

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de**  
**Materiais – PPGE3M.**

**RECICLAGEM DE ISOLADORES CERÂMICOS EM SUBSTITUIÇÃO AO**  
**QUARTZO E À ALUMINA EM MASSAS DE PORCELANAS ELÉTRICAS**

**Dissertação para a obtenção do título de Mestre em Engenharia**

**PORTO ALEGRE – RS**

**2021**

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL**  
**Escola de Engenharia**  
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de**  
**Materiais – PPGE3M**

**RECICLAGEM DE ISOLADORES CERÂMICOS EM SUBSTITUIÇÃO AO**  
**QUARTZO E À ALUMINA EM MASSAS DE PORCELANAS ELÉTRICAS**

**LEANDRO VIEIRA FERREIRA**  
**Bacharel em Engenharia de Energia**

Trabalho desenvolvido no Laboratório de materiais cerâmicos da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia de Materiais

Dissertação de Mestrado apresentado como requisito final para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS – PPGE3M

Orientador: Prof. Dr. Saulo Roca Bragança  
Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Vânia Caldas de Sousa

**BANCA EXAMINADORA:**

Prof. Dr. André Zimmer

Prof. Dr. Caio Marcelus Marques

Prof. Tiago Delbrücke

Prof. Afonso Reguly  
Coordenador do PPGE3M

*“Eu não sei o que posso parecer para o mundo, mas para mim mesmo eu pareço ter sido somente um garoto brincando na praia e me divertindo de vez em quando, encontrando um cristal mais aveludado ou uma concha mais linda do que o usual, enquanto o grande oceano da verdade deposita todo o inexplorado diante de mim”*

*Isaac Newton*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. Saulo R. Bragança e a Profa. Vânia C. de Souza pela orientação, incentivo e dedicação nas correções do presente trabalho.

Ao Dr. José Ramon Jurado Egea pela contribuição nas discussões dos resultados.

Especial agradecimento ao estudante de Eng. de Materiais Vitor Ribas pela realização das análises experimentais

Ao apoio de meu colega de trabalho Eng. Civil Adalberto Viana Rodrigues

Um abraço a todos os colegas do LACER e LABIOMAT.

Merece também menção o Prof. Dr. Gerson Miltzarek e ao LAPROM pelo apoio na britagem e moagem dos isoladores.

Agradeço aos professores do LACER, Prof. Carlos P. Bergmann e Annelise Alves.

Especial agradecimento a todos os funcionários (as) do PPGEM.

Dedico este trabalho a todos os batalhadores que em muitas vezes em condições de desvantagem conseguem concluir seus trabalhos e são um exemplo de superação.

## RESUMO

Os isoladores elétricos de porcelana fornecem suporte mecânico para os condutores elétricos e os mantêm isolados do aterramento e da estrutura da rede elétrica. Estima-se que a manutenção constante e a troca desses materiais no Brasil gerem uma quantidade de 3.000 toneladas por ano. O trabalho iniciou com a coleta de isoladores elétricos cerâmicos usados em uma central de reciclagem localizada em Canoas-RS, onde uma concessionária de energia elétrica local realiza o descarte dos materiais elétricos. Foram utilizadas peças provenientes de lotes de isoladores elétricos cerâmicos de 15 kV. A presente dissertação propôs uma metodologia de reciclagem de um isolador elétrico cerâmico, o qual foi moído e incorporado em diferentes formulações de cerâmicas triaxiais, produzindo-se porcelanas elétricas, substituindo-se parcialmente e totalmente o quartzo e alumina nas formulações. Utilizou-se uma argila branca caulinítica, um feldspato e um quartzo, empregados pela indústria cerâmica. As formulações resultantes foram gresificadas nas temperaturas de 1300°C a 1600°C. Posteriormente, realizou-se a caracterização tecnológica (resistência mecânica à flexão, absorção de água e retração linear) e a investigação das propriedades elétricas. Os resultados demonstraram que a formulação com 40% de resíduo apresentou menor temperatura de gresificação, boas propriedades mecânicas e resistividade de  $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$  (avaliada em temperatura ambiente) – esse valor é compatível com isoladores de baixa tensão elétrica. Destaca-se a menor temperatura de queima obtida pela formulação em que se substituiu 100% do quartzo e da alumina. Provou-se, portanto, a viabilidade para a fabricação de isoladores de baixa tensão, substituindo matérias-primas naturais por meio da incorporação de isoladores usados na própria massa de fabricação de isoladores.

Palavras chave: Isoladores elétricos cerâmicos; porcelana triaxial; reciclagem.

## ABSTRACT

Porcelain electrical insulators provide mechanical support for electrical conductors and keep them isolated from the ground and the main structure. It is estimated that the constant maintenance and exchange of these materials in Brazil generates an amount of 3,000 tons per year. The work started with the collection of discarded ceramic electrical insulators at a recycling center located in Canoas-RS, where a local electric power utility performs the disposal of electrical materials. Parts from batches of 15 kV ceramic electrical insulators were used. This dissertation proposed a recycling methodology for an electrical ceramic insulator, which was ground and incorporated into different formulations of triaxial ceramics, producing electrical porcelains, partially and totally replacing quartz and alumina in the formulations. White kaolinitic clay, feldspar and quartz were utilized which are used in the ceramic industry. The resulting formulations were fired at temperatures from 1300°C to 1600°C. Subsequently, technological characterization (mechanical strength, water absorption and linear shrinkage) and the investigation of electrical properties were carried out. The results showed that the formulation with 40% of residue showed lower firing temperature, good mechanical properties and resistivity of 10<sup>11</sup> Ω.cm (evaluated at room temperature); this value is compatible with low voltage insulators. Noteworthy, the lower firing temperature was obtained with the formulation in which 100% of quartz and alumina were replaced. Therefore, the viability for the manufacture of low voltage insulators was proved, substituting natural raw materials through the incorporation of discarded insulators in the insulator manufacturing mass.

Keywords: Ceramic electrical insulators; triaxial porcelain; recycling.



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>16</b>
2.1. OBJETIVO GERAL .....	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	17
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
3.1. CERÂMICA .....	18
3.1.1. SÍLICA .....	18
3.1.2. ARGILAS.....	19
3.1.3. CAULIM .....	19
3.1.4. FELDSPATO.....	19
3.1.5. ALUMINA .....	20
3.1.6. MULITA.....	20
3.2. CARACTERÍSTICAS E MICROESTRUTURA DOS ISOLADORES CERÂMICOS .....	20
3.2.1. MICROESTRUTURA DOS ISOLADORES CERÂMICOS DE PORCELANA.....	21
3.2.2. FASES CRISTALINAS.....	21
3.3. ISOLADORES.....	22
3.3.1. ISOLADORES DE PORCELANA.....	22
3.3.2. COMPOSIÇÃO DE PORCELANAS TRIAXIAIS COMO ISOLADORES.....	24
3.3.3. VANTAGENS DOS ISOLADORES CERÂMICOS.....	27
3.3.4. COMPORTAMENTO DIELÉTRICO DOS ISOLADORES.....	29
3.3.5. CORRENTE DE FUGA .....	30
3.3.6. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE ISOLADORES ELÉTRICOS CERÂMICOS .....	31
3.4. - DEGRADAÇÃO DOS MATERIAIS CERÂMICOS .....	32
3.4.1. DEGRADAÇÃO DOS ISOLADORES ELÉTRICOS .....	33
3.4.2. DESCARTE DOS ISOLADORES ELÉTRICOS .....	34
3.5. SITUAÇÃO DOS ATERROS SANITÁRIOS.....	35
3.6. RECICLAGEM DOS MATERIAIS CERÂMICOS .....	36
3.6.1. POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE PEÇAS CERÂMICAS COM ISOLADORES RECICLADOS .....	37
3.6.2. RECICLAGEM DE ISOLADORES ELÉTRICOS.....	37
3.6.3. FRAGMENTAÇÃO DOS MATERIAIS CERÂMICOS.....	40
3.6.4. PROCESSO DE QUEIMA .....	42
3.7. CARACTERÍSTICAS DIELÉTRICAS .....	42
3.7.1. IMPEDÂNCIA .....	43
3.7.2. CAPACITORES.....	45
3.7.3. CONDUTIVIDADE .....	46

