69 kV à direita [20].

B) Isoladores de pilar

Os isoladores de pilar são semelhantes aos isoladores de pino, porém são fixados diretamente ao poste ou estrutura de sustentação. Possuem maior resistência à perfuração elétrica e à compressão, mas sem o pino de aço para oferecer flexibilidade, são susceptíveis a esforços impulsivos de tração na linha. Também por isso somente são produzidos pilares monocorpo, utilizados geralmente em linhas de 13,8 ou 69 kV. São pouco empregados no Brasil [12]. A figura 2.8. mostra exemplos de isoladores tipo pilar.



Fig. 2.8. Isoladores tipo pilar classe 15 kV. Fonte: Cerâmica Santa Terezinha SA.

C) Isoladores de suspensão

Os isoladores de suspensão podem ser fabricados em uma única peça ou monocorpo, sendo então denominados isoladores bastão, figura 2.9., ou na forma de discos que podem ser empilhados formando uma cadeia de isoladores. Os discos são acoplados pelo sistema concha – bola ou garfo – olhal. O primeiro é de montagem mais simples enquanto o segundo é mais robusto, mas mais propenso a ocorrência de efeito corona. O efeito corona ocorre quando o ar é ionizado devido ao campo elétrico intenso criado por pontas ou arestas de partes metálicas submetidas a potenciais elevados. É facilmente identificado pelo brilho azulado, pelo ruído e pelo odor do ozônio produzido. Além da perda de energia, o efeito corona pode danificar a superfície dos isoladores por fusão, causar corrosão nas ferragens dos isoladores e da torre devido ao ozônio e emitir radiointerferência, ou seja, sinais de rádio que podem interferir em serviços de telecomunicações [12]. A figura 2.10. mostra isoladores de disco com os dois tipos de engate. Os isoladores de disco devem ser fabricados dentro de rígidas tolerâncias dimensionais para que as unidades produzidas por diferentes fabricantes possam ser intercambiáveis [20].



Fig. 2.9. Isolador tipo bastão classe 15 kV.

Fonte: Cerâmica Santa Terezinha SA.

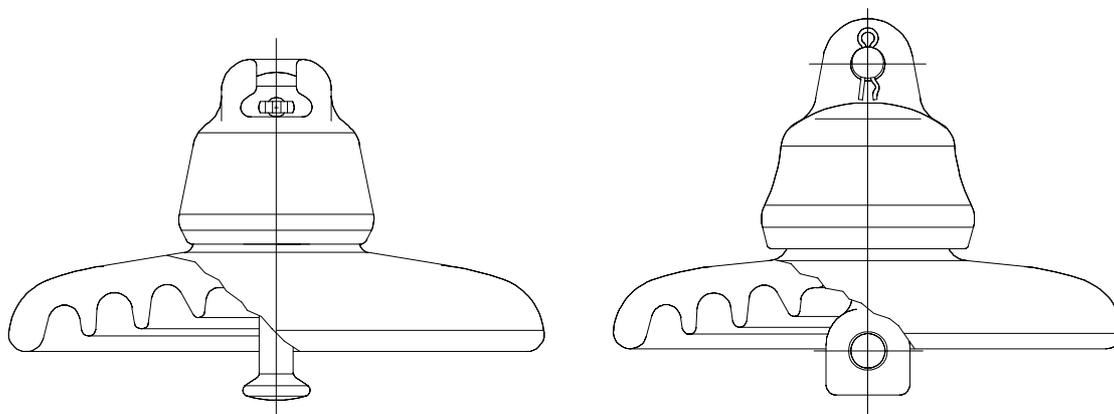


Fig. 2.10. Isoladores disco. À esquerda com engate concha – bola.

À direita com engate garfo – olhal [20].

O número de discos em uma cadeia depende da tensão da linha, do tipo de isoladores e do grau de poluição ambiental, podendo chegar a cinquenta discos em uma única cadeia. O potencial não distribui-se uniformemente entre os discos, tendendo a acumular-se nos discos mais próximos da linha. Esse efeito pode ser atenuado com o uso de anéis equalizadores ou anti-corona. Em regiões de poluição intensa, próximo a parques industriais ou ao litoral, pode-se utilizar discos especiais anti-poluição, com saias maiores [12].

Existem ainda isoladores utilizados em subestações e em equipamentos. Transformadores e reatores, por exemplo, possuem isoladores por dentro dos quais passam as conexões de alta tensão. Esses isoladores e seus condutores internos são

denominados buchas. Dispositivos semelhantes são empregados quando a linha de transmissão deve atravessar uma parede, nesse caso os dispositivos são denominados passa muro [20]. A figura 2.11 mostra uma bucha de transformador e um passa muro.



Fig. 2.11. Passa muro e bucha de transformador. Fonte: Cerâmica Santa Terezinha SA.

Quanto ao material, os isoladores podem ser construídos com vidro, cerâmicas e materiais poliméricos. Dentro do escopo deste trabalho, as cerâmicas serão classificadas a seguir.

2.4. Cerâmicas técnicas de alta tensão

A palavra cerâmica deriva do grego *keramos*, que significa “coisa queimada” e refere-se aos produtos não metálicos endurecidos pelo fogo. Inicialmente o termo referia-se apenas a materiais que continham argila em sua composição, mas tem sido estendido a outras substâncias elaboradas por processos tecnológicos semelhantes aos utilizados com argila, especialmente no que se refere à queima em forno [4]. Uma definição atual mais apropriada seria: “cerâmicas são combinações sólidas que são formadas pela aplicação de calor ou calor e pressão, compreendendo ao menos um metal e um elemento sólido não metálico, uma combinação de dois ou mais elementos sólidos não metálicos ou dois ou mais elementos sólidos não metálicos e um não metal.” [21]

Estruturalmente predominam nas cerâmicas as fases cristalinas, com moderada participação da fase vítrea. As fases cristalinas são formadas por grãos de material cristalino, ou seja, materiais que apresentam ordem de longa distância em sua estrutura, como no exemplo ilustrado na figura 2.12 a. A fase vítrea é formada por material amorfo, ou seja, material que apresenta apenas ordem de curta distância, como ilustrado no exemplo da figura 2.12 b [21]. A proporção entre as fases cristalinas e amorfa da cerâmica tem influência marcante nas propriedades elétricas e mecânicas [4].

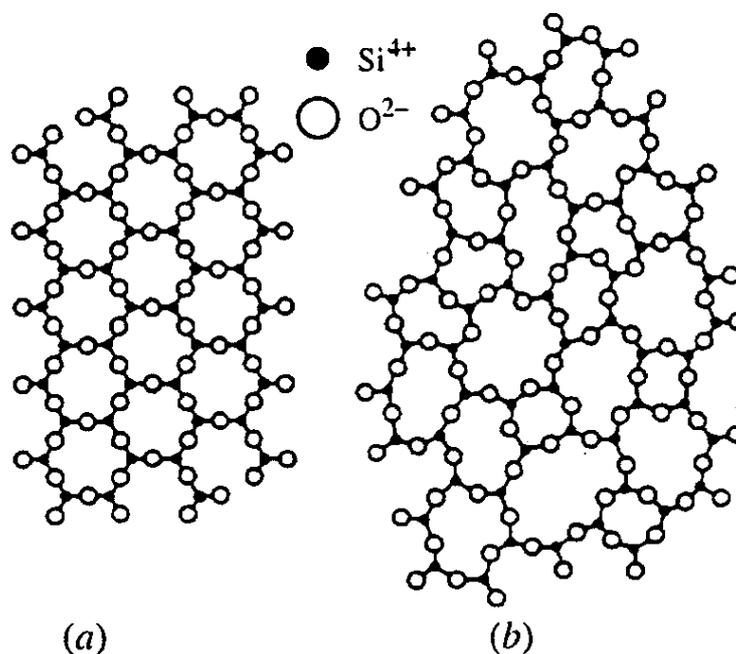


Fig. 2.12 Exemplos de estruturas cristalina (a) e amorfa (b) do SiO₂ [21].

Existe uma grande quantidade de materiais cerâmicos e a cada dia surgem novos materiais. Em 1956, o comitê alemão de normas propôs a norma DIN 40.685 (Deutsch Industrie Norm), que classifica os materiais cerâmicos dielétricos. Inicialmente foram criados 7 grupos de materiais, posteriormente ampliados para 9 grupos, conforme novos materiais foram surgindo. A norma IEC 60.672, internacionalmente aceita, é fundamentada na norma alemã e usa a mesma classificação [22]:

Grupo C100: Aluminossilicatos. Nesse grupo estão a porcelana de quartzo (C110), a porcelana de alumina (C120), a porcelana de alta alumina (C130) e a porcelana de dissilicato de lítio ($\text{SiO}_2 - \text{LiO}_2$) (C140). Variações no processo de fabricação também são classificados, como por exemplo a porcelana de quartzo prensada (C111). Os materiais desse grupo têm boas características elétricas e mecânicas e são utilizados como isoladores elétricos de alta e baixa tensão [22].

Grupo C200: Silicato de magnésio. Esse é o grupo da esteatita ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$) (C220) e da forsterita (Mg_2SiO_4) (C240). Além de boas características elétricas e mecânicas, a esteatita possui boa estabilidade dimensional durante o processo de fabricação, o que permite a obtenção de peças com dimensões precisas. Além disso, possui baixo fator de perdas em altas frequências, especialmente quando é adicionada pequena quantidade (7%) de óxido de bário em sua composição (C221), tornando-a ideal para isoladores e capacitores em equipamentos de alta frequência, como transmissores e antenas de rádio [22].

Grupo C300: Titanatos e outras cerâmicas de alta permissividade. Esse grupo reúne as cerâmicas especialmente desenvolvidas para uso como dielétrico em capacitores de alta frequência. O dióxido de titânio (C310) permite a produção de capacitores com elevada relação capacitância / tamanho, apesar de possuir elevado coeficiente de variação da capacitância com a temperatura. O titanato de magnésio (C320) apresenta permissividade um pouco menor, mas coeficiente de variação da capacitância com a temperatura bem menor. O titanato de cálcio e estrôncio – bismuto (C340) e a família dos óxidos com estrutura perovskita (C350) fazem parte também desse grupo [22].

Grupo C400: Silicato de magnésio e alumínio. O representante mais conhecido desse grupo é a cordierita ($(\text{Mg,Fe})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18} \cdot n\text{H}_2\text{O}$) (C410). Sua principal característica é o pequeno coeficiente de expansão térmica e a elevada resistência a choques térmicos, que a fazem um excelente material para suporte de resistências [22].

Grupo C500: Silicato de magnésio e alumínio poroso. Materiais do grupo C400 produzidos por métodos que tornam o produto final poroso. É possível controlar precisamente o tamanho e a distribuição dos poros, o que permite a obtenção de bons substratos para sensores e transdutores. A cordierita porosa (C520 e C530) apresenta ainda uma boa resistência a atmosferas e materiais agressivos [22].

Grupo 600: Mulita. As cerâmicas produzidas com base na mulita apresentam bom desempenho em altas temperaturas, são refratárias e apresentam boa condutividade térmica, sendo então utilizadas em peças para fornos de alta temperatura, como por exemplo tubos para proteção de termopares. Outra aplicação comum da mulita é em velas de ignição para motores de combustão interna. A mulita compreende um grupo de materiais com composição variável de Al_2O_3 e SiO_2 . A cerâmica C610 contém 50 a 65 % de Al_2O_3 e a cerâmica C620 contém 65 a 80 % de Al_2O_3 [22].

Grupo 700: Alumina. Nesse grupo são classificadas as cerâmicas compostas praticamente por alumina pura. A alumina é um material de excelentes características térmicas, mecânicas e elétricas, porém é um material dispendioso. Nesse grupo as cerâmicas são classificadas pela pureza, desde 30 % de alumina (C730) a 99% de alumina (C799). Devido ao custo, a alumina é empregada apenas em aplicações que exigem materiais de alto desempenho [22].

Grupo C800: Outros materiais – óxidos. Esse grupo é reservado para óxidos de metais não classificados nos grupos anteriores, como o óxido de berílio (C810), um excelente condutor térmico e isolante elétrico, utilizado na indústria de semicondutores como substrato para dispositivos de alta frequência e potência. Outro material desse grupo é o óxido de magnésio (C820), também bom condutor térmico e isolante elétrico, não tão bom em altas frequências quanto o óxido de berílio, mas mais econômico e seguro. É bastante utilizado em resistências blindadas [22].

Grupo C900: Outros materiais – não óxidos. Esse grupo é reservado para as cerâmicas que não são óxidos metálicos, especialmente os nitretos. O nitreto de alumínio (C910), os nitretos de boro (C920) e os nitretos de silício (C930) são exemplos desse grupo. São estudados como substitutos dos óxidos em aplicações de alta performance [23].

2.5. Porcelana de quartzo C110

A grande importância da porcelana como material elétrico de alta tensão, especialmente em países em desenvolvimento, se deve à resistência da mesma a agentes atmosféricos, ao seu baixo custo e à relativa facilidade de produção. Suas principais desvantagens são sua fragilidade mecânica e seu peso relativamente elevado [4].

2.5.1. Composição

As matérias primas utilizadas na fabricação da porcelana C110 são a argila (45 a 50 %), o feldspato (25 a 30 %) e o quartzo (20 a 25 %). Variações nas proporções se devem à qualidade das matérias primas, que pode variar consideravelmente entre origens e lotes [10].

2.5.1.1. Argila

A função da argila é dar plasticidade à massa não queimada. A plasticidade ou trabalhabilidade de uma argila é a propriedade que se manifesta na mudança de forma sem ruptura de uma massa feita com argila e água por aplicação de força exterior e pela retenção da forma quando a força é removida ou reduzida abaixo de um certo valor, denominado tensão de cedência. O grau de deformação da massa de argila antes que haja ruptura aumenta progressivamente com a quantidade de água até um limite, a partir do qual a massa torna-se saturada e perde a plasticidade. A água, em quantidade

adequada, funciona como um lubrificante que facilita o deslizamento das partículas umas sobre as outras. Os principais fatores que afetam a plasticidade são a mineralogia, a granulometria, a forma e carga elétrica dos cristais e o estado de desfloculação da argila [24]. Durante a secagem, a argila passa por uma redução volumétrica de cerca de 20 %, que deve ser levada em consideração na moldagem da peça. Caso a secagem ocorra rápido demais, poderão ocorrer rachaduras que inutilizarão a peça. A argila tem origem na sedimentação de lagos e pântanos e na decomposição de rochas por intemperismo. Para a produção de porcelana, a argila deve ser caulínica, a fim de fornecer a caulinita, que durante a sinterização vai se decompor e formar cristais de mulita. O termo caulim origina-se da localidade Kao-Ling, na província Jianxi, China, de onde era extraído o minério, desde tempos muito remotos. Traduzido literalmente, Kao-Ling significa morro branco. A maioria das argilas puras é constituída principalmente pela caulinita. O mineral caulinita ocorre em placas de formato aproximadamente hexagonal, com tamanho médio de 0,7 micrômetros de diâmetro e 0,05 micrômetros de espessura, com muitas placas empilhadas, ver figura 2.13. O cristal da caulinita é composto por folhas paralelas compostas por uma camada tetraédrica coordenada por átomos de silício e uma camada octaédrica coordenada por átomos de alumínio, (figura 2.14) [24]. É comum representar a fórmula de materiais cristalinos de maneira que lembra a organização dos átomos na estrutura. A caulinita que tem composição $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ pode ser melhor representada por: $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. O Brasil possui cerca de 14 % das reservas mundiais de caulinita, com as principais jazidas nos estados do Pará, Amapá e Amazonas [25].

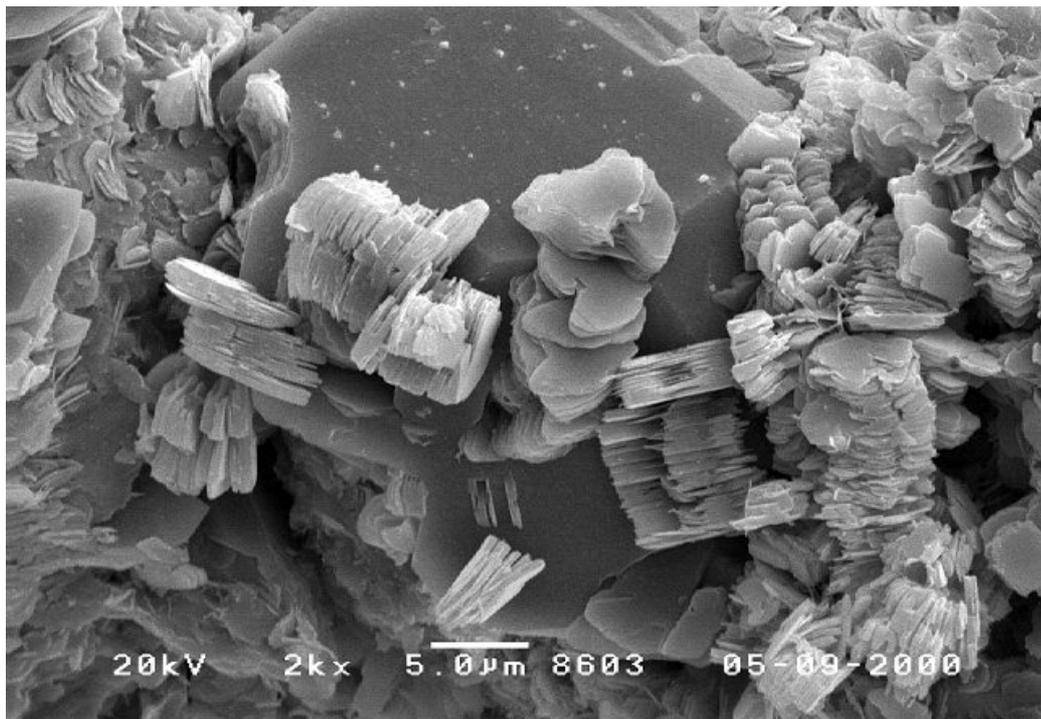


Fig. 2.13. Imagem de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) mostrando cristais de caulinita sobre um grão de quartzo. Fonte: OMNI Laboratories, Inc.

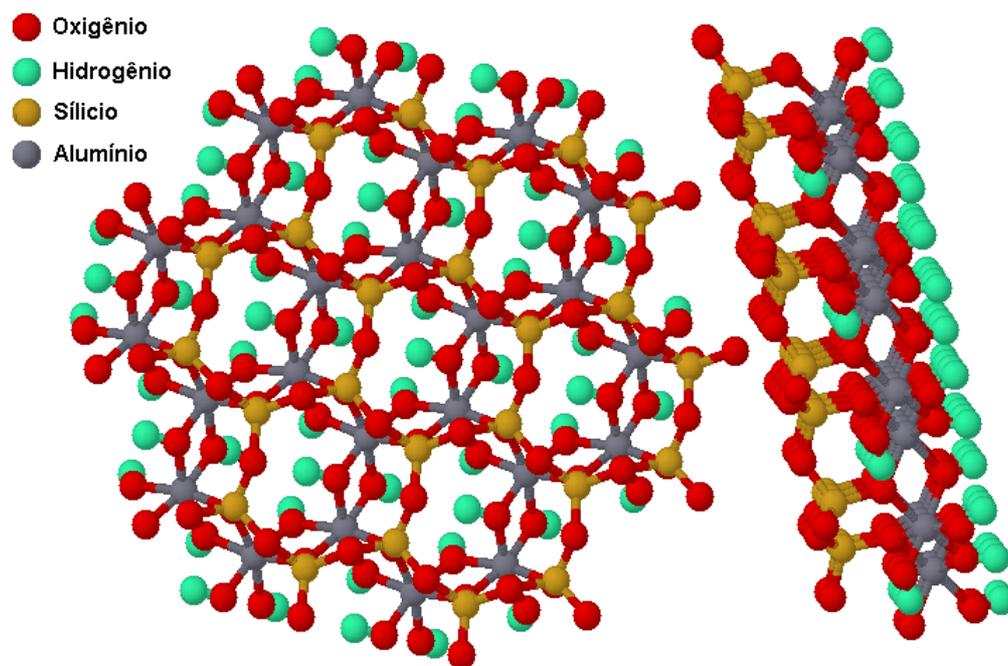


Fig. 2.14. Estrutura cristalina da caulinita. Projetado com o programa MDL Chime.

2.5.1.2. Feldspato

O feldspato entra na composição da porcelana para servir de fluxo ou fundente, permitindo a sinterização via fase líquida. O termo feldspato envolve uma série de minerais que são agrupados, conforme a composição, como feldspatos potássicos ou alcalinos, feldspatos sódicos e feldspatos de cálcio, podendo ser encontradas composições intermediárias entre esses três grupos. Os feldspatos utilizados na produção de porcelanas estão compreendidos entre os potássicos e os sódicos. A relação entre o potássio e o sódio na fase vítrea da porcelana tem efeito marcante na condutividade, especialmente em altas temperaturas. A predominância de feldspato potássico melhora as características elétricas da porcelana e produz um fluxo mais viscoso, que evita a deformação da peça durante a queima [19, 5]. Estudos mostram que a presença de feldspato de cálcio tem efeitos positivos nas características elétricas e mecânicas da porcelana [19]. A estrutura atômica do feldspato consiste em geral em um reticulado de tetraedros de SiO_4 com uma estrutura aberta onde se situam os átomos de sódio, potássio ou cálcio. Para a produção de porcelana não interessa a forma cristalina do feldspato e sim a sua composição. Normalmente são utilizadas misturas de minérios de diversas procedências, de forma a se obter a composição desejada [24]. O feldspato é encontrado em muitas rochas ígneas e representa mais da metade da composição da crosta terrestre. A maior fonte de feldspato para a indústria são os pegmatitos [24]. O Brasil detém 1,1 % das reservas mundiais de feldspato, com jazidas em Minas Gerais e São Paulo, principalmente [25].