3.7.4. RESISTIVIDADE ELÉTRICA .....	47
3.8. ESTADO DA ARTE.....	49
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>53</b>
4.1. MATERIAIS.....	53
4.2. FORMULAÇÃO .....	56
4.3. MÉTODOS.....	57
4.3.1. PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA.....	57
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>71</b>
5.1. AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE BRITAGEM E MOAGEM DOS ISOLADORES .....	71
5.2. AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DA RETIRADA DO ESMALTE PARA A RECICLAGEM .....	71
5.3. PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DAS PORCELANAS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE QUEIMA .....	73
5.3.1 ABSORÇÃO DE ÁGUA, RETRAÇÃO LINEAR, POROSIDADE APARENTE E DENSIDADE APARENTE .....	73
5.3.2 RESISTÊNCIA MECÂNICA .....	79
5.4. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS DAS PORCELANAS .....	81
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>87</b>
<b>7. SUGESTÃO PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS.....</b>	<b>89</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>90</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.5 - ISOLADORES BT. FONTE: ELETROBRÁS (2014). .....	38
FIGURA 3.8 - A TENSÃO E CORRENTE ESTÃO EM FASE $FP=1$ , $\phi=0$ . .....	44
FIGURA 3.9 - OCORRE A DEFASAGEM ( $\phi$ ) DA TENSÃO COM RELAÇÃO À CORRENTE CARACTERÍSTICA INDUTIVA.....	44
FIGURA 3.10: OCORRE UMA DEFASAGEM ( $\phi$ ) DA CORRENTE COM RELAÇÃO À TENSÃO, CARACTERÍSTICA CAPACITIVA.....	44
FIGURA 3.11 - RELAÇÃO DAS FASES DE UMA PORCELANA COM OS ARCOS DO ESPECTRO DE IMPEDÂNCIA.. .....	49
FIGURA 4.1 - LOTE DE ISOLADORES UTILIZADOS NA PESQUISA ISOLADORES ELÉTRICOS 15 kV.....	53
FIGURA 4.2 – CORPO ISOLADOR 15 kV. ....	54
(-) ELEMENTO NÃO ANALISADO .....	54
FIGURA 4.4 - FLUXOGRAMA DO ESTUDO DE RECICLAGEM DE ISOLADORES USADOS ELÉTRICOS CERÂMICOS. ....	57
FIGURA 4.5 BRITADOR DE MANDÍBULAS (LAPROM-UFRGS).. .....	58
FIGURA 4.6 – RESULTADO DA BRITAGEM NO BRITADOR DE MANDÍBULAS. A: PRIMEIRA PASSAGEM. B: SEGUNDA PASSAGEM.. .....	58
FIGURA 4.7 - PENEIRAÇÃO MALHA 10 (ABERTURA DE 2 MM) (LAPROM-UFRGS).....	59
FIGURA 4.9 - ISOLADOR MOÍDO APÓS MOINHO DE BOLAS. ....	60
FIGURA 4.10 - MISTURA E GRANULAÇÃO DAS MASSAS.....	61
FIGURA 4.11 - PRENSA HIDRÁULICA (LACER – UFRGS). ....	62
FIGURA 4.12 - CORPOS DE PROVA PRENSADOS PARA CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA.. ...	62
FIGURA 4.13 - PRENSA HIDRÁULICA (LABIOMAT – UFRGS). ....	63
FIGURA 4.14 – CORPOS DE PROVA PARA O TESTE DE RESISTIVIDADE. ....	63
FIGURA 4.15: ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO ( - UFRGS). ....	64
FIGURA 4.16: FONTE DE ALTA TENSÃO (LABIOMAT-UFRGS). ....	66
FIGURA 4.17: POTENCIOSTATO (LABIOMAT-UFRGS). FONTE: .....	67
FIGURA 4.18: ELETRODOS PARA O TESTE DE IMPEDÂNCIA (LABIOMAT-UFRGS).....	67
FIGURA 4.19: A) PORTA AMOSTRA E B) FORNO TERMOELÉTRICO PARA O ENSAIO DE ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA (LABIOMAT-UFRGS).....	68
FIGURA 5.1: FORMULAÇÃO A. CURVA DE GRESIFICAÇÃO.....	76
FIGURA 5.2: FORMULAÇÃO B. CURVA DE GRESIFICAÇÃO.....	77

FIGURA 5.3: FORMULAÇÃO C. CURVA DE GRESIFICAÇÃO.....	77
FIGURA 5.3: FORMULAÇÕES A, B E C. DENSIDADE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA. ....	78
FIGURA 5.4: FORMULAÇÕES A, B E C. POROSIDADE APARENTE EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....	79
FIGURA 5.5: FORMULAÇÕES A, B E C. RESISTÊNCIA MECÂNICA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA.....	81
FIGURA 5.6: RESULTADO DO TESTE DE RESISTIVIDADE DAS FORMULAÇÕES A, B, C E CC, ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ). ....	83
FIGURA 5.7: ARCO DE IMPEDÂNCIA DA FORMULAÇÃO A. TESTE EM 550°C. ....	84
FIGURA 5.8: ARCO DE IMPEDÂNCIA DA FORMULAÇÃO B. TESTE EM 550°C. ....	85
FIGURA 5.8: ARCO DE IMPEDÂNCIA DA FORMULAÇÃO C. TESTE EM 550°C. ....	85

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1: COMPARAÇÃO DE ISOLADORES .....	38
TABELA 3.2: COMPOSIÇÃO DOS ISOLADORES ELÉTRICOS DESCARTADOS POR ANO.....	40
TABELA 3.3: ÍNDICE WI PARA UTILIZAÇÃO NA EQUAÇÃO DE BOND.....	41
TABELA 3.4: PROPRIEDADES REQUERIDAS PARA UM ISOLADOR ELÉTRICO.....	48
TABELA 3.5: PROPRIEDADES ELÉTRICAS PARA ISOLADORES.....	48
TABELA 3.6: COMPOSIÇÃO DAS AMOSTRAS.....	50
TABELA 3.7 COMPOSIÇÃO DO VIDRO DE AUTOMÓVEL RECICLADO.....	51
TABELA 3.8 - COMPOSIÇÃO COM A ADIÇÃO DE VIDRO RECICLADO .....	51
TABELA 4.1: COMPOSIÇÃO DO CORPO DOS ISOLADORES ELÉTRICOS. ....	54
TABELA 4.2: COMPOSIÇÃO QUÍMICA POR FRX DAS MATÉRIAS-PRIMAS.....	56
TABELA 5.1: COMPOSIÇÃO DO CORPO DOS ISOLADORES ELÉTRICOS E DE PARTÍCULAS DA SUPERFÍCIE DO CORPO COM O ESMALTE.....	72
TABELA 5.2: ABSORÇÃO DE ÁGUA, RETRAÇÃO LINEAR, POROSIDADE APARENTE E DENSIDADE APARENTE DAS FORMULAÇÕES A, B E C. ....	74
TABELA 5.3: RESISTÊNCIA MECÂNICA DAS FORMULAÇÕES A, B E C.....	80

## 1. INTRODUÇÃO

A crescente industrialização e desenvolvimento tecnológico de muitos países têm gerados diversos benefícios à sociedade, aumentando o bem-estar e o conforto. Em contrapartida, o aumento da produção tem como consequência direta o aumento de resíduos. Se todos esses resíduos não receberem uma correta destinação, podem se tornar um problema de difícil solução para a vida moderna. Por outro lado, cada vez mais, os centros urbanos com grande crescimento populacional têm encontrado dificuldades para encontrar depósitos e aterros que sejam próximos, de modo a não onerar demais o transporte, o que significa um grande desperdício de energia. Assim, a melhor solução é a reciclagem como modo de aumentar o aproveitamento dos materiais, preferencialmente em ciclos fechados de produção.

No descarte dos diversos componentes, com o passar do tempo, diminui-se também a capacidade dos aterros sanitários, ameaçando o ambiente. Com crescente ideia atual de sustentabilidade e conscientização ambiental, a simples eliminação do resíduo não representa uma solução moderna. A reciclagem do resíduo representa uma boa solução por proporcionar um fim racional, diminuindo a utilização dos recursos naturais (SOUZA et al., 2004).

As infraestruturas ligadas ao setor elétrico cada vez mais são construídas para atender à crescente demanda de energia que requer o desenvolvimento do consumo social, bem como o consumo do parque industrial. Consequentemente, tem-se um aumento de materiais ligados ao setor elétrico que necessitam de pesquisa para a reciclagem.

Dentre os diversos materiais e componentes elétricos que com maior frequência são utilizados e descartados estão os isoladores elétricos. A expansão e manutenção do sistema de distribuição de eletricidade têm gerado uma grande quantidade desses materiais, os quais são descartados em vez de reutilizados (MANTOVANI et al., 2013). Estima-se que, no Brasil, a quantidade anual de isoladores elétricos de porcelana seja aproximadamente 25.000 toneladas. Infelizmente, muitas vezes são descartados sem nenhum controle, degradando o meio ambiente (CAMPOS; PAULON, 2015).

Os equipamentos elétricos utilizam materiais que devem em serviço apresentar uma ótima qualidade. Um isolador danificado, lascado ou com certo grau de contaminação pode comprometer as características de proteção do material isolante,

permitindo o aumento da passagem de corrente de fuga entre seus terminais e modificando a resistividade elétrica da superfície. As contaminações são muitas vezes consequência da poluição atmosférica (PORTELLA et al., 2008; CABUSSU et al., 2008). Com o aumento da poluição, espera-se a diminuição da vida útil dos isoladores e aumento do descarte.

Para atender aos princípios de sustentabilidade, as empresas passaram a expressar sua preocupação com o planeta por meio da implantação de programas corporativos, envolvendo a questão ambiental. Reciclar significa transformar materiais usados em matérias-primas para os mesmos produtos ou para novos itens. Com a reciclagem surgem novas oportunidades de negócios, e pode ser um meio de sustento para muitos trabalhadores. De forma mais ampla, essa nova ideologia pode gerar bons resultados, oferecendo um retorno sobre os investimentos dos equipamentos e infraestruturas ligadas à reciclagem (DA CRUZ; MARQUES, 2008). Geralmente, nas concessionárias de energia elétrica, os materiais elétricos descartados, após a sua vida útil, são leiloados. Outra fonte de resíduos de materiais elétricos, como os isoladores, é a demolição de redes antigas.

Na fabricação dos isoladores elétricos de porcelana, geralmente, são utilizados como principais matérias-primas o caulim, a argila, o quartzo e o feldspato. Esses insumos minerais podem ser economizados com a reciclagem de isoladores (SOUZA SANTOS, 1989).

No presente trabalho, investiga-se a incorporação de isoladores de porcelana usados, por meio da sua britagem e moagem, na massa para produção de produtos do triaxial cerâmico. Inicialmente estuda-se a moagem e a dosagem na formulação. Posteriormente, corpos de prova são conformados por prensagem, avaliando-se as propriedades de queima e gresificação. O potencial de aplicação à produção de isoladores novos é aferido estudando-se as propriedades elétricas das peças produzidas em laboratório.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GERAL**

O trabalho tem o objetivo de buscar uma alternativa sustentável de reciclagem para os isoladores elétricos de porcelana descartados após a sua vida útil. Para tanto,

foram produzidas peças cerâmicas a partir de massas cerâmicas incorporando os resíduos desses isoladores elétricos, avaliando-se a moagem, a composição de uma formulação de porcelana, a conformação, a queima e as propriedades tecnológicas e elétricas.

## 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar as propriedades elétricas e mecânicas das peças produzidas, comparando os valores de resistividade e resistência mecânica de isoladores comerciais, por meio de corpos de prova.

Buscar uma alternativa para reciclagem dos isoladores elétricos, em vez do descarte do material em aterros.

Avaliar as propriedades de britagem e moagem dos isoladores, investigando-se a necessidade de separação do esmalte do corpo.

Estudar a qualidade e o potencial dos isoladores como matéria-prima para a produção de cerâmicas triaxiais, incluindo a influência do esmalte na reciclagem.

Testar o reuso dos isoladores elétricos descartados na produção de isoladores de porcelana de baixa tensão.



### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. CERÂMICA

Os materiais cerâmicos são materiais inorgânicos e não metálicos. Dos materiais mais comuns que são produzidos em grande quantidade, pode-se citar as cerâmicas vermelhas e as brancas, o cimento e o vidro. Esses tipos de materiais são, em algum grau, isolantes à passagem de eletricidade e de calor. Mecanicamente, são compostos duros, de elevada resistência mecânica, porém frágeis. Os materiais cerâmicos com relação à tecnologia utilizada, podem ser separados em dois grupos:

- Cerâmicas tradicionais. Fazem parte os silicatos, as argilas, as porcelanas e os vidros.
- Cerâmicas avançadas. Correspondem a materiais de alta performance, como biomateriais, materiais automotivos, fibras óticas, ferramentas de corte, entre outros.

A definição mais conhecida sobre “cerâmica” é a de Kingery (1976) “A arte e a ciência de fazer e usar artigos sólidos, que têm como componente essencial e são compostos, em grande parte, por materiais inorgânicos não metálicos”.

A base dos materiais cerâmicos tradicionais são os silicatos, que derivam de matérias-primas abundantes e baratas. A grande disponibilidade dessa classe de material é uma importante vantagem sobre diversos outros. Esses cerâmicos encontram aplicação na fabricação de tijolos, porcelanas, azulejos e refratários, entre outros. Dentre os diversos materiais e suas aplicações, podemos destacar também, os isoladores elétricos (NORTON, 1987). As principais matérias-primas utilizadas na produção de isoladores elétricos de porcelana são a sílica, a argila, o quartzo, o feldspato, a alumina e o caulim. A seguir, será descrita uma breve abordagem sobre cada uma dessas matérias primas.

##### 3.1.1. Sílica

O dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) apresenta-se na forma amorfa e cristalina. As três formas polimorfas principais da sílica cristalina são: o quartzo, a tridimita e a cristobalita.

O quartzo é o tipo mais abundante de polimorfo de sílica e predomina em temperatura ambiente. É o componente principal dos vidros e um dos principais das

cerâmicas vermelhas e brancas. A principal matéria-prima utilizada na indústria é a areia quartzosa, a qual deve ser beneficiada para uso em porcelanas (SINTON, 2006).

### 3.1.2. Argilas

As argilas são a matéria-prima principal das cerâmicas tradicionais. Os argilominerais são compostos de partículas cristalinas pequenas, sendo as de menores diâmetros, geralmente, inferiores a 2  $\mu\text{m}$ . Quando misturadas com água adquirem certa plasticidade, o que explica a sua facilidade de conformação (SANTOS 1989). Em temperaturas acima de 1000°C adquirem resistência mecânica considerável. A microestrutura final irá conter cristais de mullita, quartzo e a fase vítrea. Devido às impurezas nas argilas, em geral, superior em argilas bem plásticas, sua quantidade é limitada para porcelanas.

### 3.1.3. Caulim

Os caulins são argilas bem puras, nas quais predomina o mineral caulinita, sendo de cores bem brancas devido ao baixo teor dos óxidos de ferro e de titânio. São empregados em grande quantidade na produção de porcelana elétrica. Para melhorar a plasticidade do caulim é necessária a adição de pequenas quantidades de argila plástica (entre 5 e 10%) para conferir a trabalhabilidade à massa, em geral, baixando a temperatura de sinterização (FIGUEIREDO et al., 2018). No Brasil, o maior uso dos caulins é nas cerâmicas, indústrias químicas em geral, indústria de papel e indústrias de tintas, de borrachas, de plásticos, etc. (SANTOS 1989).

### 3.1.4. Feldspato

O feldspato é uma das principais matérias-primas das porcelanas, atuando como fundente, pois seu ponto de fusão é menor do que dos outros componentes, auxiliando na formação da fase vítrea dos corpos. A fase vítrea propicia o fechamento da porosidade, geralmente, constituindo 50% ou mais da microestrutura final (NORTON, 1987).

### 3.1.5. Alumina

O óxido de alumínio  $Al_2O_3$  é utilizado em materiais de engenharia e cerâmicas tradicionais. A  $Al_2O_3$  tem um ponto de fusão alto de  $2050^\circ C$ , de modo que é muito utilizado como material refratário.

Na fabricação dos isoladores elétricos, existem três classes que variam na composição dos isoladores cerâmicos com relação à alumina, conforme a Norma IEC 60672-3:

C 110 – 33% a 35% de alumina;

C 120 – 44% a 47% de alumina;

C 130 – 57% a 63% de alumina.

A base C 130 contém um maior teor de alumina conseqüentemente, possui uma grande resistência mecânica, sendo utilizada em isoladores de grande porte. A classe C 110 e C 120 são utilizadas em isoladores de pequeno e médio porte (BONETTI, 2009).