2.5.1.3. Quartzo

O quartzo é um dos poucos minerais que apresentam cristais naturais grandes e puros. Sua estrutura compacta de tetraedros de SiO_4 confere resistência e pureza aos seus cristais. O quartzo está presente na maioria das rochas e é encontrado puro em veios. No Brasil são encontrados excelentes cristais utilizados para produção de lentes e dispositivos ópticos. Para a produção de cerâmica, os arenitos e quartzitos são utilizados como matéria prima, devido aos custos menores. As areias raramente são utilizadas,

pois normalmente não são puras o suficiente [24]. O quartzo é adicionado à porcelana como agregado, para dar volume e resistência. Durante a secagem o quartzo reduz a retração da peça, diminuindo a possibilidade de haver rachaduras. Durante a queima, nas temperaturas mais altas, o quartzo é dissolvido no vidro feldspático, aumentando a viscosidade e permitindo a formação de maior quantidade de mulita [26]. O quartzo sofre transformação reversível da forma α para a forma β na temperatura de 573 °C, que envolve brusca variação no volume. Durante o resfriamento, a fase vítrea já solidificada não acompanha essa variação, podendo provocar tensões e fissuras na matriz vítrea e no grão de quartzo. Estudos mostram que existe um tamanho ideal para os grãos de quartzo, por volta de 26 micrômetros [27].

2.5.1.4. Vidrado

O vidrado pode ser definido como uma camada contínua de vidro sobre a superfície do corpo cerâmico, dura e de fácil limpeza. A composição do vidrado segue algumas fórmulas tradicionais, geralmente com quartzo, feldspato, caulim, carbonato de cálcio, carbonato de chumbo e corantes orgânicos. O vidrado é normalmente aplicado na forma de uma suspensão em água, que deve ser seca antes de ser queimada simultaneamente com o corpo cerâmico [24]. Costuma-se adicionar óxidos metálicos ao vidrado com o intuito de manter a condutividade ligeiramente maior que a do corpo cerâmico, o que ajuda a distribuir melhor o campo elétrico. O vidrado também tem influência significativa nas características mecânicas da porcelana, aumentando a resistência à ruptura [4].

2.5.2. Processo de fabricação

As matérias primas para as porcelanas são minérios naturais e geralmente necessitam de tratamento antes de serem considerados adequados. Os métodos de tratamento têm sido aperfeiçoados constantemente, não só para melhorar a qualidade dos materiais, mas para permitir o uso de jazidas de menor qualidade, uma vez que as

matérias primas de melhor qualidade estão sempre sendo esgotadas. As argilas por vezes são lavadas para se obter maior pureza e o quartzo e feldspato são moídos em moinhos de bolas para o tamanho adequado. A seleção granulométrica é feita com peneiras a seco para o quartzo e o feldspato [28]. Depois de preparadas, as matérias primas são misturadas em betoneira junto com água deionizada e aditivos plastificantes, como por exemplo a glicerina, até que a mistura esteja perfeitamente uniforme. Em uma extrusora a massa é transformada em pequenos tarugos e colocada em uma câmara onde é feito vácuo, para a eliminação de inclusões de ar. A seguir, a massa é armazenada submersa em água, onde pode permanecer por várias semanas. O próximo passo é colocar a massa em moldes a vácuo, onde será dada a forma temporária. A massa então é colocada em um forno com atmosfera saturada em água a cerca de 100 °C para secagem lenta. Após a peça atingir a temperatura do forno, o vapor é gradualmente substituído por uma atmosfera seca, conforme a peça perde água. Caso seque muito rapidamente, a redução de volume associada à secagem pode fazer rachar a peça. Antes de totalmente seca, a peça é usinada, recoberta com o vidrado e volta para o forno para o término da secagem. A queima da peça ocorre em fornos contínuos a aproximadamente 1.300 °C, por cerca de 30 horas, com 3 horas de aquecimento e 3 horas de resfriamento [24]. Todo o processo tem efeito nas qualidades da porcelana e os diversos parâmetros como a temperatura e o tempo de sinterização, por exemplo, podem precisar ser ajustados em função de variações na composição da matéria prima [28].

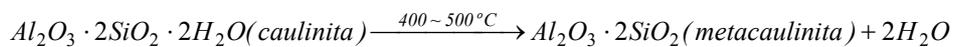
2.5.3. Microestrutura

A microestrutura da porcelana silicosa consiste principalmente de grãos de quartzo, cristais de mulita, fase vítrea e poros ou inclusões de ar. O tamanho e o formato dos grãos e dos poros, assim como a composição e a quantidade de fase vítrea são sensivelmente afetados pela variação na composição das matérias primas e no processo de fabricação, mas mantidos dentro de limites estreitos pelas normas técnicas [7].

Durante a sinterização da porcelana ocorrem diversas reações químicas que são afetadas pela temperatura e atmosfera do forno e pela duração do processo. Essas

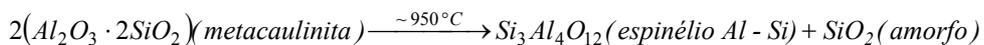
reações muitas vezes não atingem o equilíbrio, devido ao tempo excessivamente longo necessário para que isso ocorra [5]. As principais reações são descritas a seguir.

- Na temperatura aproximada de 550 °C ocorre a transformação da caulinita em metacaulinita, que corresponde a reorganização dos átomos de alumínio coordenados octaedricamente na caulinita para tetraedricamente ordenados na metacaulinita. Esta reação é endotérmica e libera água [29]:



- A 573 °C o quartzo sofre transformação da forma α ou baixa para a forma β ou alta. O aumento de tamanho associado a esta transformação não é problema nessa fase, pois a massa ainda é relativamente plástica e suporta bem essa deformação [5].

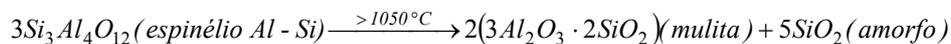
- Próximo a 950 °C, os grupos SiO_4 e AlO_6 combinam-se formando uma fase espinélio Al-Si. Essa fase espinélio começa a aparecer em 920 °C e persiste até 1150 °C [29].



- A cerca de 990 °C, o feldspato funde-se e inicia a formação da fase líquida [5].

- O quartzo começa a dissolver-se na fase líquida, aumentando a quantidade de silício na mesma. Quando a fase líquida satura-se de silício, o quartzo começa a transformar-se em cristobalita na superfície dos grãos [5].

- A 1.000 °C a mulita começa a se formar, a partir da fase espinélio e da metacaulinita restante, formando agregados de grãos arredondados de 20 a 70 nm de diâmetro, denominados mulita primária [30]. Com o colapso da estrutura da metacaulinita e o aumento da temperatura, o crescimento dos grãos de mulita é acelerado pelo processo de nucleação instantânea e pela difusão de curta distância, dando origem a grãos de formato alongado, denominados mulita secundária ou agulhas de mulita [29].



- Durante o resfriamento, o quartzo transforma-se da forma alta para a forma baixa, resultando em uma diminuição de 2 % no tamanho dos grãos, que causa tensões e fissuras no grão e na matriz [5].

Na figura 2.15. pode-se ver a estrutura da porcelana triaxial de quartzo, onde são visíveis os grãos de mulita primária, secundária e de quartzo. Na figura 2.16. pode-se ver um grão de quartzo com as fissuras características na matriz vítrea. Na tabela 2.1 pode-se ver as principais características elétricas, térmicas e mecânicas das porcelanas C110, C111 ou porcelana de quartzo moldada por pressão a seco e C112 ou porcelana de cristobalita. A cristobalita é um polimorfo do quartzo encontrado principalmente em rochas vulcânicas [22]. A cristobalita sofre transformação da forma alta para baixa entre 220 e 250 °C, bem menor que os 573 °C do quartzo. Apesar da redução de volume ser maior na cristobalita, a matriz vítrea está mais resistente na sua temperatura de transformação, o que significa menor número de fissuras e um corpo mais resistente [31]. A cristobalita também pode se originar no quartzo, como dito acima, mas somente a temperatura muito alta, cerca de 1.400 °C, o que torna essa possibilidade economicamente inviável.

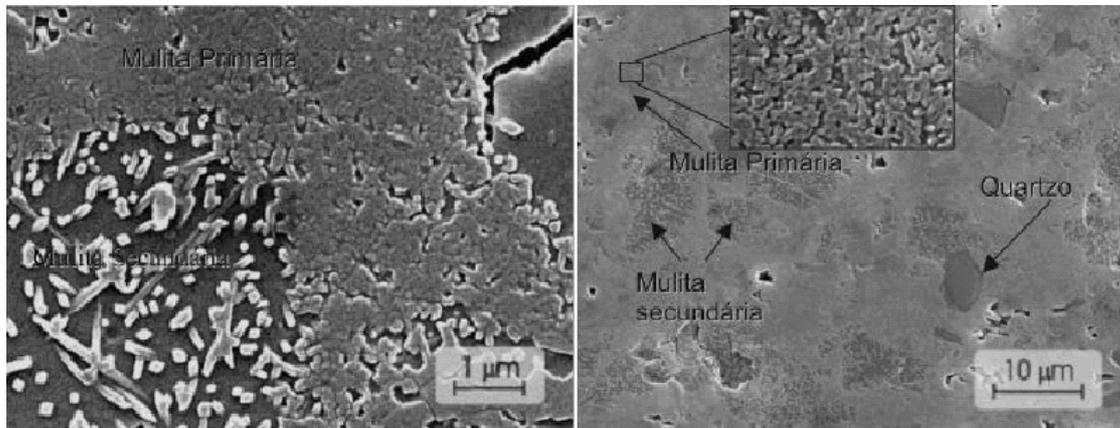


Fig. 2.15. Imagens de MEV revelando a estrutura da porcelana de quartzo [5].

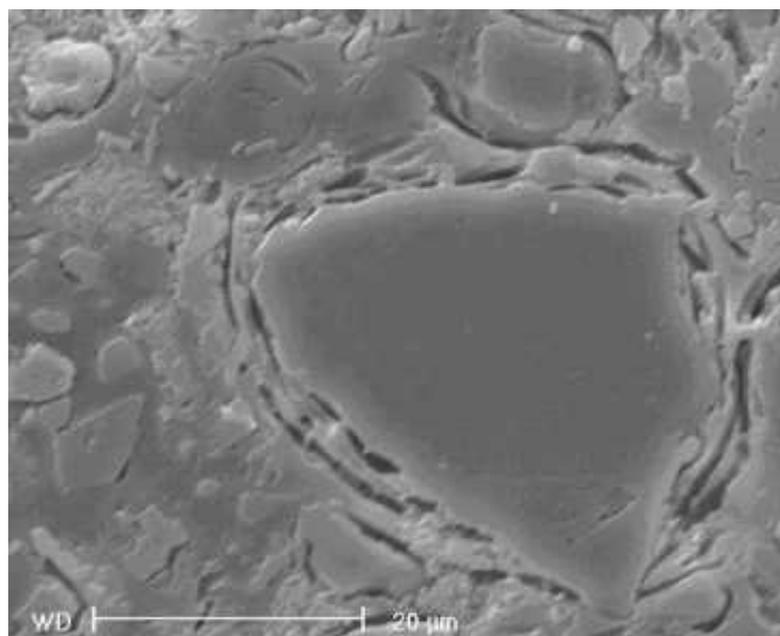


Fig. 2.16. Imagem de MEV de um grão de quartzo rodeado com fissuras provocadas pela transformação β para α , durante o resfriamento [31].

Tabela 2.1. Propriedades das porcelanas triaxiais [22].

Característica	Símbolo	Unidade	C110	C111	C112
----------------	---------	---------	------	------	------

Mecânicas

Porosidade		Volume %	0,0	≅ 3,0	0,0
Peso específico	ρ	g/cm ³	≅ 2,0	≅ 2,2	≅ 2,3
Resistência à flexão sem vidrado	σ_{sv}	MPa	≅ 50	≅ 40	≅ 80
Resistência à flexão com vidrado	σ_{cv}	MPa	≅ 60	n.a.	≅ 100
Módulo de elasticidade	E	GPa	≅ 60	n.a.	≅ 70

Elétricas

Rigidez dielétrica	E	kV/mm	30 a 35	n.a.	30 a 35
Permissividade relativa a 60 Hz e 20 °C	ϵ_r		6 a 7	5 a 6	5 a 6
Tangente de perdas a 60 Hz e 20 °C	tg(δ)	10 ⁻³	≅ 25	≅ 25	≅ 25
Tangente de perdas a 1 MHz e 20 °C	tg(δ)	10 ⁻³	≅ 12	≅ 12	≅ 12
Resistividade a 20 °C	ρ_{20}	$\Omega.m$	10 ⁹ a 10 ¹⁰	10 ⁸ a 10 ⁹	10 ⁹ a 10 ¹⁰
Resistividade a 600 °C	ρ_{600}	$\Omega.m$	≅ 10 ²	≅ 10 ²	≅ 10 ²

Térmicas

Coefficiente de expansão térmica	α_{30-600}	10 ⁻⁶ /K	4 a 7	4 a 7	6 a 8
Calor específico	$C_{p\ 30-600}$	J/kg.K	750 a 900	800 a 900	800 a 900
Condutividade térmica	λ_{30-100}	W/m.K	1,0 a 2,5	1,0 a 2,5	1,4 a 2,5

2.6. Polarização e perdas na porcelana

Entre os componentes da microestrutura da porcelana, a fase que apresenta a maior condutividade é a vítrea. Por este motivo a condutividade da porcelana é predominantemente influenciada por essa fase [32]. A condutividade da fase vítrea é de natureza iônica e é determinada pela quantidade de sódio e de potássio presente. A variação da resistividade elétrica da porcelana com a temperatura é exponencialmente proporcional à razão entre a quantidade de K_2O e de Na_2O na fase vítrea [19].

Os mecanismos de polarização mais importantes nas cerâmicas são discutidos a seguir. A polarização por cargas espaciais, que ocorre na fronteira entre duas fases distintas, onde portadores de carga podem acumular-se como em um capacitor, é responsável pela polarização em frequências muito baixas, abaixo de 10 kHz [21]. O comportamento e a interpretação dos fenômenos interfaciais são consideravelmente complexos e não são importantes para este estudo, pois nas frequências envolvidas a capacitância dos isoladores é insignificante em relação às capacitâncias da linha [4]. A polarização dipolar ocorre pela movimentação de íons que trocam de posição na rede cristalina sob efeito de campo elétrico. Esse tipo de polarização afeta predominantemente as características capacitivas e isolantes das cerâmicas em frequências relativamente baixas, abaixo de 10 GHz, ou seja, nas frequências típicas dos transientes presentes em linhas de transmissão (1 kHz a 1MHz) [21]. As perdas associadas a essa polarização frequentemente são associadas à migração de íons e à criação de defeitos extensos na estrutura dos cristais [33]. A polarização iônica ocorre pela movimentação de íons isolados. A frequência de ressonância dos íons ocorre na região de infravermelho (10^{12} a 10^{13} Hz) e então essa polarização é responsável pelos efeitos de absorção e transmissão de infravermelho. A polarização eletrônica ocorre pela deformação da nuvem eletrônica em torno do núcleo dos átomos do material e tem efeitos somente em frequências muito altas (10^{15} Hz) [21].

2.7. Espectroscopia de impedância

Qualquer sólido pode ser percorrido por uma corrente elétrica. Quando a tensão aplicada é contínua, a razão entre a tensão e a corrente é denominada resistência elétrica do objeto. Se uma tensão alternada senoidal é aplicada, a razão entre a representação fasorial da tensão e da corrente é denominada impedância, uma grandeza complexa. Em muitos materiais, principalmente aqueles tidos como isolantes, a impedância varia com a frequência da tensão aplicada e com a temperatura, entre outros fatores, devido às características da estrutura do material. A medição da impedância, dentro de uma faixa de valores de frequência e temperatura e a projeção dessas medições em gráficos adequados é denominada espectroscopia de impedância e pode revelar detalhes sobre a estrutura do material [34].

O experimento básico de espectroscopia de impedância é feito com uma célula formada por uma amostra do material estudado em forma de cilindro ou paralelepípedo de pequena espessura com dois eletrodos idênticos aplicados nas faces. A célula assemelha-se a um pequeno capacitor de placas paralelas, cujo dielétrico é a amostra. O procedimento consiste em aplicar-se um estímulo elétrico à célula, tensão ou corrente, e observar a resposta, corrente ou tensão. A impedância da célula pode ser determinada pela divisão da tensão pela corrente, e pode resultar em uma expressão complexa, a depender da representação matemática da forma de onda da tensão e da corrente. Considerando que uma tensão senoidal seja aplicada e que a amostra não varie sua impedância com o tempo nem com a amplitude da tensão, a corrente será também senoidal, com a mesma frequência da tensão, restando apenas a amplitude e a fase como variáveis de interesse, (figura 2.17.) [34].

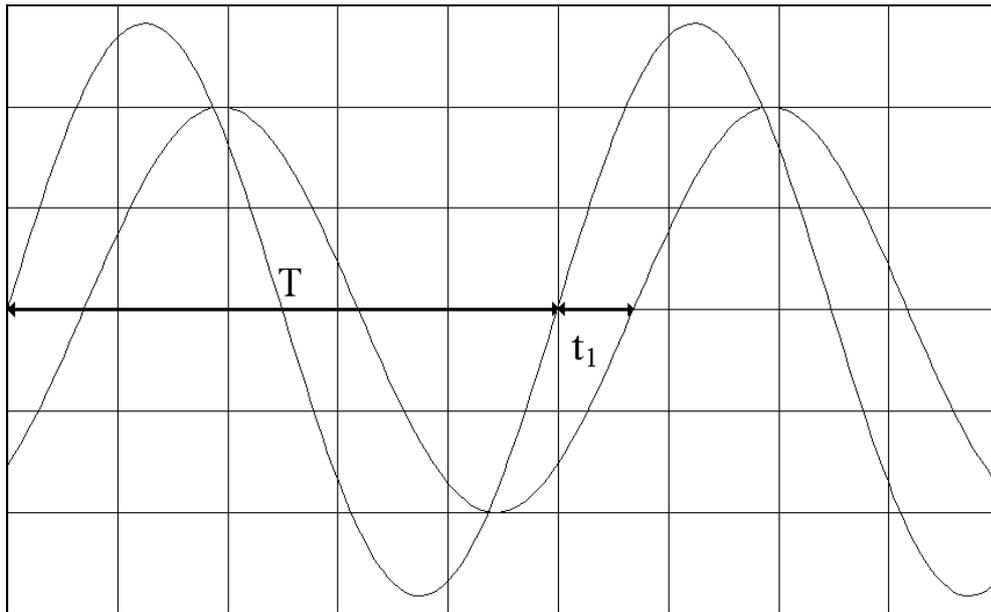


Fig. 2.17. Sinais senoidais defasados. O módulo da defasagem em graus é

$$\text{determinada por } |\varphi| = \frac{t_1}{T} \cdot 360^\circ.$$

A relação entre a amplitude da tensão e da corrente é definida como sendo o módulo da impedância ($|Z|$), e a defasagem entre a tensão e a corrente é a fase da impedância ($\angle Z$). Uma forma conveniente de representar essas duas variáveis é por meio de números complexos na forma polar. A conversão da grandeza complexa impedância da forma polar para a forma retangular resulta na parte real, Z' , e na parte imaginária, Z'' , da impedância, que têm significado importante, pois a parte real da impedância é associada à dissipação de energia e a parte complexa é associada ao armazenamento de energia. A forma comum de apresentar o resultado da espectroscopia de impedância é um gráfico cujos eixos são Z' e Z'' . Para um dielétrico com perdas que possua comportamento semelhante ao de um circuito RC paralelo, o gráfico seria um semicírculo com diâmetro igual à parte real da impedância, ou seja, o valor de R no circuito RC (figura 2.18.) [34].

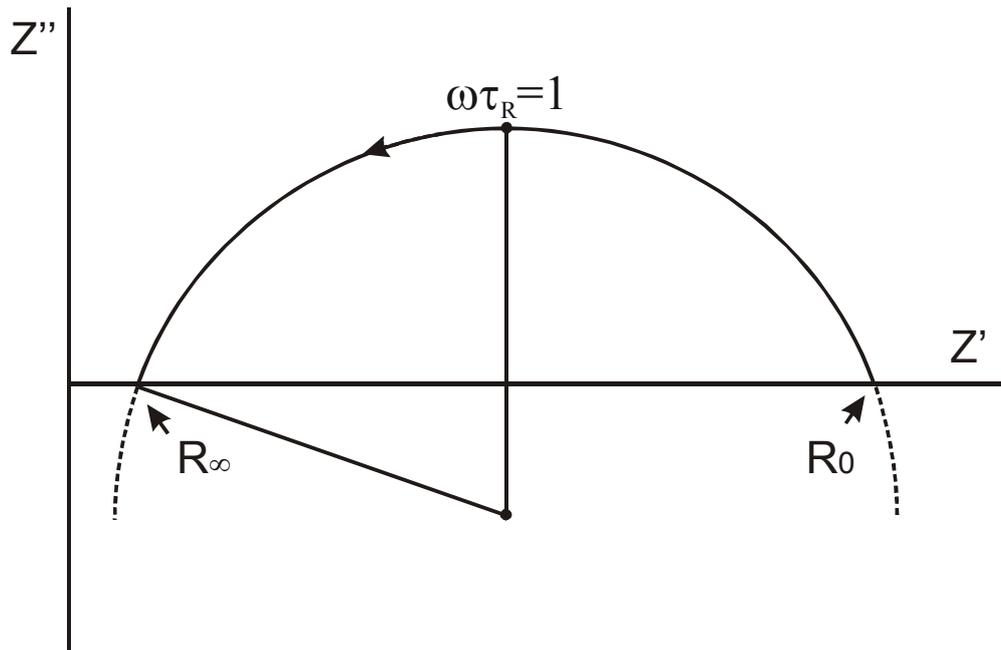


Fig. 2.18. Gráfico típico de espectroscopia de impedância

Outras formas de apresentar o resultado são utilizadas, quando se deseja evidenciar determinadas características do material. A admitância ($Y = 1 / Z$) ou o inverso da impedância, é adequada para representar materiais condutores, por exemplo. A permissividade, dada por $\varepsilon = Y / j.\omega.C_0$, onde j é a base dos números complexos, ω é a frequência angular da tensão e C_0 é a capacitância de um capacitor com os eletrodos e a dimensão da célula, mas com vácuo como dielétrico, permite analisar a constante dielétrica e as perdas no material de forma mais conveniente. A função módulo ($M = 1 / \varepsilon$) ou o inverso da permissividade, é uma forma bastante utilizada e alguns autores se referem a espectroscopia de módulo elétrico como sendo a medida de M para sinais de pequena intensidade [34].