### 3.1.6. Mulita

A mulita ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ) é um alumino-silicato de grande importância tecnológica. Corresponde a 71,8% de  $Al_2O_3$  e 28,2% de  $SiO_2$ . Possui alto ponto de fusão ( $1830^\circ C$ ), elevado módulo de ruptura, resistência ao choque térmico, ao ataque químico e à erosão. É uma das principais fases encontrada em uma porcelana elétrica de alta qualidade (MEDEIROS et al., 2016). As adições de alumina aumentam a quantidade de mulita no produto final.

## 3.2. CARACTERÍSTICAS E MICROESTRUTURA DOS ISOLADORES CERÂMICOS

Nos materiais cerâmicos, alguns fatores são prejudiciais às propriedades mecânicas de uma peça, como as trincas e a porosidade. A resistência mecânica é inversamente proporcional ao tamanho de defeito crítico, podendo ser esse um poro. Por outro lado, a porosidade é útil em aplicações como isolante térmico para altas temperaturas, pois possuem pouca capacidade de transmissão de calor. No entanto, a formação de trincas é de difícil controle. A diferença no coeficiente de expansão térmica entre a matriz e as fases cristalinas (como o quartzo) é um dos fatores mais comuns para o surgimento das trincas em porcelanas. As trincas têm influência

negativa na resistência à fratura mecânica (SCHÜLLER, 1979). O comportamento de absorção d'água e as possíveis relações com a porosidade dependem da composição química e da temperatura de queima do corpo cerâmico (MENEZES et al., 2006).

### 3.2.1. *Microestrutura dos Isoladores Cerâmicos de Porcelana*

Um material cerâmico, como uma porcelana, contém partículas formadas por muitos cristais de várias orientações cristalográficas. Quando são cristais individuais, são chamados de grãos. A outra fase que define a estrutura é uma fase amorfa constituída de silicatos, por isso, denominada fase vítrea.

As propriedades finais dos materiais cerâmicos são fortemente afetadas pelo tipo de microestrutura apresentado e pela presença dos defeitos. Em geral, as imperfeições, como os poros, influenciam muitas das características dos materiais, como a resistência mecânica e as propriedades químicas e elétricas (VAN VLACK, 1974). O tamanho de grão também influencia nas características mecânicas das peças cerâmicas, tanto na formação de trincas, como na facilidade de acomodação de tensões. A presença de defeitos e o tipo de microestrutura apresentada pelos materiais cerâmicos são controlados em grande parte, pela rota de processamento utilizada (TROMBINI et al., 2011).

Outro fator que tem influência direta na resistência mecânica das porcelanas, principalmente na sua microestrutura, são as fases cristalinas e a composição química. Dependendo de sua composição química e da porosidade do material, pode haver também uma grande variação na condutividade térmica e refratariedade dos materiais (ARCARO et al. 2006).

### 3.2.2. *Fases Cristalinas*

As principais fases cristalinas de uma porcelana comum são o quartzo e a mulita (SCHÜLLER, 1979). As porcelanas aluminosas possuem ainda a alumina (ou coríndon). Essas fases cristalinas são de imensa importância para a resistência mecânica da cerâmica e sua quantidade varia de acordo com a composição da batelada e a temperatura de queima.

Basicamente, a constituição dos isoladores corresponde a  $(\text{SiO}_2)$  e  $(\text{Al}_2\text{O}_3)$  (MANTOVANI et al., 2013). Constatou-se através de avaliações de amostras utilizando SEM-EDS que um isolador cerâmico usado apresenta em sua constituição

química, uma percentagem em massa de 38,2% de oxigênio, 0,6% de sódio, 15,4% de alumínio, 33,1% de silício, 3,6% de potássio, 1,3% de cálcio e nenhum valor de ferro.

### 3.3. ISOLADORES

Os isoladores de alta e baixa tensão são dispositivos que têm a função de fornecer suporte mecânico para os condutores elétricos e mantê-los isolados do aterramento da estrutura de suporte e de outras partes condutoras. O isolador também separa de forma segura as partes de elevado potencial, como as linhas de transmissão, de partes com potencial inferior. Quando ocorre o rompimento dielétrico, surge o curto circuito na rede e, caso o isolador estiver danificado, o sistema pode gerar perdas elétricas com risco de acidentes (MARTINS, 2015). Na fabricação dos isoladores elétricos de alta tensão são utilizadas as chamadas porcelanas aluminosas formadas por alumina, feldspato e caulim (argila). Essas porcelanas possuem propriedades dielétricas adequadas e propriedades mecânicas superiores às das porcelanas que utilizam o quartzo. As porcelanas quartzosas são empregadas como isoladores de baixa tensão (CHINELATTO, SOUZA, 2004). Outros tipos de isolador utilizados são os de vitrocerâmicos e os poliméricos. Esses vêm aumentando consideravelmente sua utilização e serão abordados posteriormente no presente trabalho.

#### 3.3.1. *Isoladores de Porcelana*

As porcelanas apresentam um bom desempenho na infraestrutura de transmissão da energia elétrica com propriedades adequadas em grandes distâncias e são excelentes dielétricos com uma boa resistência superficial às intempéries. Elas podem suportar uma considerável tensão de arco elétrico, sendo estável e inerte sem se degradar nem comprometer a superfície, mesmo em ocorrência de altas descargas.

O isolador de porcelana é a forma de isolamento elétrica mais utilizada no sistema de distribuição e transmissão de energia (PORTELLA et al. 2008; CABUSSÚ et al., 2008). Os isoladores elétricos cerâmicos possuem recobrimento de uma camada fina e contínua de esmalte vítreo que contribui para a melhoria das propriedades mecânicas e elétricas (CHINELATTO; SOUZA, 2004). O isolador deve suportar as

tensões elétricas e mecânicas dos condutores. O processo de manutenção das redes elétricas é bem frequente, pois os materiais devem estar em perfeitas condições de uso. A disposição desse equipamento quando está em serviço deve ser verificada periodicamente. Um exemplo de isolador é mostrado na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Isolador de Porcelana 25 kV. Fonte: O autor (2019).

Os tipos de isoladores utilizados pelas concessionárias são:

- Isolador tipo roldana.
- Isolador tipo bucha de passagem.
- Isolador tipo castanha.
- Isolador tipo suporte.
- Isolador tipo bucha para chave fusível.
- Isolador tipo bucha trafo.
- Isolador tipo pilar.
- Isolador de ancoragem tipo bastão polimérico.
- Isolador de alta tensão.
- Isolador tipo suspensão.
- Isolador suporte tipo pino.

Os materiais de porcelana que são a base dos isoladores consistem em um corpo denso com uma elevada rigidez dielétrica, com uma camada de esmalte que auxilia no isolamento elétrico. O esmalte tem também o objetivo de eliminar a superfície porosa e rugosa do corpo cerâmico, sendo uma prevenção para que a água não seja introduzida na superfície nos poros. Entretanto, a acumulação de pó e sujeira pode aumentar a condutividade, levando à diminuição das propriedades

dielétricas, conseqüentemente, ocorrem as quedas no fornecimento de energia elétrica (SU et al., 2010; PORTELLA et al., 2007). A ausência de alcalinos e a eliminação de óxidos de Fe e Ti, melhoram a resistência dielétrica (ROULA et al., 2009).

As principais propriedades elétricas são: a resistividade, que corresponde ao grau de oposição que o material oferece à passagem de corrente elétrica, e a rigidez dielétrica, que corresponde à propriedade do material de se opor à descarga elétrica através de sua estrutura. No teste de resistividade, o material permanece intacto, mas no teste de rigidez dielétrica, danifica-se a integridade estrutural da peça (SARAIVA,1988).

Os isoladores elétricos podem falhar quando submetidos a altas voltagens, sendo um fenômeno de superfície. Eles são projetados de modo a ter uma maior área de superfície, para diminuir a possibilidade de um possível curto circuito. Para que a superfície não absorva água, ela é esmaltada (VAN VLACK; HALL, 1970). Como os isoladores elétricos são utilizados nas linhas de transmissão, transformadores e outros equipamentos, requerem inspeção, diagnóstico e manutenção contínua (SIERRA et al., 2013). Uma inspeção adequada nos isoladores elétricos é a única maneira de diminuir a probabilidade de falha e, conseqüentemente, de falta de energia elétrica na rede (ACOSTA-URREGO, 2013).

### 3.3.2. *Composição de Porcelanas Triaxiais como Isoladores*

As matérias-primas utilizadas na fabricação de porcelanas triaxiais são a argila (caulim), o feldspato, o quartzo ou a alumina. A elevada área superficial da argila combinada com a morfologia de suas partículas, placas laminares, fornece a plasticidade à massa. A argila deve ser caulínica e pura, a fim de fornecer principalmente a caulinita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), que durante a queima, irá se decompor e formar cristais de mulita. Muitas composições utilizam o caulim por sua pureza, ao invés de argila, como fonte de caulinita. Entretanto, por vezes, os caulins não fornecem todo grau de plasticidade requerida à massa, sendo necessárias pequenas quantidades de argila plástica para conferir trabalhabilidade à massa e aumentar a resistência mecânica a verde (CHINELATTO et al., 2004).

A função do feldspato na composição das porcelanas triaxiais é atuar como fundente viabilizando a sinterização via fase líquida. Os feldspatos normalmente usados em cerâmicas são os feldspatos potássicos ( $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ) e os feldspatos

sódicos ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ). O feldspato potássico, geralmente é o fundente mais utilizado nas porcelanas, pois, ao fundir, gera um líquido com uma maior viscosidade do que o feldspato sódico (VINCENZINI, 1991), propiciando uma maior resistência à deformação piropiástica.

O quartzo e/ou a alumina formam a estrutura mais refratária da peça, diminuindo a retração de secagem e de queima. Nesse tipo de porcelana (triaxial), o quartzo é substituído pela alumina, para utilização em altas tensões, devido às propriedades dielétricas e mecânicas superiores das porcelanas aluminosas em relação às porcelanas de quartzo (CHINELATTO, 2004). O acréscimo de 20% de alumina melhora as propriedades mecânicas sem afetar a retração de queima no ciclo de queima. O quartzo em temperatura abaixo de  $1250^\circ\text{C}$  é insolúvel (IQBAL, 2000). Em  $1400^\circ\text{C}$ , pode ocorrer a dissolução quase completa do quartzo (CHEN et al., 2004). Em maiores temperaturas, a mulita primária se transforma em mulita secundária. A mulita primária é formada a partir da decomposição da argila, e a mulita secundária é formada no feldspato fundido (BONETTI, 2009).

Na mudança de fase de quartzo  $\beta \rightarrow \alpha$ , conhecida por gerar trincas no produto, a substituição do quartzo por alumina é vantajosa, por não apresentar essa transição de fase no resfriamento e, assim, não comprometer a resistência mecânica da peça. Durante o resfriamento (aproximadamente  $573^\circ\text{C}$ ), a transformação do quartzo  $\beta \rightarrow \alpha$ , resulta em uma diminuição de 2% no volume de grãos de quartzo, produzindo tensões suficientes para trincar a matriz ou o próprio grão (CARTY, 1998; VINCENZINI, 1991). Contudo, o preço elevado da alumina e o aumento da temperatura no processo, torna-se uma desvantagem devido ao aumento do custo da porcelana (CARTY, 1998). A utilização da bauxita ao invés da alumina representa uma boa alternativa para minimizar os custos de produção (CHINELATTO, 2004).

Dentre as propriedades conferidas por cada matéria-prima nas porcelanas triaxiais, pode-se destacar:

- Refratariedade: quartzo e alumina.
- Plasticidade: argila e caulim.
- Fundência: feldspato, nefelina.

O resultado final da sinterização de uma porcelana triaxial consiste em grãos de quartzo ou alumina misturados a finos cristais de mulita envolvidos por uma matriz vítrea. São as propriedades de cada fase que vão determinar a qualidade do produto (CHINELATTO et al., 2004).



Diversos autores propuseram formulações específicas para isoladores elétricos cerâmicos, dependendo de cada situação, com relação a benefícios ambientais, tensão de trabalho e resistência mecânica.

Chaudhuri (1999) demonstrou que o aumento na quantidade ou no tamanho dos cristais de mulita, diminui a resistividade elétrica da porcelana. O aumento da condutividade elétrica associado com o aumento da quantidade de mulita é atribuído à presença de vacâncias de oxigênio na mulita, de maneira que a peça se transforma em um condutor iônico.

De acordo com Liebermann (2001), é vantajoso utilizar alumina ao invés de quartzo em isoladores elétricos devido ao significativo aumento da resistência mecânica. Para se obter uma microestrutura mecanicamente forte e estável, o teor de mulita deve ser menor ou igual a 15%, o de alumina  $\alpha$  maior ou igual a 40%, o de fase vítrea de aproximadamente 45% e o de quartzo residual menor que 1%. A microestrutura deve estar livre de heterogeneidades, com máxima quantidade de fase cristalina interconectada (CHINELATTO et al., 2004).

Buchanan (1986) apresenta um estudo para uma faixa de composição de porcelanas silicosas, com a quantidade de feldspato variando entre 20% e 30%. Essas composições são sinterizadas entre 1250°C e 1320°C e apresentam constante dielétrica entre 5,5 e 7 e tangente ( $\alpha$ ) de 0,005.

A alumina permanece inerte durante a sinterização, tendo uma taxa de dissolução no vidro feldspático muito baixa até temperaturas de 1450°C (TAKEI et al., 2001; CARTY, 1998).

Norton (1988) sugere que para isoladores de alta tensão, o ideal é porcelanas aluminosas com 15% de caulim, 20% de argila, 25% de feldspato e 40% de alumina para uma porcelana de alta alumina. Para uma porcelana com baixo teor de alumina é recomendado 20% de caulim, 25% de argila, 35% de feldspato e 20% de alumina, o que é indicado para isoladores de média e baixa tensão. Kobayashi *et al.* (1994) estudaram várias composições de porcelanas aluminosas, com teor de alumina variando de 0 a 50%. A tensão de ruptura cresceu significativamente com o aumento de alumina, sendo obtidos corpos de prova de maior resistência com 50% de alumina.

Orlova (1988) demonstrou em sua pesquisa que o tamanho e forma dos cristais de alumina têm significativo efeito na propriedade das porcelanas. O autor sugere que para se obter porcelanas com um bom desempenho mecânico, o tamanho das partículas de alumina não deve exceder 3  $\mu\text{m}$  e devem estar bem dispersos na matriz.

O módulo de ruptura também depende da quantidade de mulita, além da porosidade e do tamanho de partículas de alumina. Foi estudado que a quantidade de mulita aumenta continuamente até 1350°C e o tamanho médio de partículas de alumina não varia entre 1300°C e 1350°C. O quartzo é significativamente dissolvido na temperatura de 1300°C. Assim, o principal fator a influenciar no comportamento do módulo de ruptura é a variação da composição da fase vítrea ou a variação da porosidade. Até 1350°C ocorre a redução da porosidade e aumento do módulo de ruptura, a partir dessa temperatura pode iniciar o surgimento de poros devido ao início da “sobre queima” provocando a redução do módulo de ruptura, conforme os experimentos de Chinelatto (2004).

Nos estudos de Mamede (2005), elevando-se o teor de quartzo em uma composição triaxial, obtém-se um isolador mais resistente às altas temperaturas, com maior resistência mecânica e menor rigidez dielétrica. Elevando-se a percentagem de caulim e argila, obtém-se um isolador mais resistente aos choques térmicos, porém com menor rigidez dielétrica.

### 3.3.3. Vantagens dos Isoladores Cerâmicos

Os isoladores cerâmicos levam algumas vantagens sobre os poliméricos, pois as porcelanas são um excelente isolante com resistências dielétricas adequadas. A porcelana é inerte e estável às intempéries, suportando quantidades de arco elétrico sem degradação comprometedora (LIMA, 2006). Quanto aos poliméricos, as principais desvantagens são: baixa resistência ao calor, reduzida resistência à torção, vulnerabilidade a óleo e solventes e alterações superficiais devido ao envelhecimento. Em contrapartida, as principais vantagens são a leveza (permitindo o uso de estruturas mais econômicas) e a maior tenacidade à fratura (PINHEIRO, 2008).