Os semicírculos dos gráficos com eixos Z' e Z'' podem sofrer deslocamentos em função dos efeitos que ocorrem entre a amostra e os eletrodos e distorções devido à existência de outras relaxações. Na figura 2.18. o semicírculo está deslocado para a direita, cruzando o eixo x em R_∞ , a resistência com a frequência tendendo para infinito. O semicírculo também está deslocado para baixo, devido à presença de elementos distribuídos na junção amostra – eletrodo [34].

2.8. Ruptura dielétrica da porcelana

2.8.1. Ruptura térmica

Quando se expõe uma substância isolante sólida à ação de um campo elétrico, a corrente de condução que ocorre devido à condutividade do material provoca o aquecimento por efeito Joule. O aumento de temperatura provoca o aumento da condutividade, realimentando o processo que leva ao aquecimento do material. A partir de um certo ponto a temperatura cresce rapidamente, até que o material se funde. Esse processo é conhecido como descarga ou ruptura térmica e é provocado por tensão elétrica excessiva por longos intervalos de tempo, como nas sobretensões em frequência industrial [4]. Como as perdas dielétricas são decisivas para a ruptura térmica, mantê-las baixas e evitar que aumentem demasiadamente com a temperatura, assim como aumentar a condutividade térmica, para evitar que a temperatura cresça localizadamente, são precauções que tendem a evitar a ruptura térmica. A presença de oclusões de ar no corpo isolante pode dar origem a um processo de ruptura térmica, se o campo elétrico for suficiente intenso para ionizar o ar contido na oclusão [4].

2.8.2. Ruptura elétrica

Existem algumas teorias aceitas para a explicação da ruptura puramente elétrica. Joffé [35] apresentou a teoria da ionização por choque, que supõe que os poucos íons livres que sempre existem nos materiais, mesmo nos isolantes, aceleram-se devido ao campo elétrico e chocam-se com outros íons, arrancando-os dos sítios da rede cristalina. Esse fenômeno provocaria uma avalanche de íons responsável pela condução da corrente elétrica e pelos danos observados na estrutura do material. A intensidade do campo elétrico necessária para desencadear esse processo é da ordem de 10^{10} V/m, porém as medições mostram que a ruptura elétrica ocorre com campos de intensidade muito inferior, da ordem de 10^7 V/m. Von Hippel [36] reconheceu que os portadores de corrente na ruptura elétrica eram elétrons e não íons, criando a teoria de ionização por

choque de elétrons. Von Hippel considera um isolante sólido como sendo um gás extremamente comprimido. Se o campo elétrico é suficientemente elevado para acelerar os elétrons livres presentes em qualquer substância até velocidades ionizantes, um certo número de íons serão deslocados de suas posições e acumular-se-ão próximo aos eletrodos, criando grandes gradientes de potencial, intensificando o processo até que ocorra finalmente uma mudança estrutural. Zener [37] admitiu a teoria de ionização por choque de elétrons, mas levantou a questão de que seria necessário que o elétron percorresse uma distância da ordem de 10^{-8} m, ou centenas de vezes a distância interatômica, para obter energia suficiente para deslocar os íons da rede. Acontece que a maioria dos elétrons não está livre para percorrer essa distância, pois estão ligados. A teoria de Zener, conhecida como teoria de emissão de campo ou ondulatória, admite que o efeito túnel da mecânica quântica contribui aumentando o número de elétrons de condução, o suficiente para desencadear a ruptura elétrica. Isso também explica a redução da tensão de ruptura com a temperatura, devido à maior energia dos elétrons termicamente excitados.

O tempo decorrido entre a aplicação de um campo elétrico a um material e a ocorrência da ruptura dielétrica é aleatório e o valor médio desse tempo é exponencial e inversamente proporcional à intensidade do campo elétrico. Se uma amostra for submetida a um campo elétrico pouco intenso, o tempo médio para a ocorrência da ruptura tende a infinito e se o campo for muito intenso, a ruptura é quase imediata. Na figura 2.19, está ilustrada a tensão necessária para que a ruptura tenha probabilidade de ocorrer maior que 95 %, para cada tempo de ensaio. Observa-se que, para durações de ensaio maiores que um segundo, a tensão de ruptura tende a permanecer quase constante. A rigidez dielétrica é definida como sendo o valor do campo elétrico para o qual a probabilidade de ocorrência de ruptura é de 95 %, para um ensaio com duração de 10 segundos [4].

A distribuição do campo elétrico pelo material do isolador não é uniforme, especialmente durante transitórios ou mudanças bruscas de potencial. Isso provoca pontos de acumulação de potencial que, se tiverem duração suficiente, produzirão rupturas localizadas no corpo do isolador. A ocorrência dessas rupturas é fortemente influenciada pela frequência e forma de onda da tensão aplicada, da espessura da

amostra e da orientação do campo em relação às superfícies cristalográficas do material, como ilustrado na tabela 2.2. [38]

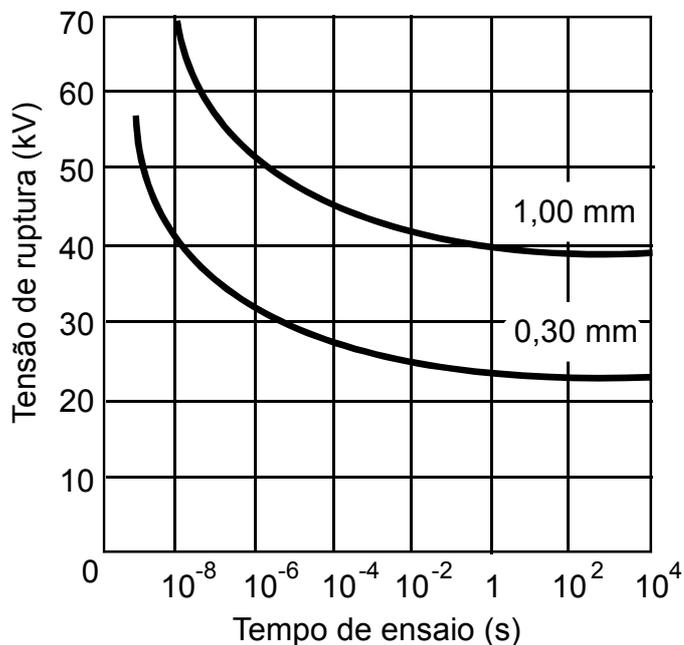


Fig. 2.19. Influência do tempo de ensaio e da espessura da amostra na tensão de ruptura elétrica [4].

Tabela 2.2. Rigidez dielétrica da porcelana de quartzo processada a seco, com direções cristalográficas preferenciais, espessura de 1 mm, em função da frequência e da orientação do campo elétrico em relação à orientação cristalográfica [4].

Frequência	60 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	1 MHz	10 MHz	100 MHz
Orientação Paralela	18 kV	17,5 kV	10 kV	8 kV	3 kV	1,6 kV	0,8 kV
Orientação Perpendicular	9,5 kV	9 kV	6 kV	4 kV	3,5 kV	3 kV	2,5 kV

A ocorrência de rupturas parciais no corpo do isolador, que ocorrem em decorrência da exposição do mesmo a sobretensões impulsivas, deteriora gradualmente suas características elétricas e mecânicas, podendo levar à sua inutilização por perfuração. O caminho da descarga que causa a perfuração nem sempre é o caminho

mais curto entre as superfícies equipotenciais, pois é determinado pelas rupturas preexistentes. A ruptura elétrica por ondas de choque elétricas é acompanhada por intensas solicitações mecânicas, de forma que da perfuração elétrica muitas vezes partem linhas de fratura com o mesmo aspecto das que se produzem por choques mecânicos [4].

2.9. Ensaios nos isoladores de porcelana

A verificação dos isoladores de porcelana quanto à sua resistência elétrica é um estudo de interesse da indústria desses dispositivos e das empresas que mantêm as linhas de transmissão e equipamentos de alta tensão. É preciso determinar com aceitável segurança, se defeitos no processo de fabricação ou a exposição às condições de uso não causaram enfraquecimento do material. Ensaios são então realizados como controle de qualidade pelos fabricantes, certificação de recebimento por operadoras de sistemas de potência e em manutenção preventiva por equipes de manutenção.

Existem diversas normas sobre o ensaio de isoladores, com diferenças muito sutis entre elas, portanto os ensaios aqui descritos referem-se às normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) sobre as técnicas de ensaio elétricos de alta tensão [39]:

NBR 5389: Método de ensaio

NBR 6936: Procedimento

NBR 6937: Dispositivos de medição

NBR 6938: Guia de aplicação para dispositivos de medição

NBR 6940: Medição de descargas parciais

2.9.1. Ensaio com tensão contínua

Os ensaios com tensão contínua visam determinar a tensão suportável ou a tensão de ruptura de um corpo. Paralelamente podem ser feitas medidas da condutividade e da emissão de radiofrequência. A tensão é fornecida por um transformador elevador e um retificador, por um gerador eletrostático ou por circuitos eletrônicos chaveados. A tensão deve ser contínua, com ondulação inferior a 5 %. A tensão deve ser aplicada em um valor baixo o suficiente para que não ocorram transientes consideráveis e elevada lentamente até o valor de ensaio. Caso a tensão seja elevada muito rapidamente, pode provocar efeitos associados a tensões impulsivas. Caso seja elevado muito lentamente, o corpo pode aquecer-se, afetando a medição. De qualquer maneira, sempre que a peça ensaiada tenha pequena massa ou alta condutividade, é conveniente monitorar a temperatura durante o ensaio. A taxa de crescimento sugerida pela ABNT é 2 % da tensão final de ensaio por segundo. Uma rampa linear de tensão partindo do zero deve ter duração aproximada de 50 segundos. Nos ensaios de tensão suportável, a tensão é elevada até o valor nominal e mantida nesse valor pelo tempo estabelecido em norma específica, tipicamente 10 segundos. Nos ensaios de tensão de ruptura, a tensão é elevada até que ocorra ruptura [39].

2.9.2. Ensaio com tensão alternada na frequência industrial

Os ensaios de tensão na frequência industrial, que compreende a faixa de 40 a 60 Hz, tem objetivos semelhantes aos dos efetuados com tensão contínua, porém em condições mais assemelhadas com as situações de campo. A tensão é tipicamente fornecida por um transformador elevador e um transformador variável. A forma de onda deve ser senoidal com distorção harmônica inferior a 5 %. É importante que as correntes de fuga e polarização não afetem a tensão de ensaio devido às resistências internas dos transformadores. Também deve-se ter cuidado com a possibilidade de ressonâncias entre a indutância do enrolamento do transformador e a possível capacitância da amostra [39].

A aplicação de tensão senoidal na frequência industrial pode ser utilizada para a medição da tangente de perdas. Considerando a amostra como sendo um circuito RC paralelo, a corrente que passa por ela é determinada por:

$$\hat{I} = |I| \angle I \quad 2.1.$$

$$|I| = \textit{Amplitude da corrente} = \frac{|U|}{|Z_T|} = \frac{|U|}{\sqrt{\textit{Re}^2(Z_T) + \textit{Im}^2(Z_T)}} \quad 2.2.$$

$$\angle I = \textit{Defasagem da corrente} = \arctg\left(\frac{\textit{Im}(Z_T)}{\textit{Re}(Z_T)}\right) \quad 2.3.$$

onde \hat{I} é o fasor corrente, U é a tensão aplicada, Z_T a impedância da amostra, $|Z_T|$ é o módulo, $\textit{Re}(Z_T)$ é a parte real e $\textit{Im}(Z_T)$ é a parte imaginária da impedância.

$$Z_T = R // Z_C = R // (-jX_C) = \frac{R \cdot (-jX_C)}{R - jX_C} = \frac{R \cdot X_C^2}{R^2 + X_C^2} - j \cdot \frac{R^2 \cdot X_C}{R^2 + X_C^2} \quad 2.4.$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot C} \cong \frac{1}{377 \cdot C} \quad 2.5.$$

onde Z_C é a impedância do capacitor, X_C é a reatância capacitiva e ω é a frequência angular.

Pode-se então calcular a defasagem da corrente:

$$\textit{Re}(Z_T) = \frac{R \cdot X_C^2}{R^2 + X_C^2} \quad 2.6.$$

$$\textit{Im}(Z_T) = -\frac{R^2 \cdot X_C}{R^2 + X_C^2} \quad 2.7.$$

$$\textit{tg}(\angle I) = -\frac{R}{X_C} = -\omega \cdot R \cdot C \quad 2.8.$$

Por definição, a tangente de perdas de um circuito RC paralelo é dada por [40]:

$$\textit{tg}(\delta) = \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C} = \frac{1}{-\textit{tg}(\angle I)} = \frac{1}{\textit{tg}(\varphi)} \quad 2.9.$$

onde φ é a o módulo da defasagem entre a tensão e a corrente na amostra.

2.9.3. Ensaio com tensão de pulso atmosférico

O pulso atmosférico 1,2 x 50, como ilustrado na figura 2.6. é utilizado para determinar a suportabilidade do isolador à descargas atmosféricas. As tolerâncias aceitáveis para a forma do pulso são de 3 % para o valor de crista, 30 % para o tempo de subida (T_1) e 20 % para o tempo até meio valor (T_2). Admite-se oscilações sobre a forma de onda do pulso desde que não excedam 25 % do valor de crista durante a subida e descida e 5 % do valor de crista durante a crista. Em alguns casos, admite-se que a descida do pulso seja encurtada, tipicamente para 6 microssegundos, o que permite a simplificação do gerador de pulsos. Para a determinação da tensão de ruptura, pulsos de amplitude crescente são aplicados. Como esse teste é de difícil reprodução, não é muito aplicado a isoladores não recuperáveis, como as porcelanas. Para a medição de tensão suportável, cinco pulsos com a tensão de crista nominal são aplicados, não devendo haver ruptura em nenhum deles. O teste de tensão de ruptura a 50 %, que representa melhor o caráter cumulativo dos pulsos de tensão, corresponde à tensão de crista que resulta em ruptura em 50 % das vezes que o pulso é aplicado. Este valor é de difícil determinação experimental em isolantes não recuperáveis, mas pode ser encontrado facilmente a partir de um número considerável de ensaios com tensão mais baixa, por meio de curva estatística [39].

2.9.4. Ensaio com tensão de pulso de manobra

Os ensaios de pulso de manobra são semelhantes aos de pulso atmosférico, apenas com a modificação dos tempos de subida e descida para o valor típico do pulso 250 x 2.500. Como a maior duração do pulso de manobra tem efeitos característicos, não é costume utilizar pulsos cortados para pulsos de manobra [39].

2.9.5. Ensaio de alta frequência

O ensaio de alta frequência tem como objetivo detectar a presença de falhas no material imperceptíveis em inspeção visual, como bolhas ou trincas internas. Uma tensão senoidal com frequência entre 100 kHz e 300 kHz é aplicada à amostra, com amplitude suficiente para provocar descargas superficiais constantes, durante 5 segundos. Durante esse tempo não pode haver nenhuma ruptura no corpo do isolador, (figura 2.20.) [20].



Fig. 2.20. Isoladores de porcelana sendo submetidos a ensaio de alta frequência.

Fonte: Isoladores Santana SA.

2.9.6. Ensaios de emissão de radiofrequência

O ensaio de radiofrequência é realizado em uma gaiola de Faraday aplicando-se a tensão suportável nominal, contínua ou na frequência industrial e medindo-se a componente de alta frequência criada pela amostra nos terminais por onde é aplicada a

tensão de ensaio. A tensão é monitorada geralmente na frequência de 1 MHz e a fonte de tensão é desacoplada por um filtro para que não represente carga para a tensão gerada pelo isolador. A emissão de radiofrequência é um bom indicador da degradação do isolador por condições de uso e é comum localizar isoladores defeituosos em campo por meio de receptores de rádio com antena direcional [41].

2.9.7. Ensaio combinados de tensão elétrica e mecânica

Sabe-se que existe correlação entre os esforços e rupturas elétricos e mecânicos. Devido à complexidade de determinar exatamente as correlações existentes, a ABNT especifica um ensaio simples em que uma tensão equivalente a 60 % da tensão de ruptura em frequência industrial é aplicada enquanto um esforço mecânico de tração é gradualmente aplicado desde 35 % do valor da carga nominal de ruptura, até que o isolador falhe elétrica ou mecanicamente. Os resultados têm valor apenas comparativo [39].

2.9.8. Condições atmosféricas de ensaio

É previsto que os ensaios ocorram em condições atmosféricas padronizadas, temperatura de 20 °C, pressão de 760 mmHg e umidade relativa de 63 %, porém pode ser impossível manter essas condições, especialmente em um laboratório de alta tensão de grandes dimensões, e existem então algumas fórmulas de correção para condições atmosféricas que diferem das padronizadas. Em alguns casos, condições atmosféricas extremas como temperatura, umidade, altitude ou poluição elevadas são reproduzidas durante o ensaio para determinar a suportabilidade do isolador a essas condições. A precipitação de chuva, presença de névoa e névoa salina também são simuladas em ensaios de suportabilidade [39].

2.10. Difratometria de raios X

O fenômeno de difração de raios X foi descoberto por De Laue em 1914, projetando raios X através de um cristal sobre uma chapa fotográfica e observando, após a revelação da chapa, que a imagem apresentava padrões típicos de difração. Como o comprimento de onda dos raios X é da ordem da magnitude das distâncias interatômicas dos cristais, a difração dessas ondas tornou-se uma importante ferramenta para o estudo das estruturas cristalinas. Quando as ondas incidem sobre os planos cristalinos com determinado ângulo θ , ocorre um pico de intensidade no sinal difratado. Esse ângulo de incidência corresponde à situação em que ocorre interferência construtiva entre as ondas difratadas por diferentes planos e é determinado pela Lei de Bragg:

$$\lambda = 2d \operatorname{sen}(\theta), \quad 2.10.$$

onde λ é o comprimento de onda do raio X e d é a distância entre os planos cristalinos.

Numa definição simples, cristais são arranjos atômicos cuja estrutura repete-se de forma periódica tridimensional. Entre diferentes cristais, varia a forma da célula básica, os átomos que compõem a célula e as distâncias entre os átomos. Se uma amostra do cristal for varrida por um feixe de raios X com ângulo de incidência variável e um detector de raios X for posicionado para detectar os raios difratados, podemos criar um gráfico da intensidade dos raios difratados em função do ângulo de difração, denominado difratograma. O difratograma da porcelana C110 pode ser visto na figura 2.21. Os picos observados no gráfico correspondem aos pontos de interferência construtiva. Como a porcelana C110 é composta por mais de uma fase, há picos referentes a cada uma das fases. No gráfico da figura 2.21. são mostrados os difratogramas reconstruídos a partir das informações do banco de dados ICSD (Inorganic Crystal Structure Database) das fases mulita (Ban, T., Okada, K., J. Am. Ceram. Soc., 75, 227, 1992) e quartzo (Glinemann, J., King, Jr., H.E., Schulz, H., Hahn, Th., La Placa, S.J., Dacol, F., Z. Kristallogr., 198, 177, 1992). A variação contínua da amplitude do gráfico da porcelana é devida à fase amorfa. Cada cristal possui um padrão de difração único, então é possível determinar a composição de um material através da difração de raios X e esse processo é denominado caracterização

[42]. Na figura 2.21. é possível associar os picos da difratometria da porcelana com os picos dos gráficos do quartzo e da mulita.

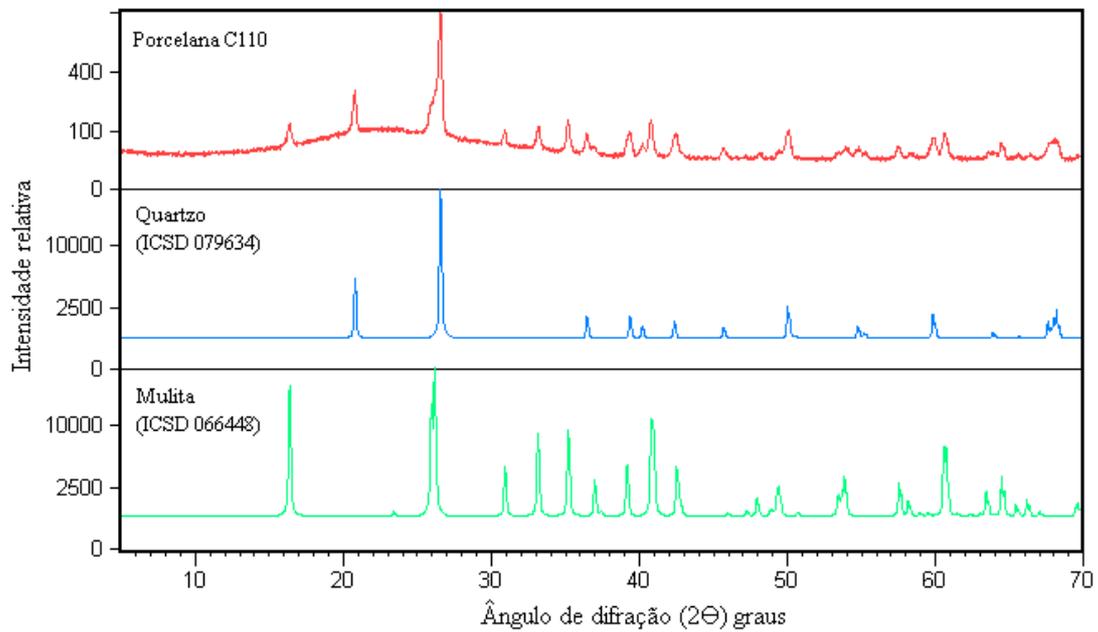


Fig. 2.21. Difratograma da porcelana C110 obtido neste trabalho e reconstruções dos difratogramas do quartzo e da mulita a partir dos dados ICSD. Ver texto para referências completas.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

3.1. Introdução

Os procedimentos para a concretização dos objetivos deste trabalho são realizados com o intuito de responder algumas questões simples:

- a) Os isoladores submetidos às condições de trabalho sofrem deterioração gradual em suas características ao longo do tempo, ou seja, envelhecimento?

Para elucidar essa questão, é preciso comparar amostras novas com amostras que tenham sido submetidas a condições de trabalho diversas. O primeiro passo é a coleta, seleção e preparação das amostras. Os ensaios, medições e observações a que as amostras serão submetidas foram escolhidos em função da disponibilidade de equipamentos e instalações e da possibilidade desses métodos revelarem informações sobre as características que tenham sofrido modificação. Dentro do escopo do trabalho, é dada atenção especial às características elétricas. O método mais adequado é a espectroscopia de impedância, que permite verificar se houve alteração na constante dielétrica e na tangente de perdas do material. A medição da rigidez dielétrica permite averiguar se houve variação no desempenho do material na presença de campos intensos. Para investigar os mecanismos que podem levar ao envelhecimento, é preciso estudar a microestrutura dos materiais. Para isso, os métodos disponíveis mais adequados são a microscopia óptica e a difratometria de raios X (XRD).

b) Se o isolador sofre envelhecimento, qual o papel das solicitações elétricas nesse processo?

Essa questão leva à necessidade de submeter amostras a ciclos de tensão, em especial sobretensões em frequência industrial e pulsos atmosféricos simulados. Para a realização desses tratamentos, são necessárias câmaras de envelhecimento e fontes de tensão adequadas, que não eram disponíveis na época. Foi decidido que esses equipamentos seriam produzidos como parte deste trabalho.

3.2. Obtenção das amostras

Para evitar dispersão nos resultados, foram coletadas amostras apenas de isoladores do tipo pino, classe 15 kV de porcelana C110. As amostras foram obtidas junto ao CEFET-SE (Centro Federal de Educação Tecnológica de Sergipe) e às empresas Energipe S.A. e Alves Barreto Ltda. Foram selecionadas as amostras que apresentavam falhas elétricas no corpo. Amostras intactas e com danos outros (quebradas) foram reservadas para comparação. A ocorrência de amostras com falha elétrica no corpo entre as amostras obtidas é rara, pois este tipo de dano geralmente provoca a destruição total da peça e os técnicos de manutenção raramente se empenham em resgatar os pedaços perdidos. As peças selecionadas foram fotografadas, catalogadas e cortadas em fatias por uma serra diamantada, visando expor a região onde ocorreu a ruptura, (figura 3.1). Os pedaços foram então separados pela região de onde foram retirados:

- a) próximo da ruptura,
- b) longe da ruptura mas submetida à tensão elétrica semelhante à ruptura,
- c) longe da ruptura e não submetida à tensão elétrica (saia e topo).



Fig. 3.1. Isolador de pino classe 15 kV com perfuração.

Os cortes mais grosseiros foram efetuados com uma serra doméstica de corte de mármore, com disco de corte liso refrigerado a água. Para os cortes mais delicados, foi utilizado um disco normalmente utilizado em metalografia, adaptado a um motor de corrente contínua, (figura 3.2.). A serra foi utilizada com rotação de 1.500 RPM e água como refrigerante.

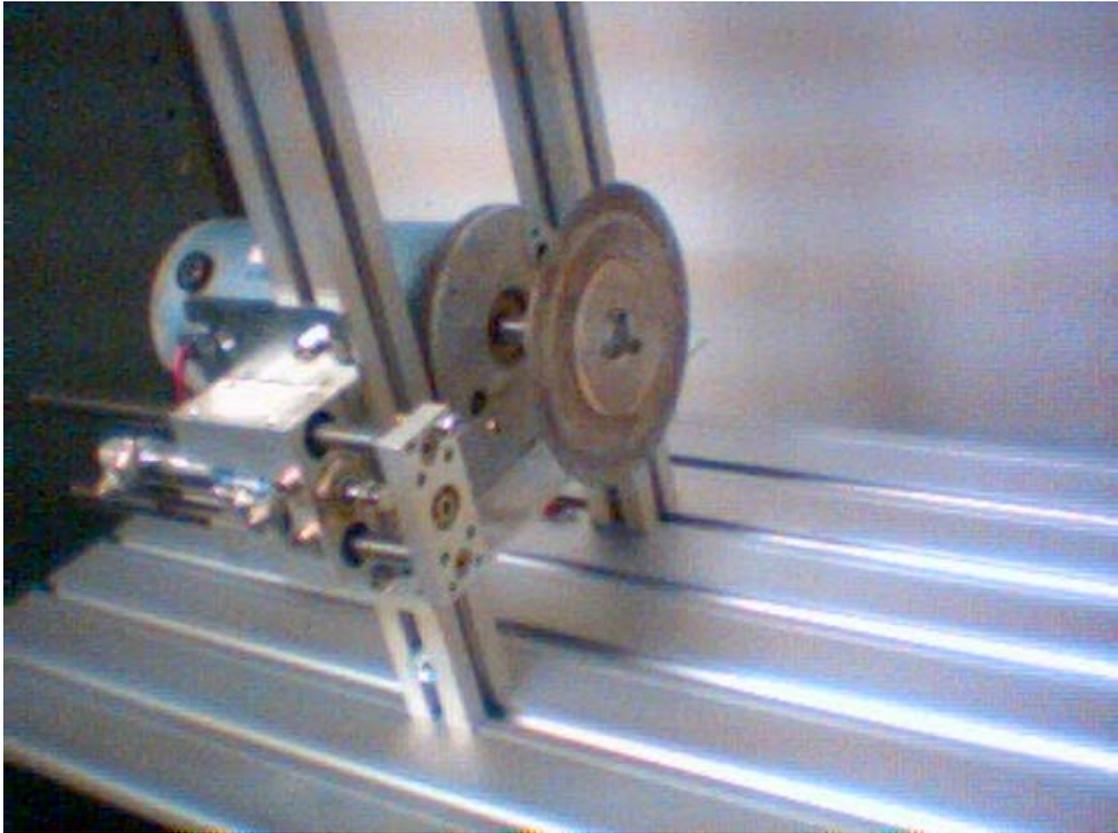


Figura 3.2. Disco de corte diamantado adaptado a um motor de corrente contínua.

Para os ensaios e medidas foram necessárias amostras em diversos formatos. Foram retiradas amostras de 10 x 10 x 0,5 mm e 10 x 10 x 1 mm para ensaios de rigidez dielétrica e 4 x 4 x 1 mm para espectroscopia de impedância. As amostras foram polidas com lixa d'água de 25 até 4 microns (CAMI 400 a 2.000), o que reduziu a espessura das amostras de 1 mm para 0,8 mm e de 0,5 mm para 0,45 mm.

Para lixar as amostras, uma bandeja plástica foi adaptada a um motor retirado de uma antiga unidade de discos flexíveis de 5 ¼" de computador. O motor gira a bandeja a 360 RPM. As lixas foram fixadas por meio de ímãs que são atraídos pelo rotor metálico do motor, através da bandeja, (figura 3.3.). As amostras foram seguradas manualmente.



Figura 3.3. Dispositivo adaptado para lixar as amostras.

As amostras para impedancimetria foram metalizadas com platina. Para isso, as amostras já polidas foram lavadas com acetona em um tanque de ultra-som por 5 minutos e deixadas para secar por 5 minutos em estufa a 70 °C. As amostras tiveram então uma de suas faces pintada com tinta de platina diluída em solvente específico, aplicada com pincel. A seguir, as amostras voltaram para o forno para secagem da tinta, por 30 minutos a 100 °C. Por fim, as amostras foram para o forno a 600 °C por 20 minutos para cristalização da platina. Depois de lentamente resfriadas, o processo foi repetido para a outra face das amostras.

Pedaços de diferentes regiões das amostras foram moídos com pilão e almofariz de ágata até passar por peneira 400 ASTM (38 micrômetros), para medidas de difratometria de raios X. As aparas de pequenas dimensões que sobraram do processo de corte das amostras foram aproveitadas. Os pedaços com cerca de 2 mm foram misturados com água destilada e moídos. A água facilita o trabalho e evita que estilhaços sejam ejetados do almofariz. A massa resultante foi colocada para secar em

estufa a 100 °C por 10 minutos e peneirada. O material que não passou pela peneira voltou para o almofariz para ser moído novamente e foi peneirado mais uma vez, até que todo o material passou pela peneira. Depois de prontas, as amostras foram examinadas em microscópio óptico, para verificar se havia orientação preferencial nos grãos, (figura 3.4.).

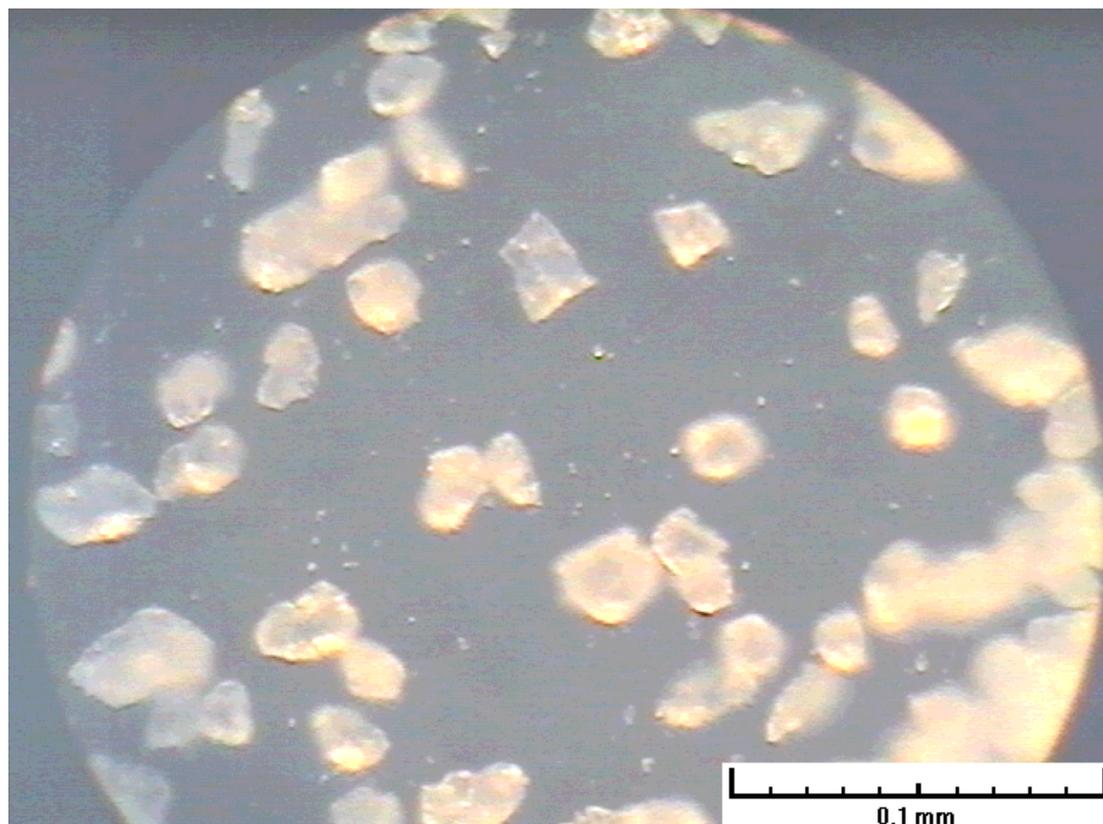


Fig. 3.4. Fotografia de microscópio óptico com ampliação de 256 vezes do pó para difratometria de raios X. Imagem obtida com uma câmara *GKB*, modelo CC9602 CCD, adaptada a um microscópio *Carl Zeiss / Jena*.

As amostras preparadas foram acondicionadas em bolsas plásticas identificadas com marcador permanente. Em um livro de ocorrências, foi registrado todo o histórico de cada amostra, desde a preparação até o último ensaio. Na figura 3.5. estão ilustrados os diversos tipos de amostras e na tabela 3.1 estão relacionadas as amostras mais importantes.



Fig. 3.5. Amostras preparadas e prontas para os ensaios.

Tabela 3.1. Numeração das amostras.

Número	Descrição da amostra				
	Região do isolador	Fabricante	Ano de fabricação	Tempo de uso Aproximado	Estado
1	I	Lorenzetti S.A.	1983	Sem uso	Nova
2	I	Lorenzetti S.A.	1979	12 anos	Sem defeito
3	II				
4	I	Germer S.A.	1986	10 anos	Sem defeito
5	II				
6	I	M.P.L. (Fig. 3.1)	1989	7 anos	Perfurada
7	II				
8	III				

Notas:

Região I: Submetida a campo elétrico menos intenso, saia e topo.

Região II: Submetida a campos intensos, longe de rupturas.

Região III: Região próxima da perfuração.

M.P.L.: Metalprocesso Ltda.

3.3. Espectroscopia de impedância

Medidas de espectroscopia de impedância foram realizadas com impedancímetro Solartron modelo 1260, com amostras colocadas em um porta amostra de alumina com eletrodos de ouro, em um receptáculo de aço inox inserido em um forno elétrico, figura 3.6. A montagem do circuito de medição pode ser vista na figura 3.7. O forno é controlado por um controlador Eurotherm modelo 2216e. O programa ZPlot versão 2.6 foi utilizado para controlar o impedancímetro e coletar os dados e um programa de controle do forno foi desenvolvido pelo autor em linguagem Delphi.



Fig. 3.6. Porta amostras e forno utilizado nas medições de espectroscopia de impedância. No detalhe as conexões para o impedancímetro.

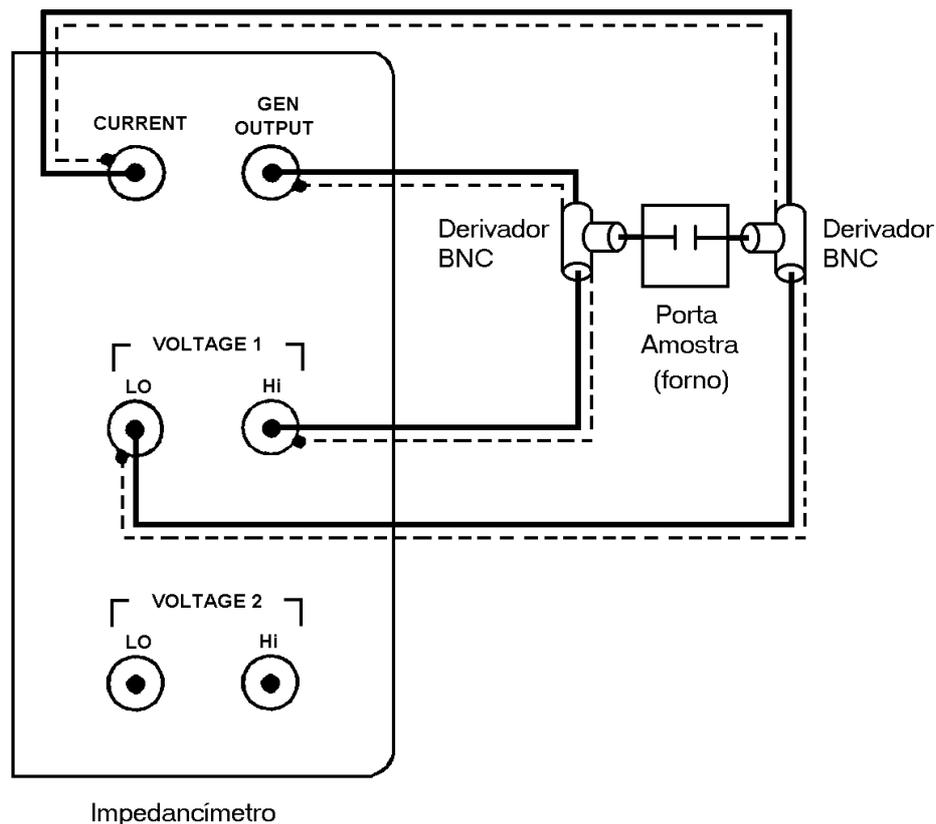


Fig. 3.7. Montagem para espectroscopia de impedância.

Alguns problemas foram encontrados nas primeiras medições, devido elevado nível de ruído presente no sinal proveniente da câmara. A elevada impedância da amostra e o reduzido nível do sinal tornam o sistema particularmente susceptível a ruídos. Após um trabalho de blindagem e aterramento, foi descoberto que a principal fonte de ruído era o termopar sensor de temperatura do controlador do forno. A solução para o problema foi o uso de dois capacitores de poliéster de 100 nF e 400 V colocados entre os terminais do termopar e o aterramento do forno.

As medições foram efetuadas com a aplicação de tensão senoidal com amplitude de 1 V_{RMS}, de 100 Hz a 10 MHz, sem componente contínua, 10 ciclos de iteração por medida, 10 medidas por oitava e temperatura da amostra desde 50 °C até 600 °C, durante o aquecimento e durante o resfriamento. A taxa de variação de temperatura foi de aproximadamente 160 °C/h no aquecimento e o resfriamento ocorreu naturalmente em cerca de 8 horas.

3.4. Ensaio de rigidez dielétrica

A rigidez dielétrica das amostras, mesmo das envelhecidas, é bem maior que a do ar. Isto faz com que seja impossível aplicar tensões elétricas elevadas às amostras sem romper a rigidez do ar que as cerca. Existem três soluções mais comuns para este problema; fazer vácuo na câmara de ensaio, pressurizar a câmara ou colocar a amostra em óleo isolante. A pressurização ou despressurização da câmara são aplicações da lei de Paschen, que relaciona a tensão de ruptura de uma certa distância no ar com o produto entre essa distância e a pressão do ar, (figura 3.8) [43].

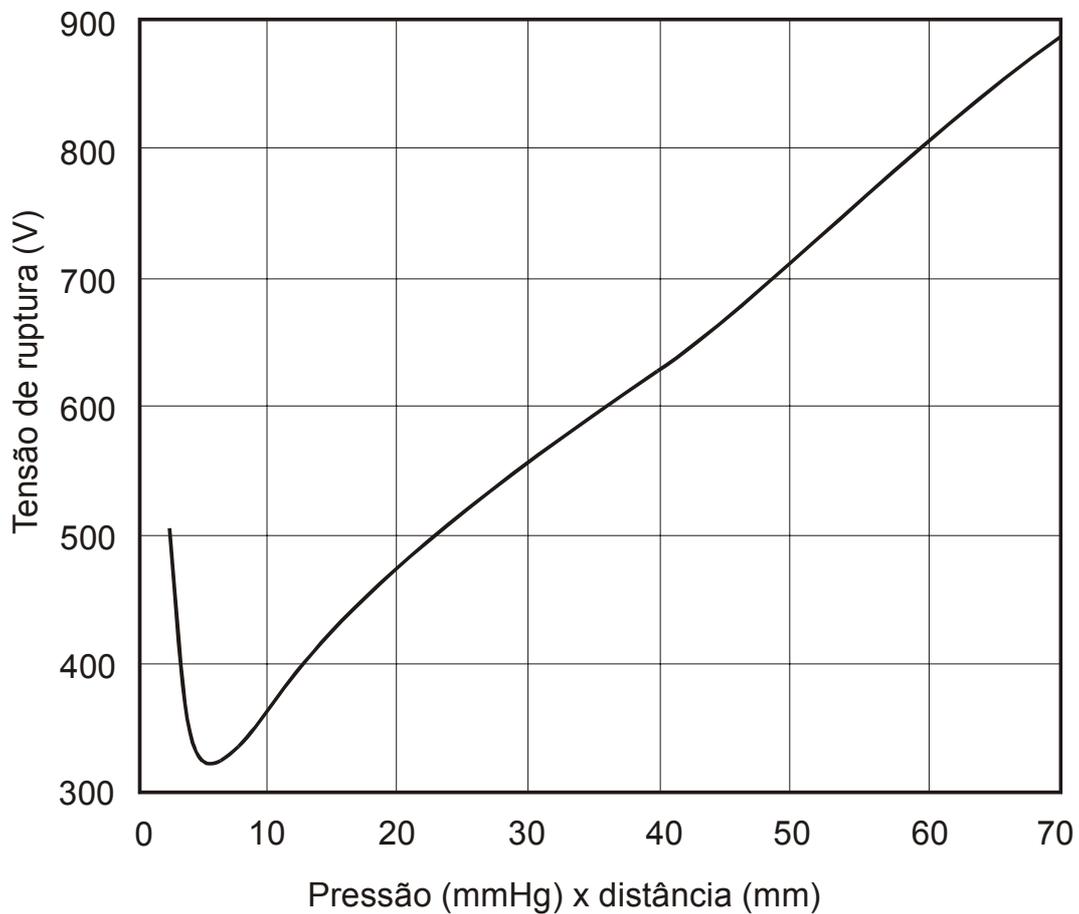


Fig. 3.8. Lei de Paschen para tensão de ruptura do ar [43].