Uns dos grandes fatores de ocorrência de *flashover* (“curto circuito”, centelha ou arco, a partir da corrente de fuga) são os ambientes salinos. Outro fator é a contaminação biológica a qual pode afetar os isoladores cerâmicos. Nessas ocorrências é fundamental a otimização da formulação do esmalte a ser utilizada. No caso de isoladores poliméricos, é muito importante a seleção do tipo de resina a ser empregada. A contaminação biológica pode ser observada no isolador polimérico na Figura 3.2. Outras contaminações similares a fungos/mofo podem ser observadas na Figura 3.3.



Figura 3.2 - Contaminação Biológica em Isolador Polimérico. Fonte: (YANG *et al.*, 2017).



Figura 3.3: Isolador Proveniente de uma Caçamba de RCD demonstra Índícios de Contaminação. Fonte: Fonte: O autor (2019).

Diversos ensaios demonstram que os isoladores elétricos cerâmicos e poliméricos podem ter o seu desempenho elétrico comprometido. Estudos realizados com a alga *Chlorella Vulgares* demonstraram que isoladores elétricos cerâmicos do tipo ANSI 55-2 e ANSI 52-1, utilizados no sistema de distribuição de energia na Colômbia, reduziram a tensão em até 12%. O desempenho do isolador elétrico afetado por bactérias pode influenciar as ocorrências de *flashover* em condições de alta umidade, alta temperatura, intensiva radiação e falta de manutenção periódica (ROJAS *et al.*, 2015). A biocontaminação de isoladores elétricos cerâmicos e

poliméricos ocorre em diversas partes de mundo, sendo mais evidente na região tropical (COWAR & HOOLE, 1988; FERNANDO & GUBANSKI, 2000), sendo que a degradação biológica é causada por microrganismos por meio do ar (ROJAS et al., 2015). Em serviço, os isoladores cerâmicos podem alcançar até 15 anos, e a vida útil dos não cerâmicos varia de 3 a 10 anos de uso.

Os isoladores poliméricos são mais susceptíveis à ocorrência de *flashover* por acumularem mais a poluição, do que os de porcelana. Por outro lado, os isoladores poliméricos têm menor peso, maior hidrofobicidade e são menos susceptíveis a danos por tiros e vandalismo.

#### 3.3.4. Comportamento Dielétrico dos Isoladores

Em geral, as porcelanas cerâmicas devem ter uma quantidade de fase vítrea suficiente para fechar toda a porosidade (CHO, 2001). Segundo Sangawar (2006), a porosidade prejudica as propriedades cerâmicas para aplicações elétricas. Para melhorar os resultados no comportamento dielétrico, pode-se adicionar  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  (até 2%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em uma formulação. O tamanho dos poros e o desenho do isolador também influem sobre os resultados (GERSON, 1989). Quanto menores forem os poros (fechados), maior será a robustez mecânica do dielétrico.

O feldspato potássico como principal fundente melhora o comportamento dielétrico da porcelana, aumentando a rigidez dielétrica (QUEIRÓS, 2013). A ruptura dielétrica está relacionada com as condições de medida, tamanho da amostra e falhas do material (PIVA, 2014). Em estudos realizados com relação à capacidade do isolador (Amih, 2005), obteve-se uma resistência dielétrica de 26 kV com a formulação de 10% de argila, 30% de caulim, 22% de feldspato e 38% de quartzo.

Para altas tensões são utilizadas as porcelanas aluminosas nos isoladores elétricos por apresentarem excelentes propriedades físicas, mecânicas e elétricas. Para os isoladores de baixa tensão BT, as especificações técnicas são mais tolerantes, pois geralmente trabalham com tensões nominais inferiores a 1000V, podendo-se utilizar menores teores de alumina. A moldagem plástica desse tipo de isolador elétrico ocorre por meio da extrusão, seguida do torneamento (SOUSA, et al., 2004).

### 3.3.5. Corrente de Fuga

Um das causas de interrupções na rede, e de desperdício de energia nas linhas de transmissão, são as correntes de fuga nos isoladores, as quais são intensificadas em ambientes sob poluição industrial ou com atmosfera muito salina. Uma desvantagem é o caso de os isoladores que têm superfícies constituídas de óxidos metálicos que possuem alta energia ou alta mobilidade iônica.

Os processos naturais de umidificação das superfícies dos isoladores elétricos, empregados para o uso externo, produzem uma elevada condução de corrente elétrica com a diminuição da resistividade superficial do material dielétrico (PINHEIRO, 2008). Essa característica pode ocasionar a formação de uma película de água e, se for contínua, é capaz de conduzir corrente e fechar um arco (*flashover*), Figura 3.4. Esse problema vem se agravando com o aumento da poluição ambiental e a crescente concentração das indústrias (FONTANELLA et al., 2008).

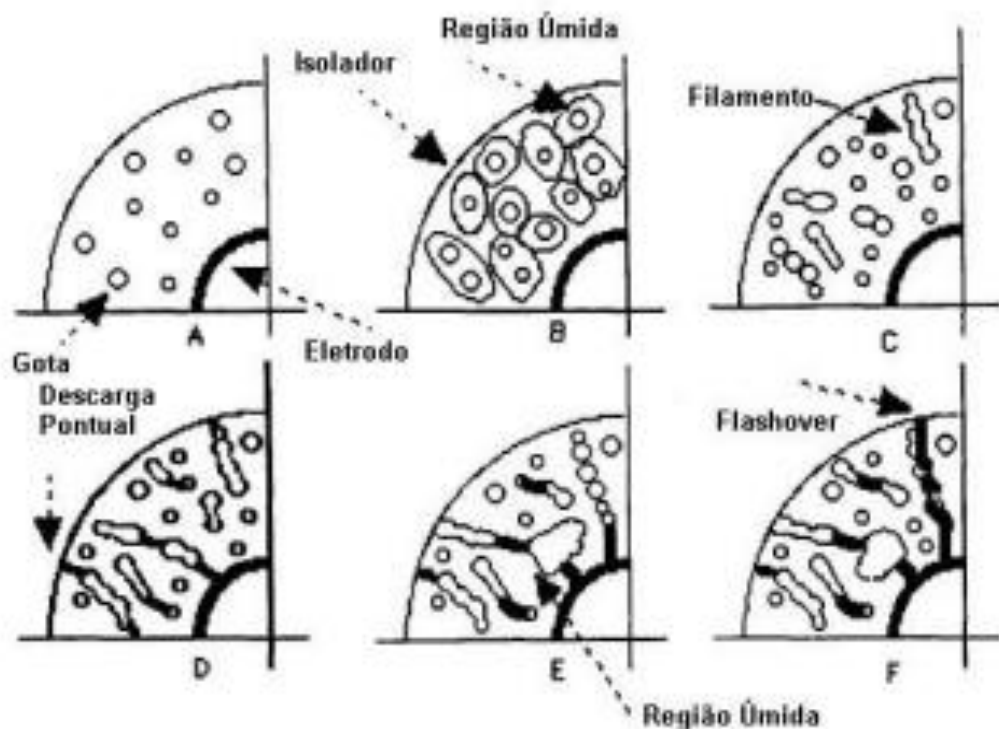


Figura 3.4: Formação de Flashover em um Isolador Elétrico. Fonte: (KARADY, 1995)

Com relação à contaminação, a região e o meio também influenciam a instalação elétrica, como fontes poluentes e ambientes salinos. Durante a

manutenção, atualmente, são utilizados jatos de água para eliminar a poluição na superfície do material. Alguns autores não a consideram uma boa técnica, pois depende também do design do material (PORTELLA et al., 2007).

No setor elétrico, a manutenção da integridade do isolador é de grande importância, pois corresponde a 10% dos custos diretos de uma linha de transmissão e, indiretamente, podem causar prejuízos como na interrupção no fornecimento de energia ou “apagões” (PORTELLA et al. 2008; CABUSSÚ et al., 2008).

### 3.3.6. *Processo de Fabricação de Isoladores Elétricos Cerâmicos*

No processo de fabricação dos isoladores elétricos utilizados no transporte de energia, a conformação ocorre através da moldagem plástica, através da extrusão de um cilindro e o uso de torneamento, pois se trata de peças radiais simétricas, para a usinagem dos anéis. Após a conformação, ocorre a secagem cuidadosa das peças, evitando-se nessa etapa o aparecimento de trincas irreversíveis nas peças moldadas (KHALFL; BLANCHART, 1999). Em seguida, as peças são queimadas em fornos que podem chegar a temperaturas de 1300°C a 1500°C.