As câmaras pressurizadas e à vácuo têm a vantagem de não contaminar a amostra, como acontece na imersão em óleo, porém somente são aplicáveis até certa intensidade de campo elétrico. A partir de cerca de 30 kV/mm, a pressão ou vácuo necessários tornam inviável o isolamento com ar, sendo preferível o uso de outros gases como o SF₆ ou mesmo de óleo isolante. O vácuo tem a vantagem adicional de não necessitar de estruturas robustas para suportá-lo, pois o gradiente de pressão é de apenas uma atmosfera. Em compensação, as bombas necessárias para a obtenção de alto vácuo são dispendiosas e levam tempo considerável para atingir pressões mais baixas. Como neste trabalho são utilizadas amostras muito delgadas nos ensaios de rigidez dielétrica, a solução adotada foi construir câmaras pressurizadas capazes de suportar 6 Bar (4.500 mmHg), pressão na qual a rigidez dielétrica do ar é de cerca de 65 kV/mm, ver figura 3.9. Na prática a rigidez dielétrica é menor, devido à umidade do ar. O porta amostras e os eletrodos foram produzidos com uma base de bronze retangular, uma peça de porcelana e dois parafusos de bronze, conforme as normas de ensaios de alta tensão, (figura 3.10) [39].

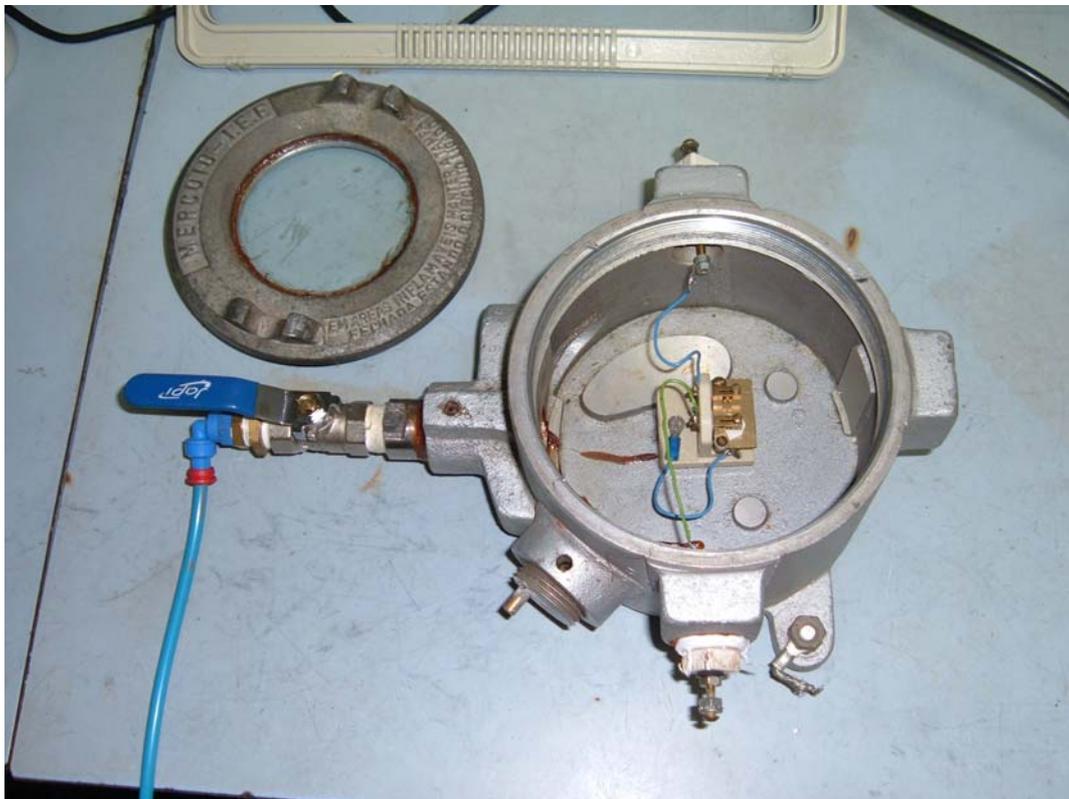


Fig. 3.9. Câmara pressurizada para ensaios de rigidez dielétrica.

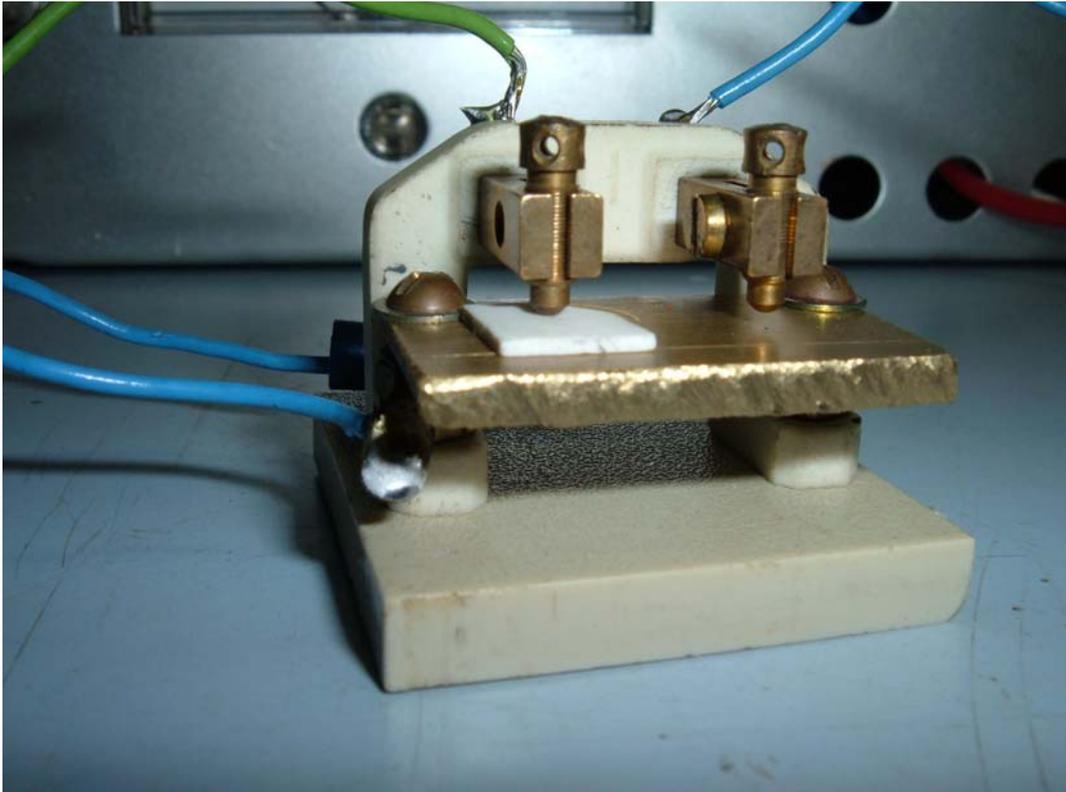


Fig. 3.10. Porta amostra e eletrodos para ensaios de rigidez dielétrica.

Como a ruptura elétrica de materiais é um fenômeno aleatório, são utilizados procedimentos estatísticos para obter informações mais significativas das medições. O ideal seria a realização de um número muito grande de medições, de forma a se obter boa precisão nos resultados, porém isso não é possível para um número limitado de amostras não recuperáveis. Os dados existentes mostram que a função de distribuição da probabilidade de ocorrência de ruptura em função da tensão é aproximadamente gaussiana, desde uma pequena percentagem até 98 %, para isoladores de uso externo. Para um grupo de n medições será estimada a média e o desvio padrão, utilizando as seguintes expressões:

$$\bar{U} = \frac{\sum_1^n U_i}{n} \quad 3.1.$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_1^n (U_i - \bar{U})^2}{n-1}} \quad 3.2.$$

O limite de confiança a 95 % para a medição pode ser determinado pela equação a seguir:

$$U_M = \bar{U} \pm s \frac{t_p}{\sqrt{n}} \quad 3.3.$$

O valor de t_p / \sqrt{n} para 5 medições é aproximadamente 1,24 e para 10 medições é 0,72. Como o desvio padrão foi pequeno, menor que 2 %, cinco medições permitiram um bom resultado. Nas medições em isoladores externos, o valor comum de desvio padrão é de menos que 8 % do valor médio, o que resulta em um limite de confiança menor que 10 %. Caso o desvio padrão das medições fosse maior, seria necessário um número maior de medições [38].

3.4.1. Ensaio com tensão contínua

Para os ensaios de tensão contínua foi desenvolvida, como parte deste trabalho, uma fonte de tensão que fornece uma rampa com inclinação de 500 V/s, de zero até 30 kV e desliga a saída de tensão automaticamente em caso de ruptura, registrando a tensão. Essa fonte foi construída com base em um transformador de saída horizontal (*flyback*) utilizado em aparelhos de televisão em cores. Um circuito contendo um oscilador, excitador, gerador de rampa e circuitos de controle é montado em uma placa de circuito impresso. Além dessa placa e do transformador de saída horizontal, um transformador de alimentação e os transistores de potência são montados em uma caixa de alumínio. Um divisor de tensão de foco utilizado em monitores de computador é empregado para monitorar a tensão de saída da fonte, que é realimentada nos circuitos de controle e aplicada a um instrumento de bobina móvel no painel. A descrição do circuito, o diagrama esquemático e o *layout* do circuito impresso podem ser vistos nos anexos e o equipamento montado pode ser visto na figura 3.11.

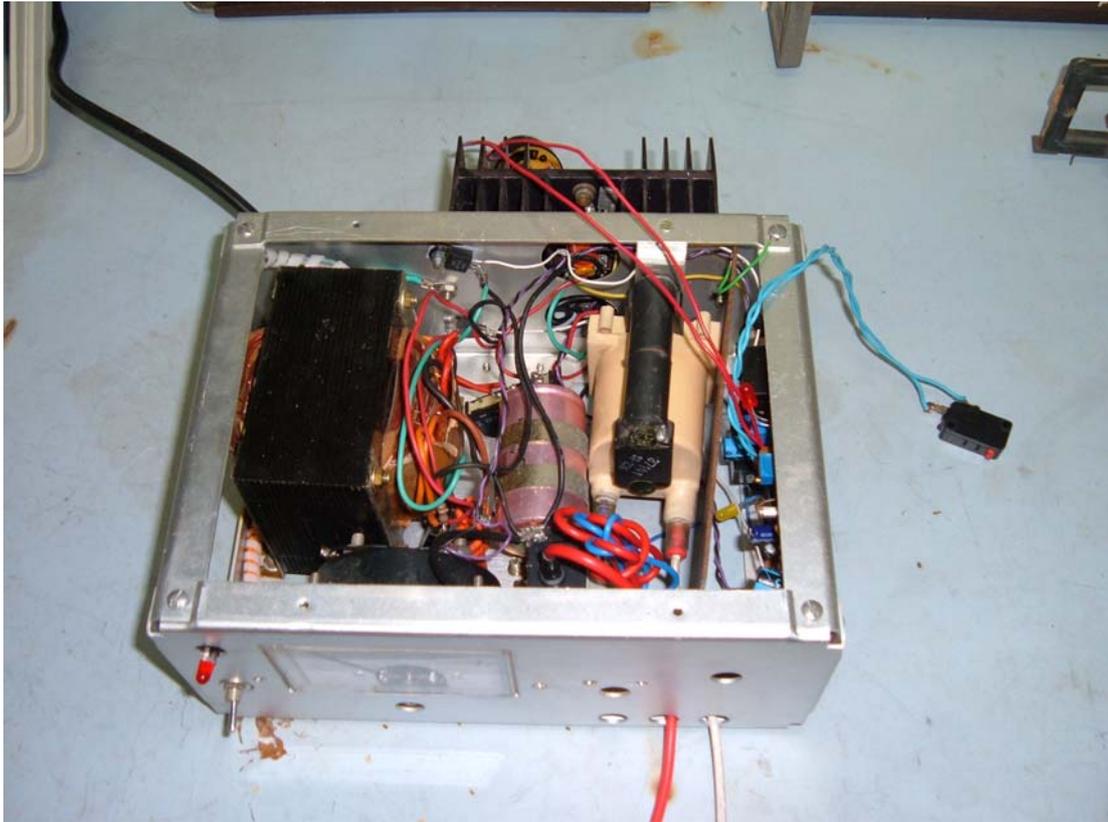


Fig. 3.11. Visão dos componentes da fonte de alta tensão contínua.

3.4.2. Ensaios em frequência industrial

Os ensaios em frequência industrial foram realizados com o intuito de verificar a susceptibilidade do material à ruptura térmica e determinar a tangente de perdas na frequência industrial. A tensão para os ensaios foi obtida com um transformador para lâmpada de neônio alimentado através de um transformador variável. Uma lâmpada incandescente de 60 W e 220 V foi colocada em série com o primário do transformador variável para funcionar como limitador de corrente. A tensão aplicada à amostra foi monitorada com uma ponta de prova de alta tensão e um osciloscópio, enquanto a corrente era convertida em tensão por um resistor de 100 k Ω , colocado em série com a amostra, e essa tensão monitorada com o osciloscópio. Na figura 3.12. pode-se ver o diagrama elétrico do circuito de ensaio e a figura 3.13. ilustra a montagem.

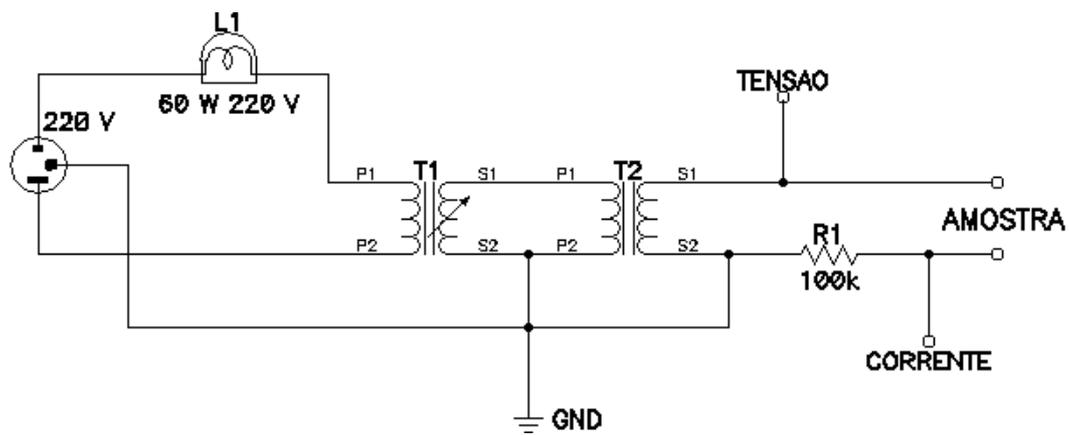


Fig. 3.12. Circuito da montagem para ensaio em frequência industrial.



Fig. 3.13. Arranjo para ensaios em frequência industrial.

A superfície das amostras foi revestida com grafite comum para distribuir melhor o campo elétrico e o procedimento seguinte foi aplicar uma tensão de $1 \text{ kV}_{\text{RMS}}$ e monitorar a amplitude e a fase da corrente. Com esses valores foi calculada a tangente de perdas. Os valores obtidos no osciloscópio foram a amplitude RMS da tensão sobre o

resistor e a defasagem em segundos entre a tensão sobre a amostra e a tensão sobre o resistor. A amplitude da corrente foi obtida simplesmente multiplicando a tensão sobre o resistor pelo seu valor; 100 k Ω . A defasagem em graus foi obtida pela expressão:

$$|\text{Defasagem em graus}| = \varphi = \frac{\text{Defasagem em segundos}}{\text{Período em segundos}} \cdot 360^\circ, \quad 3.4.$$

onde o período é 1/60 s ou 16,67 ms.

Após a medição da tangente de perdas, a tensão foi rapidamente aumentada até que a potência dissipada pela amostra atingisse 1 W. A tensão foi desligada durante 10 minutos para que a amostra esfriasse e então novamente ligada, cronometrando-se o tempo até a ruptura da amostra. Este procedimento teve caráter apenas comparativo, uma vez que não seria possível determinar todos os fatores envolvidos no processo, como a capacidade e condutividade térmica do porta amostras e das amostras.

3.4.3. Ensaio com pulsos atmosféricos

Os ensaios com pulsos foram utilizados para comprovar a deterioração progressiva do material submetido a essas solicitações elétricas. Para fornecer os pulsos 1,2 x 50, foi utilizado um gerador de funções programável *EMG* modelo TR 12567. Para elevar a tensão de saída do gerador foi utilizado um transformador de saída horizontal utilizado em antigos aparelhos de televisão preto e branco, pois nesses aparelhos o retificador de alta tensão não era embutido no transformador de saída horizontal, (figura 3.14.) Como o transformador possui vários enrolamentos, todos eles foram testados como primário, adotando-se o enrolamento que produziu maior tensão no secundário. A relação de espiras entre esse enrolamento e o enrolamento de alta tensão é de aproximadamente 360. Como a impedância de saída do gerador é de 50 ohms, foi utilizado um amplificador de potência *Amplifier Research* modelo 40AD1 para alimentar o primário de baixa impedância do transformador de saída horizontal. Um divisor de tensão de foco utilizado em monitores de computador foi utilizado como divisor de tensão para monitorar a tensão de ensaio. Somente a amostra 1 com eletrodos de grafite foi submetida ao ensaio de pulso atmosférico. pulsos de 3 kV de pico foram aplicados com frequência de 500 pulsos por segundo, em intervalos de 10 segundos ou

5.000 pulsos, ao que a resistência da amostra era checada, utilizando um Megômetro *Megabrás* modelo MI500, com tensão de teste de 500 V.

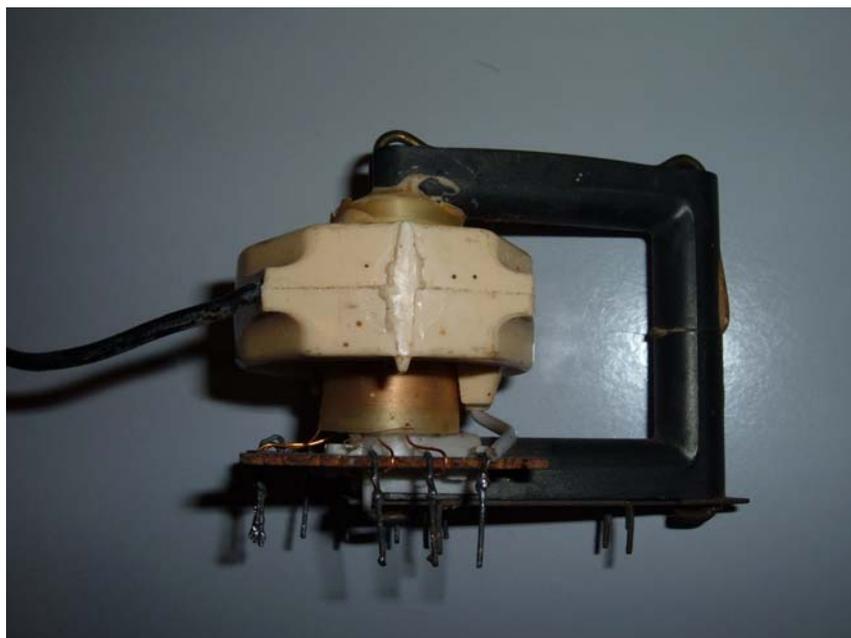
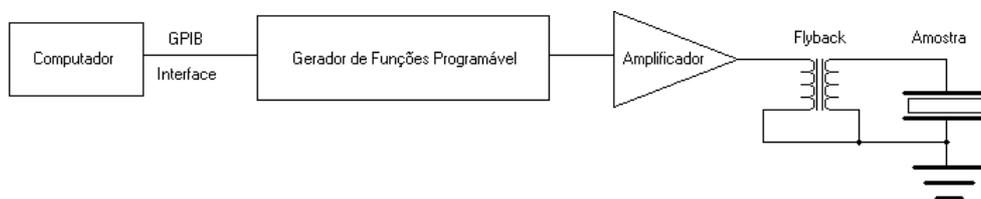


Fig. 3.14. Diagrama de blocos da montagem para simulação de pulso atmosférico e foto do transformador utilizado.

3.5. Difratometria de raios X

As amostras preparadas foram colocadas manualmente no porta amostras, evitando pressionar o material para minimizar a orientação preferencial. A superfície era aplainada com uma lâmina de vidro, para ficar o mais uniforme possível. As medições foram feitas a 20 °C em um equipamento *Rigaku* modelo DMAX 2000, usando radiação $\text{CuK}\alpha$ em uma varredura discreta de 5 a 90 graus. Cada medição durou cerca de 8 horas. Os resultados foram convertidos para o formato ASCII pelo programa *btoa*, incluído no pacote de programas que acompanha o difratômetro.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. Observações gerais

O desenvolvimento dos procedimentos descritos na metodologia foi acompanhado por observações importantes, que merecem comentários. Durante a preparação das amostras, foi notado que as amostras envelhecidas eram menos duras e quebradiças que as amostras novas, o que exigia menor rotação da serra e maior pressão de corte. Foi notado também que frequentemente as amostras envelhecidas quebravam durante as medições de espectroscopia de impedância em alta temperatura. Não foi possível efetuar medições de espectroscopia de impedância com a amostra 8 por essa razão. Isso pode indicar que o envelhecimento elétrico também provoca modificações nas características térmicas e mecânicas das amostras. Outra observação digna de nota foi a mudança de cor das amostras submetidas à difratometria de raios X. Após 8 horas submetidas a um feixe de raios X de 1,6 kW, as amostras mudaram sensivelmente de cor, para uma tonalidade amarelada acastanhada. Existem trabalhos sobre o uso de porcelanas de isoladores de alta tensão na dosimetria de radiações [44].

4.2. Espectroscopia de impedância

As medições de impedancimetria revelaram que em baixas temperaturas as amostras envelhecidas apresentam resistividade bem menor que as amostras de comparação, como era esperado (figura 4.1.).

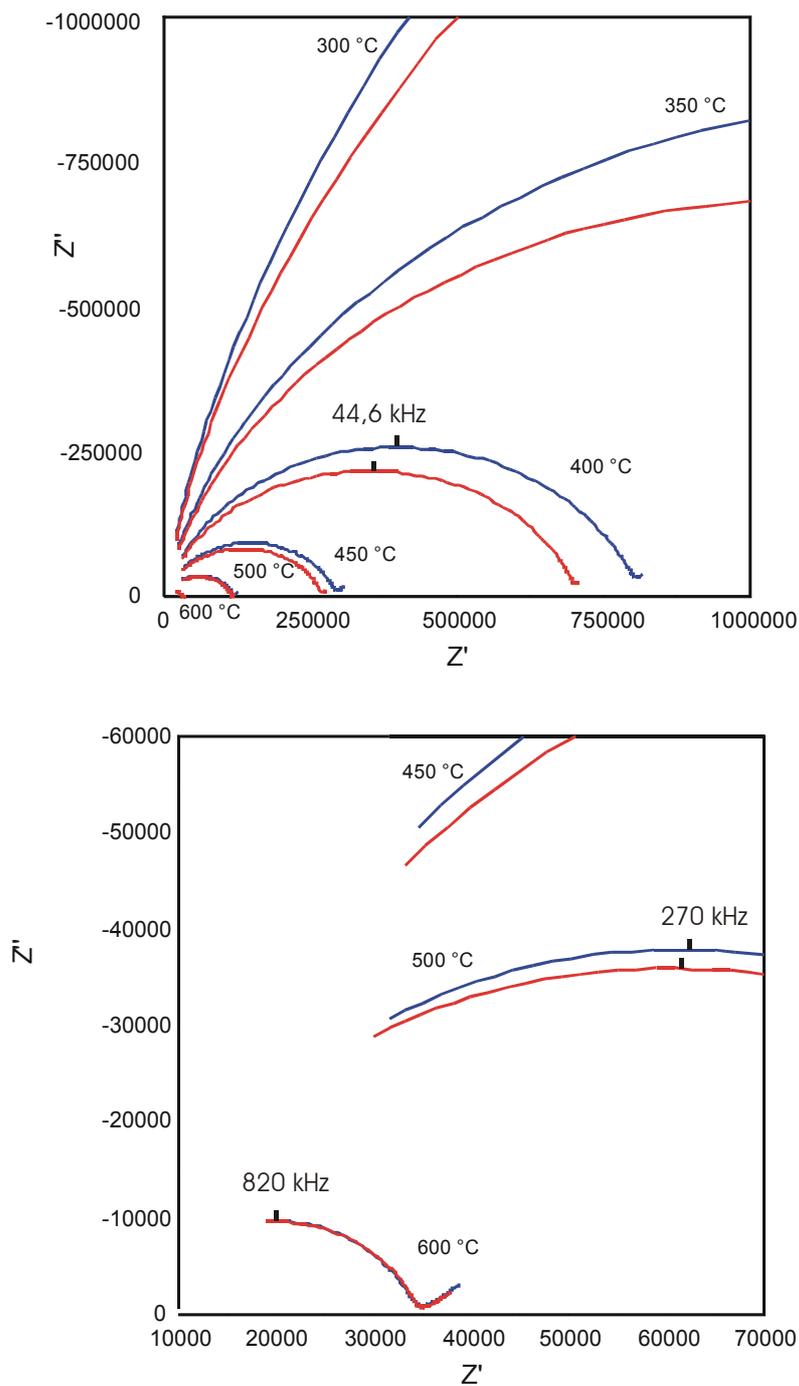


Fig. 4.1. Gráficos de espectroscopia de impedância. A amostra nova (1) corresponde aos círculos de maior raio e a amostra envelhecida (3) aos círculos de raio menor. O gráfico de baixo é uma ampliação do canto próximo da origem do gráfico de cima. As frequências de relaxação indicadas são as mesmas para as duas amostras. Z' e Z'' em Ohms. Imagens obtidas com o programa *ZPlot* versão 2.6 da *Scribner Associates*.

Entre as amostras de comparação, retiradas do isolador novo e da saia e topo dos isoladores envelhecidos, as medições foram praticamente iguais, confirmando que as características elétricas somente sofreram modificação na região do isolador submetida aos campos elétricos mais intensos. As amostras 3 e 7 ofereceram resultados semelhantes. Com temperaturas mais elevadas, amostras envelhecidas e de comparação apresentaram resistividades bastante próximas, provavelmente devido à predominância de portadores de carga liberados termicamente. Na figura 4.1. pode-se ver os gráficos onde são comparadas as medições entre uma amostra nova e uma amostra envelhecida.

Os dados de impedancimetria sobre a porcelana C110 são escassos na bibliografia, porém algumas informações podem ser confrontadas com dados técnicos da porcelana C110 das normas técnicas. Tomando a curva da amostra nova a 600 °C da figura 4.1., pode-se interpolar um circuito RC paralelo, com resistência de 30 k Ω e capacitância de 5,8 pF, (figura 4.2.). Os pontos que estão fora do segmento de círculo projetado correspondem ao efeito dos eletrodos [34].

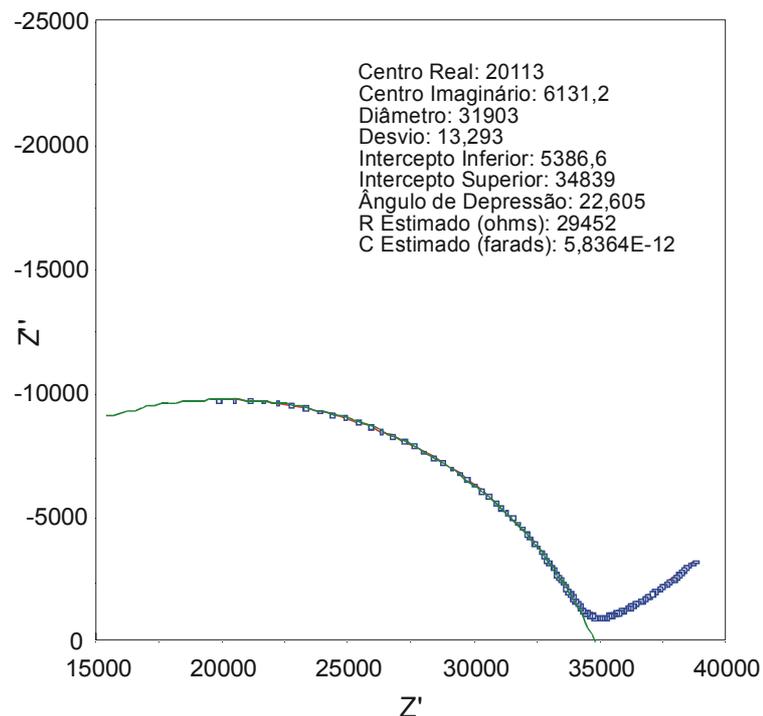


Fig. 4.2. Interpolação para um circuito RC do gráfico de espectroscopia de impedância da amostra 1, a 600 °C. Z' e Z'' em Ohms. Imagem obtida com o programa *ZPlot* versão 2.6 da *Scribner Associates*.

Utilizando as dimensões da amostra, 4 x 4 x 0,8 mm, é possível calcular a resistividade e a constante dielétrica pelas equações 4.1 e 4.2, respectivamente.

$$\rho = \frac{R.A}{l} = \frac{29,452.10^3.4.10^{-3}.4.10^{-3}}{0,8.10^{-3}} \cong 589 \Omega.m \quad 4.1$$

$$k = \frac{C.l}{\epsilon_0.A} = \frac{5,8364.10^{-12}.0,8.10^{-3}}{8,854.10^{-12}.4.10^{-3}.4.10^{-3}} \cong 33 \quad 4.2$$

Enquanto a resistividade está dentro da faixa apresentada na tabela 2.1.; 10^2 a $10^3 \Omega.m$, a constante dielétrica é consideravelmente maior que o valor tabelado; 6 a 7. Uma explicação para essa discrepância poderia ser a variação da constante dielétrica com a temperatura. Para checar essa possibilidade, a constante dielétrica foi calculada para os outros valores de temperatura nos quais foram feitas medidas de impedancimetria. O resultado desses cálculos pode ser visto na tabela 4.1. O procedimento acima foi repetido para a amostra envelhecida, para comparação, (tabela 4.2.). Na figura 4.3. estão representadas as constantes dielétricas das amostras.

Tabela 4.1. Valores da resistividade e da constante dielétrica interpolada para as medições de espectroscopia de impedância da amostra 1.

Temperatura (°C)	200	250	300	350	400	450	500	550	600
Resistividade ($\Omega.m$)	5,68 $\times 10^6$	9,38 $\times 10^5$	2,02 $\times 10^5$	5,48 $\times 10^4$	1,67 $\times 10^4$	6,16 $\times 10^3$	2,38 $\times 10^3$	1,04 $\times 10^3$	5,89 $\times 10^2$
Constante dielétrica	4,04	8,16	24,0	22,5	22,2	21,6	22,6	25,4	33,0

Tabela 4.2. Valores da resistividade e da constante dielétrica interpolada para as medições de espectroscopia de impedância da amostra 7.

Temperatura (°C)	200	250	300	350	400	450	500	550	600
Resistividade ($\Omega.m$)	4,38 $\times 10^6$	8,5 $\times 10^5$	1,67 $\times 10^5$	4,56 $\times 10^4$	1,49 $\times 10^4$	5,72 $\times 10^3$	2,34 $\times 10^3$	1,02 $\times 10^3$	5,82 $\times 10^2$
Constante dielétrica	4,4	26,9	25,2	25,5	24,0	23,1	25,2	32,4	38,7

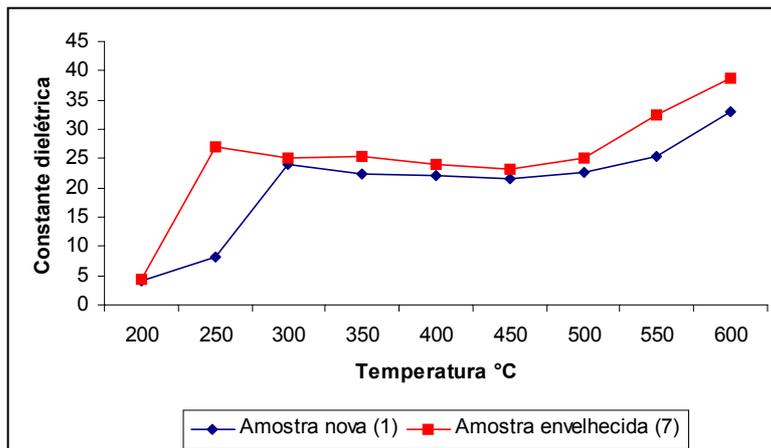


Fig. 4.3. Gráficos das constantes dielétricas das amostras 1 e 7.

A partir do gráfico da figura 4.3. pode-se supor que a constante dielétrica tende para próximo do valor tabelado na temperatura ambiente, apesar dos poucos pontos projetados. Observa-se uma brusca mudança entre 200 e 300 °C e outra entre 500 e 600 °C. Essa segunda provavelmente devida à transformação β para α do quartzo. A primeira mudança pode indicar a presença de cristobalita que sofre transformação entre 220 e 250 °C [28].

A partir dos dados de resistividade da amostra 1 e da amostra 7, foram traçados gráficos de Arrhenius, ou seja, gráficos do logaritmo da condutividade vezes a temperatura em função do inverso da temperatura, (figura 4.4.).

A condutividade em temperatura ambiente (300K) foi estimada pela projeção dos gráficos da figura 4.4., como sendo $9,3 \times 10^{-13} (\Omega.m)^{-1}$ para a amostra nova e $1,6 \times 10^{-12} (\Omega.m)^{-1}$ para a amostra envelhecida. Observa-se que o envelhecimento provocou o aumento da condutividade do material. A energia de ativação, obtida a partir da inclinação dos gráficos da figura 4.4., foi de 0,86 eV para a amostra nova e 0,88 eV para a amostra envelhecida [45].

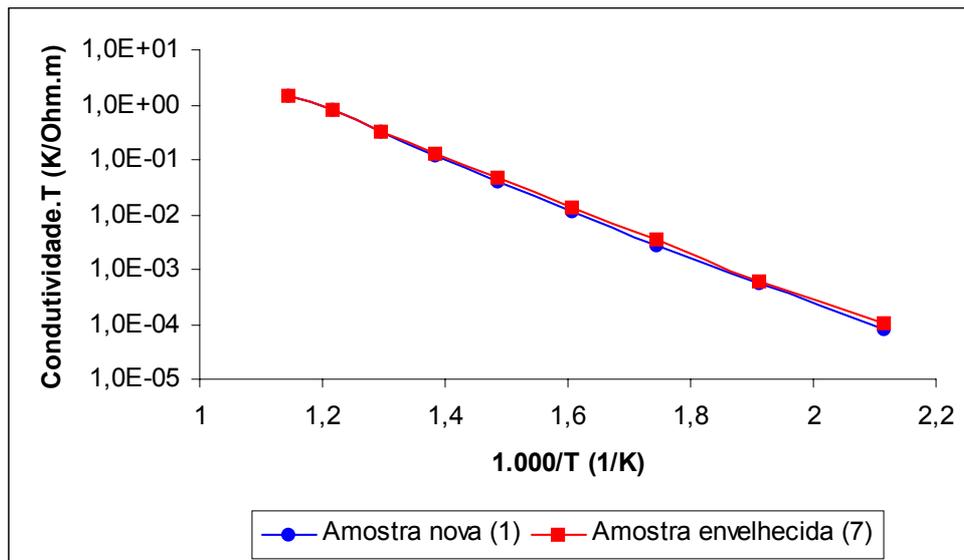


Fig. 4.4. Diagrama de Arrhenius para as amostras 1 e 7.

Para afastar a possibilidade de não linearidade na impedância das amostras, um osciloscópio *Tektronix* TDS220 foi utilizado para monitorar as formas de onda da corrente e da tensão sobre as amostras. Na figura 4.5. pode-se comprovar que a impedância é linear para uma tensão aplicada de 70 V_{RMS} e 10 kHz.

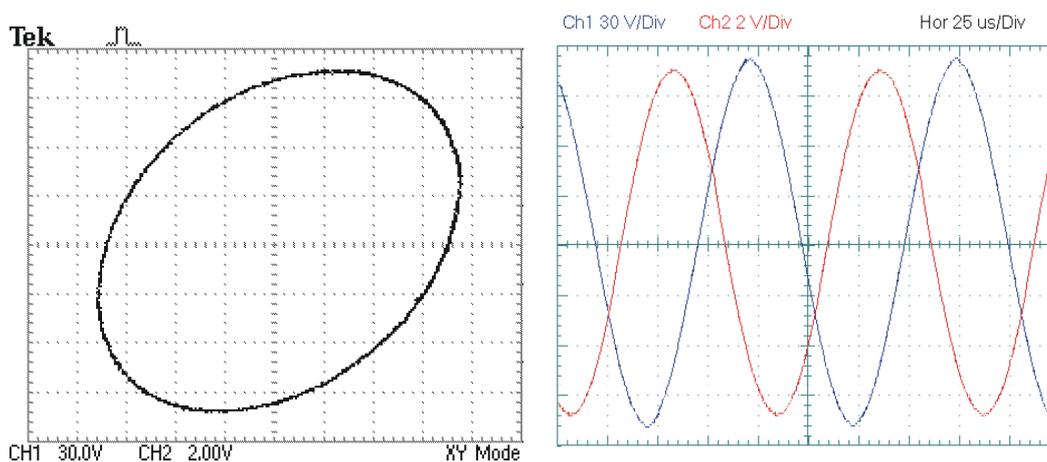


Fig. 4.5. Figura de Lissajous e oscilograma da tensão e da corrente sobre a amostra.

Imagens obtidas com o programa *WaveStar* versão 2.5 da *Tektronix*.

4.3. Rigidez dielétrica com tensão contínua

Os ensaios foram feitos à temperatura de 20 °C e pressão de 6 bar. De cada material foram retiradas 5 amostras que foram submetidas ao ensaio. Os resultados podem ser vistos na tabela 4.3.

Tabela 4.3. Resultado dos ensaios de ruptura dielétrica.

Amostra	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5	Média	Desvio Padrão	Intervalo de confiança (95 %)
1	27 kV	29 kV	26 kV	27 kV	27 kV	27,2 kV	1,10	± 0,96 kV
2	25 kV	25 kV	24 kV	25 kV	24 kV	24,6 kV	0,55	± 0,48 kV
3	18 kV	20 kV	22 kV	18 kV	20 kV	19,6 kV	1,67	± 1,46 kV
4	27 kV	27 kV	27 kV	28 kV	28 kV	27,4 kV	0,55	± 0,48 kV
5	19 kV	17 kV	17 kV	20 kV	18 kV	18,2 kV	1,30	± 1,14 kV
6	24 kV	26 kV	24 kV	22 kV	23 kV	23,8 kV	1,48	± 1,30 kV
7	18 kV	16 kV	18 kV	19 kV	17 kV	17,6 kV	1,14	± 1,00 kV
8	9 kV	12 kV	10 kV	11 kV	8 kV	10,0 kV	1,58	± 1,39 kV

Espessura das amostras: 0,8 mm.

Os ensaios de rigidez dielétrica resultaram concordantes com os valores tabelados, como pode ser provado para a amostra 1:

$$\text{Rigidez Dielétrica da amostra 1} = \frac{27,2 \text{ kV}}{0,8 \text{ mm}} = 34 \text{ kV} / \text{mm} \quad 4.5$$

Observa-se na tabela 4.3. que a tensão de ruptura sofre redução com o envelhecimento do material e grande redução na região próxima da perfuração.

4.4. Rigidez dielétrica em frequência industrial

Os resultados dos ensaios de rigidez dielétrica em frequência industrial estão listados na tabela 4.4. e na figura 4.6. pode-se ver imagens de microscopia óptica da amostras tipo 1 rompidas por tensão contínua e por ruptura térmica, após serem lavadas com água e sabão e depois com acetona em banheira de ultra-som por 5 minutos, para remover o grafite. Observa-se fusão de grande área e bolhas na amostra rompida termicamente e perfuração na amostra que sofreu ruptura por tensão.

Tabela 4.4. Resultados dos ensaios com tensão na frequência industrial.

Amostra	Amplitude da Corrente (μA)	Defasagem da Corrente (graus)	Tangente de Perdas	Tempo até a Ruptura (segundos)
1	3,76	88,6	0,0244	135
2	4,19	88,8	0,0209	124
3	5,55	86,4	0,0629	105
4	4,48	88,9	0,0192	147
5	5,59	87,8	0,0384	98
6	5,23	88,1	0,0332	103
7	6,14	86,6	0,0594	85
8	14,3	79,4	0,1871	23

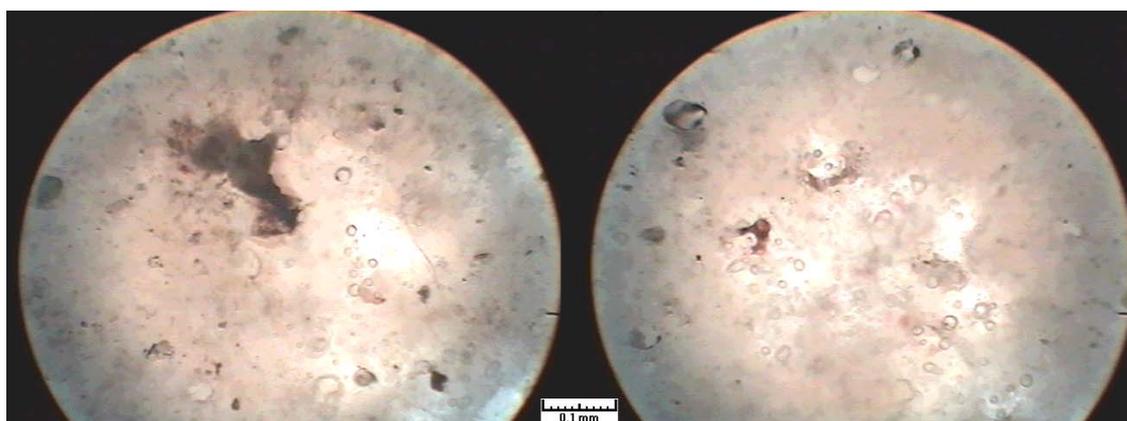


Fig. 4.6. Fotografias de microscopia óptica com ampliação de 160 vezes das amostras que sofreram ruptura. À esquerda ruptura elétrica e à direita ruptura térmica. Imagem obtida com uma câmara *GKB*, modelo CC9602 CCD, adaptada a um microscópio *Carl Zeiss / Jena*.