Na fabricação de isoladores pequenos, utiliza-se a colagem de suspensões em moldes de gesso ou a prensagem, seguida de um acabamento por usinagem, para se eliminar os defeitos e retificar as dimensões (TEJADA; PLEE, 2016). Em seguida, é realizado a esmaltação por imersão ou “spray” e por último o tratamento térmico a 1270-1280°C durante 12 horas. Esse procedimento, por exemplo, é utilizado na fabricação de isoladores na faixa de 25 kV (seco) e 12 kV (úmido), segundo a Norma ANSI 29.1 (2018).

Na fabricação industrial em grande escala do isolador elétrico, os componentes são moídos e misturados em moinhos rotativos horizontais de grande diâmetro, adicionando água na proporção adequada. É colocada também no interior do cilindro os corpos moedores, cuja finalidade é homogeneizar a massa e triturar dos componentes, com a rotação do cilindro por volta de 30 horas. O produto final é levado a reservatórios apropriados, sendo retidas as partículas de ferro através de separadores magnéticos (MAMEDE, 2005).

Na fabricação das peças, podem surgir leves fissuras antes da esmaltação. Deve-se levar em consideração a magnitude das trincas, pois se esmalte não for suficiente para cobrir as fissuras (em profundidade), a resistência elétrica pode ser comprometida (PAWLOWSKI, 1988). Uma das maneiras de se evitar as fissuras é

dimensionar e ajustar a peça por usinagem e reajustar as formas (Norma ANSI, 2818). O controle da plasticidade é essencial para se alcançar baixo tempo de processamento e boas condições de fabricação.

Recobrimentos poliméricos de acrílico, poliéster, poliuretano e silicone já foram aplicados sobre substratos porcelânicos em isoladores elétricos, por deposição ou por meio de pistola de pulverização (FONTANELLA et al., 2008). A principal função é aumentar a hidrofobicidade.

A presença de aglomerados de pós cerâmicos é fonte conhecida da heterogeneidade e defeitos nos produtos finais, prejudicando a sua sinterização. Assim, o controle de todas as etapas do processamento é necessário para a obtenção de corpos cerâmicos livres de aglomerados, de impurezas e de poros grandes, afim de ser obter uma microestrutura homogênea. Isso começa na seleção de matérias-primas puras, moagem eficiente, etapas de peneiramento e remoção de magnética de impurezas metálicas. Na formação de aglomerados, a força de van der Waals é a causa inicial da adesão das partículas, sendo muito pronunciada em partículas com alta área superficial específica (TROMBINI et al. 2011) Assim, é essencial o uso de dispersantes adequados ao processamento.

### 3.4. - DEGRADAÇÃO DOS MATERIAIS CERÂMICOS

A maioria dos materiais usados na engenharia experimenta algum tipo de interação com diversos ambientes. Em muitos casos, tal interação enfraquece as características de utilização do material, como resultado da deterioração de suas propriedades físicas, mecânicas e sua aparência. Esse comportamento de decomposição dos materiais pode causar consequências bastante adversas. Os materiais utilizados em exposição ao ar livre estão também em contato com vapor d'água. Da ação do oxigênio, da umidade e da poluição, decorrem os principais problemas no processo de degradação dos materiais.

O desgaste geralmente é uma forma física de degradação do material, definida como a remoção do material da superfície por causa da ação mecânica (SHACKELFORD, 2008).

- O desgaste abrasivo ocorre quando uma superfície rugosa, dura, desliza sobre uma superfície mais lisa. O resultado é uma série de sulcos no material liso e a formação de partículas de desgaste.

- O desgaste corrosivo ocorre com o deslizamento em um ambiente corrosivo, acrescentada a degradação química aos efeitos físicos do desgaste. A ação de deslizamento pode romper as camadas de passividade e manter uma alta taxa de corrosão (comuns em metais).

A temperatura é um dos fatores mais preponderantes no processo de envelhecimento dos dielétricos poliméricos (LUNA, 2006). É difícil ocorrer a corrosão em cerâmicos, devido à alta resistividade elétrica. Os cerâmicos são resistentes às reações ambientais, embora os mecanismos não sejam significativos, algumas reações indiretas podem limitar o uso desses materiais.

#### 3.4.1. Degradação dos Isoladores Elétricos

Diversos fatores podem contribuir para a degradação e redução da vida útil dos isoladores elétricos, pode-se citar:

- Trincas causadas por fadiga térmica.
- Infiltrações em cerâmicas porosas ou falhas causadas por tensão elétrica.
- Aumento da carga mecânica.
- Efeitos da corrosão.
- Descargas devido à poluição.

Dentre diversos fatores, o surgimento de arcos voltaicos é o que mais contribui para a degradação. Ocorre principalmente pela deposição de contaminantes através da poluição aérea, névoa salina e formação de eletrólito com a dissolução de sais, diminuindo a resistência elétrica (PINHEIRO 2008).

Diversos materiais orgânicos e inorgânicos são avaliados em relação às propriedades da superfície do isolador cerâmico. O silicone está entre os materiais orgânicos mais testados, entretanto, a degradação e a erosão é um dos principais motivos que limita o tempo de vida útil do material (MEYER et al., 2005). Peças revestidas com silicone apresentam relativamente menor resistência ao desgaste. Os recobrimentos de poliéster e poliuretano apresentam maior resistência. O silicone apresenta um melhor desempenho frente à ação na atmosfera salina, seguido pelo acrílico, mas os recobrimentos com poliéster e poliuretano apresentam um menor desempenho de proteção. O esmalte cerâmico é o que apresenta um melhor recobrimento (FONTANELLA *et al.*, 2008).



Em um isolador elétrico usado, devido à exposição do material às intempéries, observam-se muitos poros atribuídos por processos de fratura. É o que o diferencia de um material novo, pelas suas mudanças na superfície.

No setor elétrico, ocorre a necessidade de diminuir as perdas na transmissão de energia elétrica: o objetivo é se desenvolver isoladores que tenham um melhor desempenho sob as condições ambientais, reduzindo os prejuízos às empresas e concessionárias de energia elétrica. Essas podem sofrer muitos prejuízos com deterioração dos isoladores, aumentando a frequência de manutenção, chegando às paradas na distribuição de energia, com prejuízo aos seus clientes (FONTANELLA et al., 2008).

Além das trincas originadas em serviço, como explicadas anteriormente, algumas são oriundas da fabricação. Existem muitos fenômenos mecânicos que podem afetar a estrutura do material cerâmico gerando trincas. Esses defeitos limitam a capacidade da cerâmica de suportar a tensão de tração, pois a trinca concentra/amplia de forma localizada a tensão aplicada.

Em materiais frágeis, a trinca ou defeito crítico é denominada de trinca de Griffith. O desenvolvimento de processos de fabricação que minimizem o tamanho de defeito é fundamental para o aumento da resistência das cerâmicas. As trincas são mais perigosas em tensões trativas, pois essas tensões tendem a abrir a trinca. As cerâmicas apresentam uma resistência à compressão cerca de 10 vezes superior à tração (ou flexão) (ASKELAND; WRIGHT, 2014).

A presença de poros grandes degrada as propriedades mecânicas de cerâmicas densas, já que os poros concentram as tensões e facilitam, assim como as trincas, a fratura da peça. Os poros são motivo de fragilidade dos cerâmicos sob carregamento em tração. A distribuição do tamanho dos poros e a porosidade total alteram as propriedades mecânicas dos cerâmicos (ASKELAND; WRIGHT, 2014).

#### *3.4.2. Descarte dos Isoladores Elétricos*

Para se minimizar o descarte dos isoladores elétricos em aterros, é interessante que exista um estudo para que o material possa servir posteriormente ao seu uso como uma fonte de matéria-prima. Antes do final da vida útil dos materiais, existe também uma preocupação com o tempo de operação dos equipamentos elétricos, devido aos seus custos elevados de aquisição e manutenção. Atualmente, isoladores

elétricos estão sendo descartados a céu aberto ou em caçambas como RCD e existe apenas uma pequena quantidade desse material sendo reutilizado.

Em um primeiro momento, a inspeção visual dos resíduos decide se o nível de contaminação é elevado. No caso da construção civil, na demolição, caçambas colocadas junto ao meio-fio, podem ser contaminadas por outros tipos de resíduos (ROCHA; JOHN, 2003). O ideal para fim de pesquisa é obter lotes de isoladores descartados de empresas e concessionárias de energia elétrica. O lote deve corresponder a uma determinada quantidade de material de um só tipo com características semelhantes e fabricação em condições de produção, sendo uniforme e submetido à inspeção em conjunto. Os isoladores em uso, devem apresentar superfícies lisas e uniformes, sem cantos, rebarbas, trincas e defeitos no revestimento.