Os testes em frequência industrial que estimaram a tangente de perdas revelaram resultados coerentes com os tabelados, apesar de esse não ser um método muito preciso para a medição da tangente de perdas. A estimativa de ruptura térmica teve apenas caráter comparativo, mesmo porque não existem valores tabelados nem normas para esse ensaio. Observa-se um aumento da tangente de perdas com o envelhecimento, coerente com as medições de espectroscopia de impedância. Também é expressiva a redução no tempo de ruptura, especialmente para a amostra 8.

4.5. Ensaio com pulsos atmosféricos

Como o ensaio com pulsos atmosféricos teve o objetivo de comprovar o envelhecimento por exposição a solicitações elétricas, apenas uma amostra nova foi utilizada. Durante a 14ª sessão de pulsos atmosféricos a amostra rompeu. Na tabela 4.5. e no gráfico da figura 4.7. pode-se ver as medições de resistência da amostra efetuadas durante esse ensaio.

Tabela 4.5. Resistência da amostra após os ciclos de pulsos atmosféricos.

	Número de sessões de pulsos 5.000 pulsos por sessão													
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Resistência GΩ	4,9	4,9	4,9	4,8	4,8	4,7	4,6	4,5	4,3	4,0	3,5	3,0	2,5	1,2

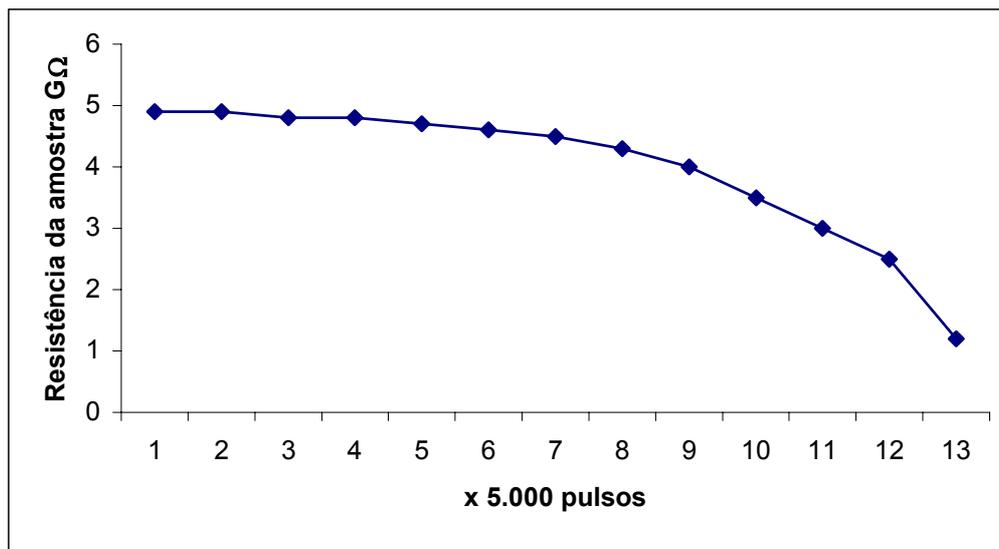


Fig. 4.7. Gráfico da resistência elétrica da amostra após aplicação de trem de pulsos atmosféricos.

4.6. Difractometria de raios X

As medições confirmaram que as porcelanas produzidas sob a especificação C110 da norma IEC 60672 apresentam estreita variação na estrutura cristalográfica, pois os materiais produzidos por diversos fabricantes apresentam difratogramas muito semelhantes. As amostras retiradas da saia e do topo dos isoladores envelhecidos também apresentaram difratogramas semelhantes aos das amostras novas, (figura 4.8.).

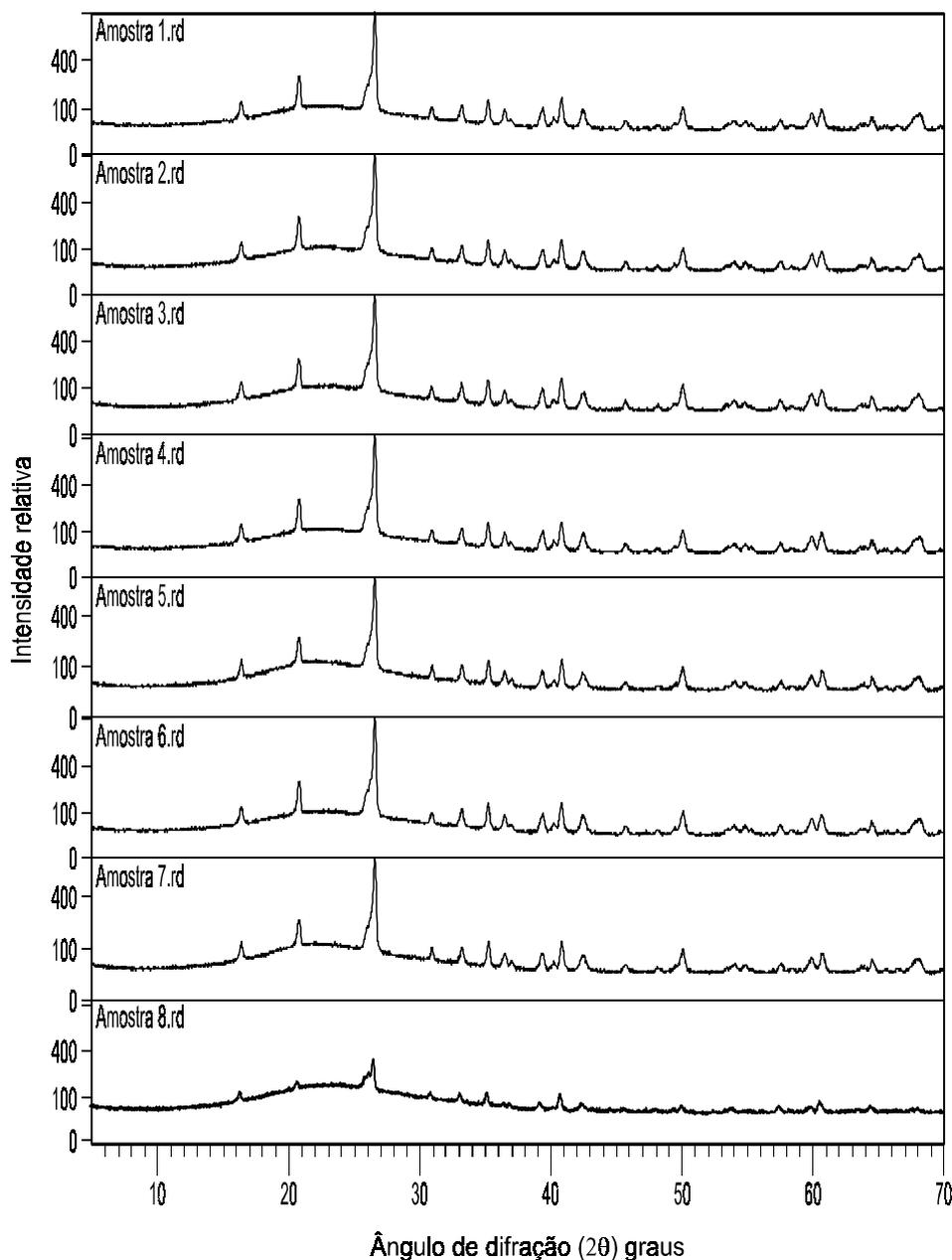


Fig. 4.8. Difratomogramas das amostras 1 a 8.

A bibliografia estudada revela que a porcelana C110 contém em sua estrutura quartzo, mulita e material vítreo como principais fases. Os isomorfos do quartzo; corundum e cristobalita, assim como impurezas das matérias primas e aditivos, podem estar presentes em pequenas quantidades. Isso foi confirmado por comparação com o banco de dados cristalográficos ICDD 2001 (International Centre for Diffraction Data). Os principais picos estão identificados na figura 4.9.

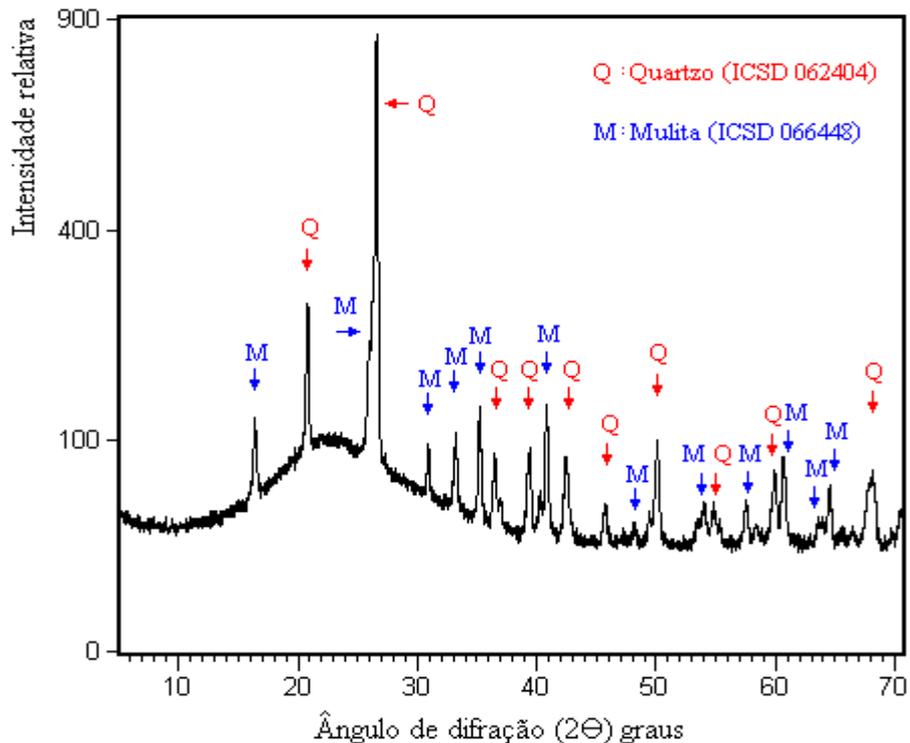


Fig. 4.9. Principais picos de difração da amostra 1.

As amostras 3, 5 e 7, que correspondem ao material envelhecido, também apresentam difratogramas semelhante entre si, mas diferença sutil em relação aos difratogramas das amostras 1, 2, 4 e 6. Observa-se qualitativamente que o material envelhecido apresenta redução na intensidade dos picos das fases cristalinas e aumento no contorno associado à fase amorfa, (figura 4.10.). Já a amostra 8 possui difratograma sensivelmente diferente das demais amostras (figura 4.11.). Na figura 4.12. pode-se ver que a diferença entre a amostra 8 e a amostra 1 é bem pronunciada.

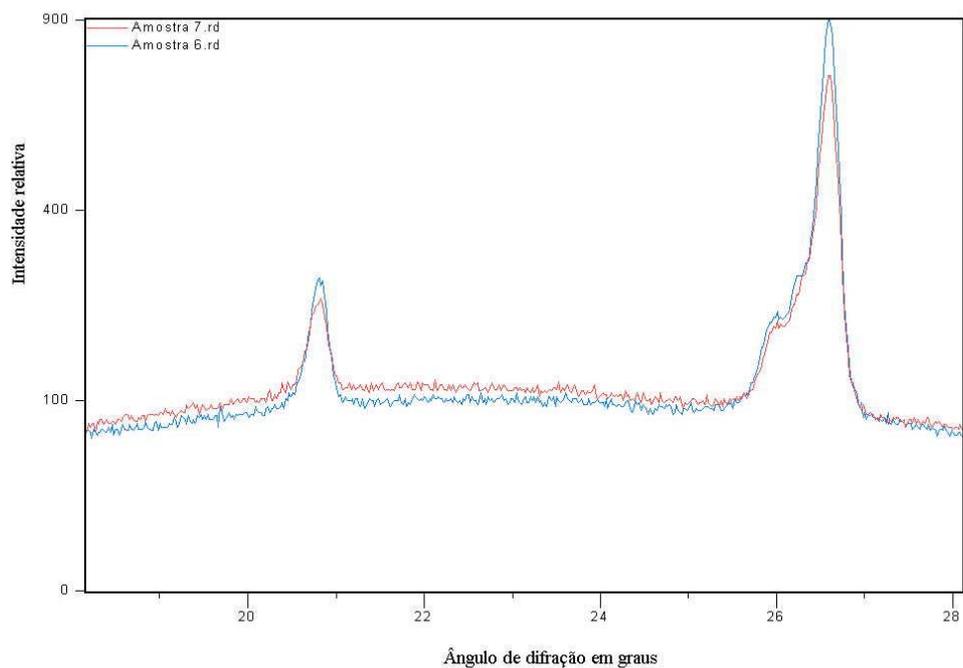


Fig. 4.10. Comparação entre os difratogramas das amostras 6 e 7.

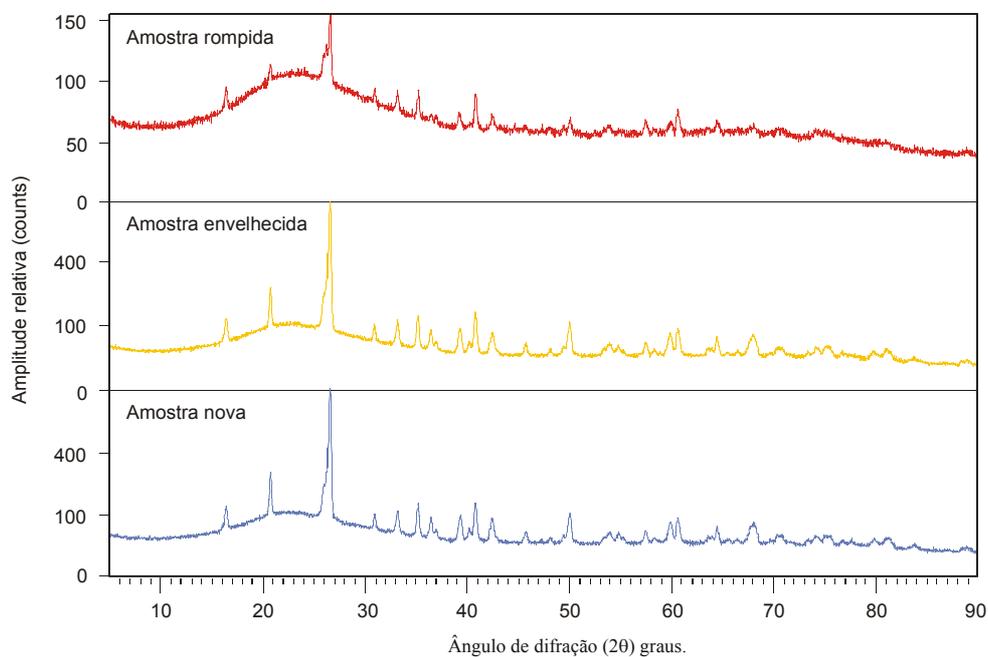


Fig. 4.11. Comparação entre os difratogramas das amostras nova (amostra 1), envelhecida (amostra 7) e próxima da ruptura (amostra 8). O gráfico da amostra 8 está ampliado no sentido vertical.

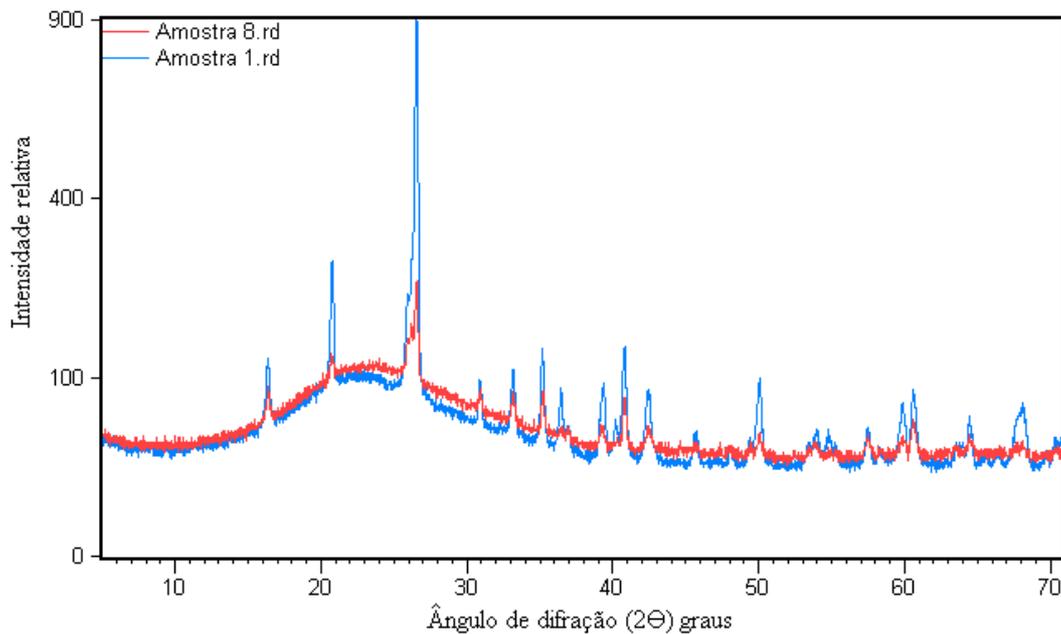


Fig. 4.12. Comparação entre as amostras 1 e 8.

4.7. Interpretação dos resultados

É incontestável que a exposição a solicitações de tensão produz modificações na estrutura e nas características físicas da porcelana. A difratometria de raios X revela uma redução nas fases cristalinas, especialmente no quartzo, e aumento na fase vítrea, que sabidamente é a responsável majoritária pela condução de corrente elétrica na porcelana em baixas temperaturas.

A espectroscopia de impedância oferece a informação de que o aumento da condutividade é pronunciado em baixas temperaturas, condição na qual a polarização por movimentação de íons é predominante, enquanto as amostras nova e envelhecida apresentam impedância semelhante em temperaturas elevadas. Essa polarização já foi associada à formação de defeitos na estrutura do material [19].

O aumento da quantidade e a deterioração da qualidade da fase vítrea, devido à formação de defeitos, explica a redução da resistividade e da rigidez dielétrica. Os ensaios com pulsos atmosféricos mostram que a deterioração tem comportamento

aparentemente exponencial com relação à dose de pulsos suportados, como fica claro na figura 4.7.

A ruptura térmica, cujo mecanismo já é bastante conhecido [4], foi relativamente difícil de ser alcançada com sobretensão em frequência industrial, porém está claro que a tangente de perdas aumenta rapidamente com a frequência e com a temperatura. Isso é um problema para aplicações que impõem condições severas de funcionamento para os isoladores, como transmissores de radiofrequência e microondas, reatores, fornos, etc. [46].

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

O aumento da fase vítrea e a sua degradação pela formação de defeitos foi determinada como sendo a responsável pela deterioração das características elétricas da porcelana C110 quando exposta a solicitações elétricas, em especial os impulsos atmosféricos. Uma idéia da suportabilidade aos impulsos pode ser interpolada a partir dos dados obtidos nos ensaios com impulsos atmosféricos, para um isolador com dimensões práticas.

A abordagem utilizada para o trabalho foi acertada na maioria das ocasiões, mas alguns pontos poderiam ter sido melhor sucedidos, se algumas informações fossem previamente conhecidas. As medições de espectroscopia de impedância somente foram possíveis a partir de 300 °C, pois a impedância da porcelana em baixa frequência à temperatura ambiente é alta demais para a sensibilidade do impedancímetro. A informação de que a impedância da porcelana é linear para tensões mais elevadas, que foi confirmada nas medições, poderia ser utilizada para modificar o arranjo de medição, com a inclusão de um amplificador linear capaz de fornecer uma tensão bem maior que os 3 V_{RMS} máximos do gerador interno do impedancímetro utilizado. A modificação do porta amostras para receber amostras de maior área também poderia contribuir para tornar as medições mais precisas. Os ensaios de impulsos atmosféricos somente passaram a produzir resultados adequados quando as amostras tiveram suas faces recobertas com grafite, para equalizar o campo. Antes disso, o envelhecimento somente ocorria na região próxima dos eletrodos, impedindo que as amostras envelhecidas artificialmente fossem submetidas a difratometria de raios X e impedancimetria, o que permitiria uma melhor correlação do envelhecimento em laboratório com o envelhecimento em campo.

Os equipamentos, programa e técnicas desenvolvidas para o desenvolvimento do trabalho revelaram-se funcionais e precisos, passando a servir para outras atividades de pesquisa. Os diagramas, listagens, códigos fonte, etc. são disponibilizados pelo autor para os interessados.

A influência do envelhecimento elétrico nas propriedades mecânicas e térmicas do material, constatada nos procedimentos mas não estudada, é uma proposta interessante para um futuro trabalho. A análise de outras cerâmicas como a porcelana de alta alumina e a esteatita também são propostas. A alteração da coloração da porcelana submetida a raios X também pode ser investigada, como de fato já está para outras radiações [44].

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. LIEBERMANN, J. Reliability of materials for high-voltage insulators. *American Ceramic Society Bulletin*, v.79, p.55–58, 2000.
2. FASSBINDER, G. A new ceramic body concept for high strength HV insulators. In: Int. Symp. on High Voltage Engineering (ISH), 13., 2003, Delft, The Netherlands. *Proceedings...* Rotterdam: millpress, 2003. p.214.
3. TOD, JACK H. *A History of the Electrical Porcelain Industry in the United States*. Buna: 1977. 180 p.
4. ROTH, A. *Técnica de la Alta Tensión*. Barcelona: Editorial Labor, 1966. 887p.
5. CHINELATTO, A. L. Porcelanas elétricas aluminosas: Parte 1 – Revisão da literatura. *Cerâmica*, v.50, n.313, p.62-68, 2004.
6. CHEN, Y. F.; WANG, M. C.; HON, M. H. Phase transformation and growth of mullite in kaolin ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, v.24, p.2389-2397, 2004.
7. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *Ceramic and glass insulating materials*: IEC 60672. Geneva, 1996. 141p.
8. STUDART, A. R.; DIAS, L. L.; PANDOLFELLI, V. C.; RODRIGUES, J. A.; MENEGAZZO, B. A.; MAURÍCIO, M. R. D. Utilização de alumina na fabricação de isoladores elétricos para alta tensão. *Cerâmica Industrial*, v.1, p.32-36, 1996.
9. DANA, K.; DAS, S. K. Evolution of microstructure in flyash-containing porcelain body on heating at different temperatures. *Bulletin of Materials Science*, v.27, p.183-188, 2004.

10. LIEBERMANN, J.; SCHULLE, W. Bauxite porcelain: a new high-tech product for high-voltage insulation. *American Ceramic Society Bulletin*, v.81, p.33–38, 2002
11. CLIFTON HILL ENTERTAINMENT, Niagara Falls History of Power. (Word Wide Web, 03/02/05, <http://www.niagarafrontier.com/power.htm>).
12. FUCHS, R. D. *Transmissão de Energia Elétrica: Linhas Aéreas*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1979. 588p.
13. ELGERD, O. I. *Introdução à Teoria de Sistemas de Energia Elétrica*. São Paulo: McGraw-Hill, 1976. 604p.
14. CHENEY, M. *Tesla: A Man Out of Time*. New York: Touchstone, 1981. 379p.
15. NAIDU, S.R. *Transitórios eletromagnéticos em sistemas de potência*. Campina Grande: EDUEPB, 1985. 316 p.
16. HEDMAN, D. E. *Coordenação de Isolamento*. Santa Maria: EDUFMS, 1979. 200p.
17. DIENDORFER, G. Ground Flash Density and Lightning Exposure of Power Transmission Lines. In: IEEE Bologna PowerTech, 2003, Bologna. *Proceedings...* Vienna: Aldis, 2003.
18. BIASIGIN, R. B.; GUEDES, R. L. Climatologia de Relâmpagos no Brasil: Análise Preliminar. In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 11., 2000, Rio de Janeiro. *Anais...* p. 1949-1957.
19. KOLPASHCHIKOVA, Z. V.; SHCHERBAKOVA, E. V.; KOSTYUKOV, N. S. Polarization Processes in Electrotechnical Porcelain Within a Wide Frequency Range. *Glass and Ceramics*, v.60, p.370-373, 2003.

20. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Coletânea de Normas de Isoladores*. Rio de Janeiro: ABNT, 1989. 240p.
21. BARSOUM M. *Fundamentals of Ceramics*. New York: McGraw-Hill, 1997. 670p.
22. VERBAND DER KERAMISCHEN INDUSTRIE E.V., Werkstoffe der Technischen Keramik. (Word Wide Web, 12/02/05, <http://www.keramverband.de/brevier>).
23. MOLISANI, A. L. Sinterização de nitreto de alumínio com compostos contendo cálcio. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.
24. NORTON, F. H. *Introdução à Tecnologia Cerâmica*. São Paulo: EDUSP, 1973. 326p.
25. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PESQUISA MINERAL, Anuário Mineral Brasileiro 2001. 404p.
26. CARTY, W. M. Observations on the Glass Phase Composition in Porcelains. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, v.23, p.79-94, 2002.
27. CARTY, W. M.; PINTO, B. M. Effect of Filler Size on the Strenght of Porcelain Bodies. *Ceramic Engineering and Science Proceedings*, v.23, p.95-105, 2002.
28. VAN VLACK, L. H. *Propriedades dos Materiais Cerâmicos*. São Paulo: EDUSP, 1973. 320p.
29. CHEN, Y. F.; WANG, M. C.; HON, M. H. Phase Transformation and Growth of Mullite in Kaolin Ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, v.24, p.2389-2397, 2004.

30. IQBAL Y.; LEE W.E. Microstructural Evolution in Triaxial Porcelain. *Journal of the American Ceramic Society*, v.83, p. 3121-3127, 2000.
31. BRAGANÇA, S. R.; BERGMANN, C. P. Aspectos Teóricos e Práticos Sobre a Resistência Mecânica de Porcelanas. *Cerâmica*, v.50, p.145-155, 2004.
32. CHIANG, Y. M.; BIRNIE, D. P.; KINGERY, W. D. *Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering*. New York: John Wiley & Sons, 1997. 522p.
33. VERESHCHAGIN, V. I.; SAFRONOV, V. N.; KOTENKO, L. K. The Effect of a High-Voltage Pulse Discharge on the Crystal Lattice and Surface of Quartz Grains. *Glass and Ceramics*, v.59, p.46-48, 2002.
34. MACDONALD, J. R. *Impedance Spectroscopy, Emphazing Solid Materials and Systems*. New York: John Wiley & Sons, 1987. 368p.
35. JOFFE, A. F., *The Physics of Crystals*. New York: McGraw-Hill, 1928, 198p.
36. VON HIPPEL, A. R. Der Elektrische Durchschlag in Gasen und Festen Isolatoren. *Ergebnisse der exakten Naturwissenschaften*, v.14, p.79, 1953.
37. ZENER, C. A Theory of the Electrical Breakdown of Solid Dielectrics. *Proceedings of the Royal Society of London*, v.145, p.523-529, 1934.
38. CHAPMAN, J. J.; FRISCO, L. J. Dielectric Strength of Solid Insulation. *Electrical Manufacturing*, v.1, p.136, 1954.
39. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Coletânea de Normas: Ensaio Elétricos de Alta Tensão*. Rio de Janeiro: ABNT, 1985. 174p.

40. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Materiais Isolantes Sólidos: Determinação da Permissividade e do Fator de Dissipação Dielétrica à Frequência Industrial, de Áudio e de Rádio, Incluindo Ondas Métricas – método de Ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT, 1982. 33p.
41. CARUSO, H. An Overview of Environmental Reliability Engineering. In: Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1996, Las Vegas. *Proceedings...* p. 102-109.
42. SASAKI, J. M.; MENESES, C. T. Curso do Método Rietveld, 25 a 28 de janeiro de 2005. 41p. Notas de aula.
43. PASCHEN, F. Ueber die zum Funkenübergang in Luft, Wasserstoff und Kohlensäure bei Verschiedenen Drucken Erforderliche Potentialdifferenz. *Ann. Phys. Chem.*, v.3, p.69-96, 1889.
44. KHAMIDOVA, L.G.; IVANNIKOV, A. I.; SKVORTSOV, V. G.; STEPANENKO, V. F. Possibility of Using porcelain Samples of High Voltage Lines Insulators for Radiation Dose Reconstruction by EPR Spectroscopy. In: International Symposium on New Prospects of ESR Dosimetry and Dating, 2001, Osaka. *Proceedings...* , 2002.
45. KINCS, J.; MARTIN, S. W. Non-Arrhenius Conductivity in Glass: Mobility and Conductivity Saturation Effects. *Physical Review Letters*, v.76, p.70-73, 1996.
46. STEIN, C. *Critical Materials Problems in Energy Production*. New York: Academic Press, 1976. 918p.

ANEXO 1

DESCRIÇÃO DA FONTE DE ALTA TENSÃO

Para as medições de rigidez dielétrica, foi necessária a construção de uma fonte de tensão contínua que produzisse uma rampa de tensão desde zero até 30 kV, com razão de crescimento de 500 V/s. Essa fonte foi projetada tendo como base um transformador de saída horizontal utilizado em receptores de televisão a cores (*flyback*). O circuito pode ser visto nas figuras A.1.1., diagrama de fiação, e A.1.2., placa de controle. Na figura A.1.1., o transformador TA, os retificadores DA e DB, os capacitores CA, CB, CC, CD e CE e os circuitos integrados reguladores de tensão UA e UB formam as fontes de alimentação de +30V, +12V e -12V. O transistor QA funciona como regulador série, tendo CF como capacitor de desacoplamento e RA, que é um resistor de 5 W, como carga, para evitar que CF carregue-se com a corrente de fuga de QA. QB e o transformador de saída horizontal funcionam como um conversor tipo *flyback*. RB é um sensor de corrente e um divisor de foco, do tipo utilizado em monitores de computador, faz o papel de divisor de tensão. No circuito da figura A.1.2., U4 e os componentes associados formam um oscilador, cuja frequência é ajustada em P4, para ressonância do transformador de saída horizontal (aproximadamente 20 kHz). Não há modulação de largura de pulso e a tensão de saída é controlada pela tensão aplicada no transformador de saída horizontal, por meio do transistor QA. O capacitor C13 é de polipropileno, para evitar variações na frequência de oscilação. Q3 e T1 formam o circuito excitador, R18 e R19 fazem o acoplamento de impedância do transistor de potência. O transistor QA é excitado por Q2 via R7, que por sua vez é controlado por U1:A, um amplificador operacional que recebe a realimentação do divisor de tensão por meio de P2, onde é feito o ajuste de ganho, para que 5 V no pino 3 de U1:A correspondam a 30 kV na saída da fonte. C2 funciona como filtro para eliminar ruídos captados pela fiação que interliga a placa ao divisor de tensão.

D1, R1, R2 e Q1 formam uma fonte de corrente constante que carrega linearmente C1, gerando a rampa de tensão de 0,1 V/s. U1:B funciona como seguidor de tensão, alimentando o amplificador U1:A e o instrumento de bobina móvel instalado no

painel, M1. U2:A e U2:B são monoestáveis que controlam o funcionamento da fonte. Ao pressionar S1, o monoestável U2:A é disparado, acendendo o LED D2, fazendo soar o alarme piezoelétrico BZ1 e energizando o relê RY1. Isso faz com que o capacitor C1 descarregue-se por R3. Depois de cerca de 1 segundo, constante de tempo de R9 e C5, o monoestável U2:A retorna ao repouso, desligando o LED D2, o alarme e R3 e disparando U2B, por meio de C7. A saída de U2:B faz acender o LED D3, habilita o oscilador formado por U4 e energiza o relê RY2, que conecta a fonte de corrente a C1 e a tensão da rampa a U1:A. Ao ocorrer uma ruptura, surge uma tensão sobre RB que é aplicada ao comparador de tensão U3, que reinicializa U2:A e U2:B. C10, R14 e D4 protegem U3 de impulsos de tensão vindos do sensor de corrente. A tensão correspondente à ruptura é armazenada em C1.

É importante que a fonte, a câmara e o operador estejam aterrados, pois pontos de alta tensão expostos produzem íons no ar que podem provocar descargas elétricas indesejáveis. Apesar da capacidade de corrente da fonte ser bastante reduzida, o manuseio de tensões elevadas é sempre perigoso e o equipamento não deve ser utilizado por pessoas não familiarizadas com o manuseio de alta tensão.

O *layout* da placa de circuito impresso pode ser visto na figura A.1.3. e a distribuição dos componentes na figura A.1.4.

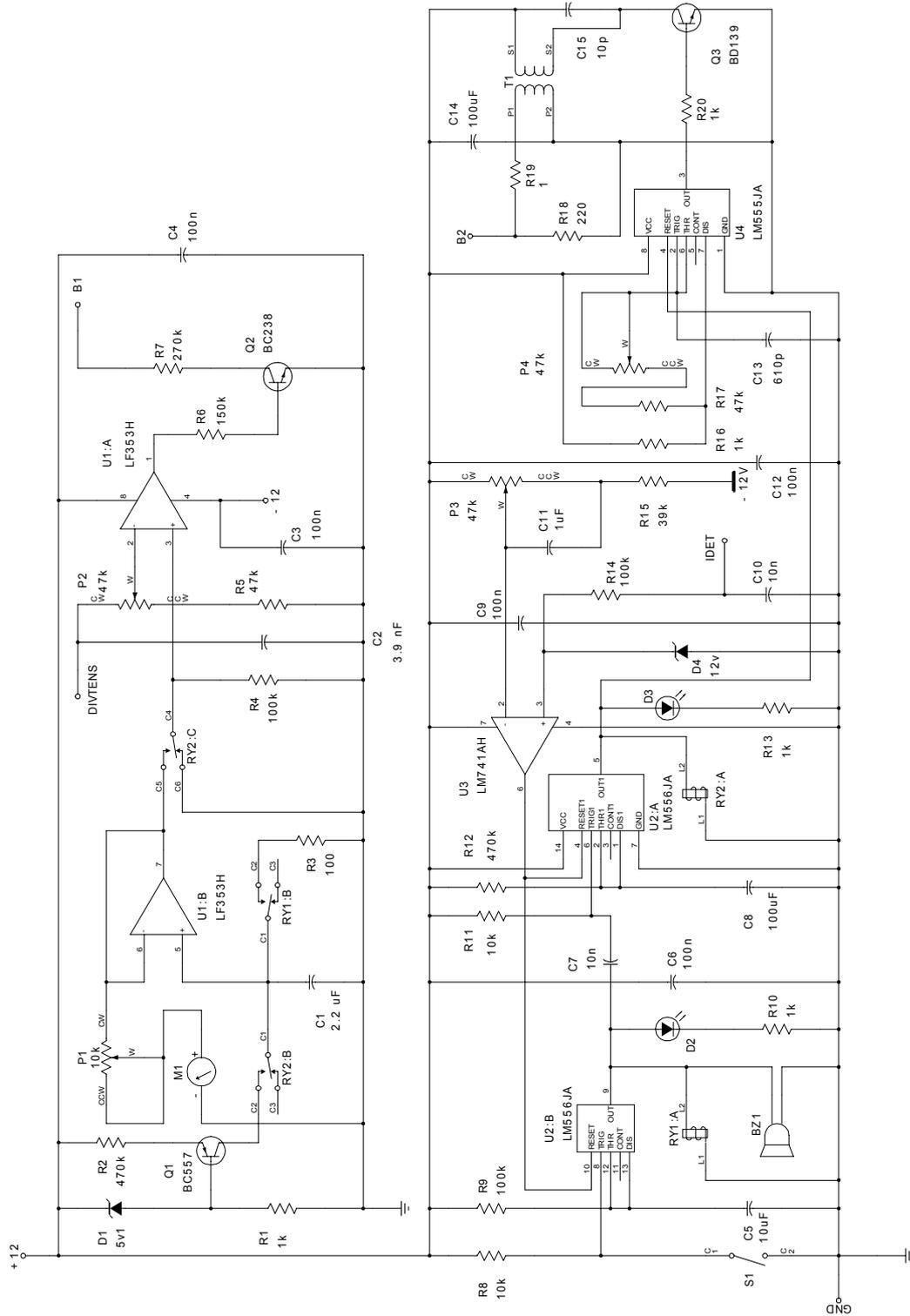


Fig.A.1.2. Diagrama esquemático da placa de controle da fonte de alta tensão.

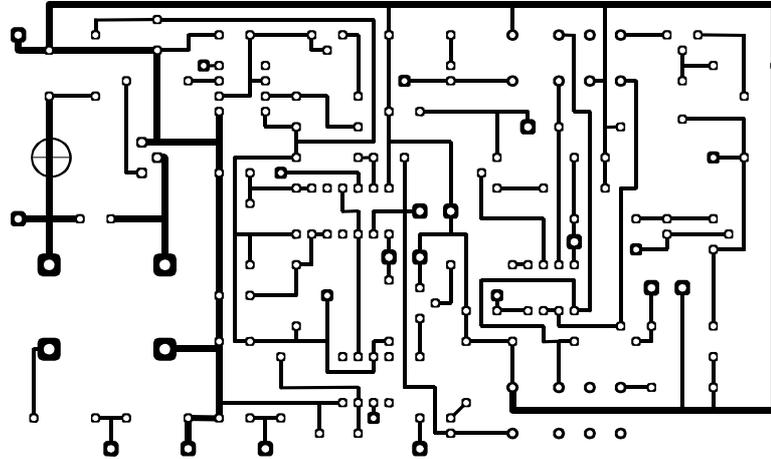


Fig. A.1.3. *layout* da placa de circuito impresso da fonte de alta tensão
(reduzida 80 %).

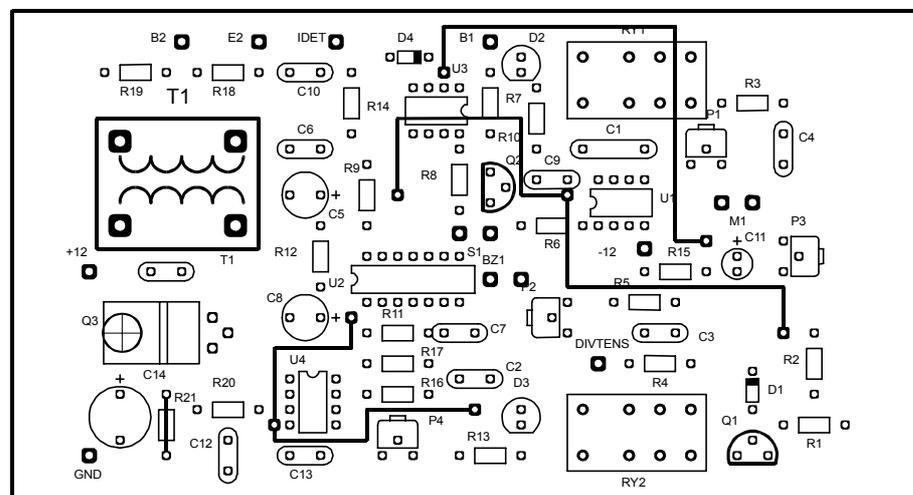


Fig. A.1.4. Distribuição dos componentes na placa de circuito impresso.

ANEXO 2

DESCRIÇÃO DO PROGRAMA DE CONTROLE DO FORNO

O forno utilizado para aquecer a câmara de espectroscopia de impedância é controlado por um controlador *Eurotherm* modelo 2216e, que possui interface de comunicação RS485 e utiliza protocolo *Modbus*. O protocolo *Modbus* é um padrão aberto de comunicações desenvolvido por um grupo de fabricantes e desenvolvedores de produtos de automação, especialmente para a comunicação de controladores e sistemas de automação. A página desse grupo pode ser acessada em www.modbus-ida.org. O controlador foi conectado a uma porta serial de um computador PC por meio de um adaptador RS485 x RS232. O acesso ao protocolo *Modbus* é disponibilizado por um controle *ActiveX* denominado “*Modbus Master Automation Server*” produzido por Ricardo Saat. A página do projeto é: www.speff.com. O programa de controle, denominado ModDog, foi desenvolvido na plataforma *Borland Delphi* e é executado por uma linha de comando no arquivo de lote do programa *ZPlot* composta pelo nome do programa e pela temperatura desejada, em °C, por exemplo:

ModDog 500

As imagens das interfaces do programa podem ser vistas na figura A.2.1 e A.2.2.

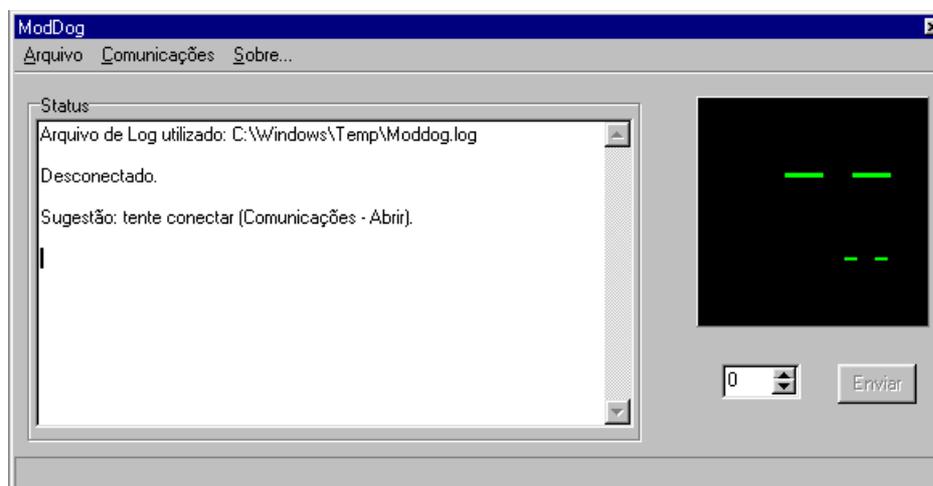


Fig. A.2.1. Tela de interface com o programa ModDog.

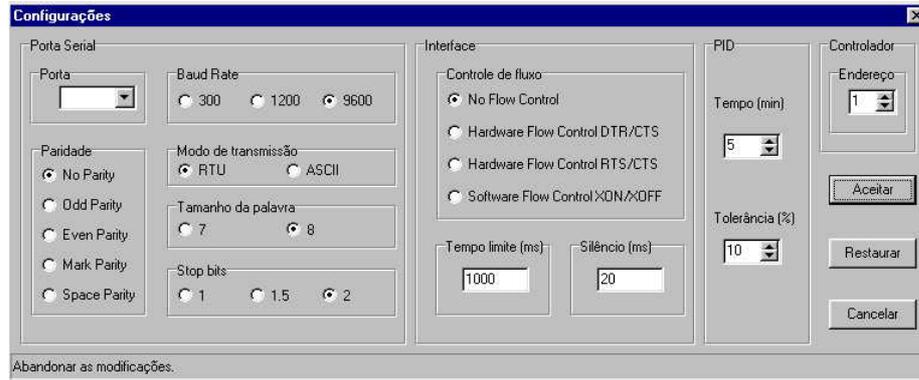


Fig. A.2.2. Tela de configurações do programa ModDog.

O programa comunica-se com o controlador do forno, ajustando a temperatura especificada e então aguarda a estabilização da temperatura. As atividades e os possíveis problemas encontrados são registrados em um arquivo de texto; c:\windows\temp\Moddog.log, como padrão.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)