Atualmente, os isoladores cerâmicos após o final de sua vida útil encontram utilização como agregado na formação de concreto, pois o material moído exerce uma boa liga com o cimento. Outra possibilidade de reciclagem é para a fabricação de revestimentos cerâmicos em que a resistência à abrasão seja um dos requisitos importantes, já que porcelanas aluminosas aumentam a resistência de pisos e pavimentos em geral. O grês porcelanato, por exemplo, é frequentemente colocado em ambiente de alto tráfego (CAVALCANTE et al., 2003). Resíduos incorporados a massas cerâmicas tornaram-se uma atividade comum com o objetivo de reduzir os custos de produção, preservando os recursos naturais.

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica, com dados referentes ao consumo anual de porcelanas elétricas, estima-se uma capacidade instalada de 44.000 t/ano com a produção anual de 28.000 t/ano. No Paraná com cerca de 160.000m de linhas de rede de distribuição, com uma projeção de 60 isoladores de 1,2 kg/unidade por kg de linha, tem-se um passivo de 11.000 t. Para o Brasil, estima-se um passivo de 200.000 t.

### 3.5. SITUAÇÃO DOS ATERROS SANITÁRIOS

O crescimento e o desenvolvimento rápido da sociedade e da economia levam ao rápido aumento da quantidade de resíduos sólidos municipais. No Brasil apenas 70% do lixo é coletado, sendo que somente 10% desse lixo possui destinação final adequada em aterros sanitários, usinas de reciclagem, compostagem e incineração. As estações de tratamento de resíduos e centros de processamento têm crescido

cada vez mais no mundo (ESHET et al., 2007). Com a situação atual dos aterros sanitários, os quais se aproximam do limite máximo de reciclagem, e o aumento do consumo de bens, é importante realizar pesquisas para que no futuro a população possa enfrentar as novas situações com relação ao meio ambiente (VALENCIA et al., 2015). Na região da grande Porto Alegre e arredor, as autoridades são contrárias à criação de novos aterros, sendo previsto o fechamento/esgotamento dos aterros existentes nos próximos anos.

### 3.6. RECICLAGEM DOS MATERIAIS CERÂMICOS

É sempre possível se aperfeiçoar o processo de fabricação das cerâmicas a fim de promover as melhores propriedades mecânicas, conhecendo os fatores prejudiciais e métodos adequados para se obter o melhor produto final (SCHULLER et al., 2008). No entanto, por melhor que seja o material, com o tempo ele atinge o fim de sua vida útil. Para a produção de materiais cerâmicos de grande escala, atualmente, é importante manter um processo produtivo executando as técnicas adequadas e apropriadas para se obter economia de matéria-prima, redução de consumo de energia elétrica e energia térmica e aumento da produtividade. A competitividade entre os fabricantes exige que estes busquem minimizar seus custos de produção, sem que prejudiquem seus padrões de qualidade e atendam as normas regulatórias dos órgãos nacionais e internacionais de controle de qualidade (LUZ; RIBEIRO, 2008).

Para a utilização de materiais reciclados, é importante ter uma estimativa da quantidade de resíduos gerados por determinado tempo, devido a eventuais sazonalidades sem sua geração. O controle é importante para se determinar a estrutura necessária para gerir o processo e realizar a reciclagem. A formação de estoques pode ser importante para que as unidades de reciclagem possam operar de maneira contínua, pois os resíduos gerados em baixa quantidade limitam as operações comerciais da reciclagem, sempre sensível à escala de variação na produção industrial. É importante para a obtenção de benefícios financeiros, o desenvolvimento de novas alternativas com maior valor agregado (ROCHA; JOHN, 2003). Assim, além das questões técnicas, é preciso se considerar os problemas de logística, questões econômicas, etc.

### *3.6.1. Potencial de Produção de Peças Cerâmicas com Isoladores Reciclados*

Para a produção de peças cerâmicas, inicialmente após a descontaminação, os isoladores passam por um processo de fragmentação e cominuição. Podendo, desse modo, servir como matéria-prima ao triaxial cerâmico. As matérias-primas dos isoladores elétricos são o caulim, argila plástica, feldspato e o quartzo (e/ou alumina).

Como mencionado anteriormente, na produção de peças cerâmicas, o feldspato é um material fundente e a argila (e parcialmente o caulim) é responsável pela plasticidade. Portanto, esses são mais difíceis de serem substituídos pelo isolador reciclado: é possível apenas uma pequena substituição do caulim/argila, respeitando a plasticidade do sistema e como os isoladores são queimados em temperaturas elevadas, sua fundência é baixa em relação a maioria das cerâmicas tradicionais. Portanto, os componentes refratários (alumina e quartzo) é que apresentam o maior potencial de substituição. A alumina, usada principalmente em porcelana elétrica, não possui características plásticas, mas é um componente muito estável à ambientes severos e aumenta a resistência mecânica da porcelana elétrica, assim, a substituição total também deve ser ponderada. Face a isso, o quartzo é o componente que apresenta melhores condições para ser substituído pelo resíduo do isolador elétrico. Existe, é claro, diversas opções para a produção de peças cerâmicas de acordo com sua finalidade: pisos, azulejos, tijolos, louças, etc.

No caso de isoladores elétricos, os mesmos podem ser alta, média ou baixa tensão. Com a variação do teor dos componentes, obtém-se materiais com diferentes propriedades.

### *3.6.2. Reciclagem de Isoladores Elétricos*

Reciclagem refere-se ao reaproveitamento de resíduos em geral, com retorno ao ciclo de produção para a fabricação de produtos novos. Dentre os inúmeros benefícios, destaca-se a redução dos recursos naturais majoritariamente não renováveis e, conseqüentemente, a redução da quantidade de resíduos dispostos no meio ambiente. A reciclagem tem um grande potencial para gerar um número considerável de empregos (RODRIGUES; LEIVA, 2010).

Nas últimas décadas, a questão ambiental tornou-se o principal motivo para a utilização de processos mais eficientes que permitam a redução do consumo de energia, a diminuição do efluente gerado e a otimização do uso de matérias-primas naturais (COELHO et al., 2016). Com o crescimento das redes de distribuição de

energia, a quantidade de isoladores elétricos no final de sua vida útil aumentou drasticamente, o que representa um problema social e ambiental. Por outro lado, com aproveitamento desses resíduos é possível se criar outros produtos cerâmicos, como os isoladores térmicos (XUA et al., 2015). As técnicas de reciclagem dos isoladores cerâmicos ainda se encontram em desenvolvimento, mas moagem é um dos métodos mais utilizados (FRANCO et al., 2010).

Um dos isoladores elétricos mais utilizados é do tipo pino cerâmico de média tensão (15 kV). A coloração marrom do isolador faz parte do padrão e norma dos isoladores. Os isoladores de baixa tensão BT possuem dimensões menores (Figura 3.5), com composição diferente do de alta tensão.

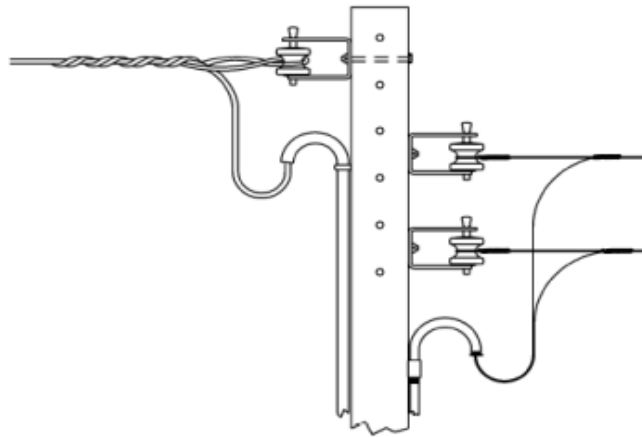


Figura 3.5 - Isoladores BT. Fonte: Eletrobrás (2014).

A Tabela 3.1 representa uma comparação de um isolador de porcelana e um de vidro. O isolador de porcelana apresenta um bom potencial à reciclagem. O isolador de vidro não contém alumina.

Tabela 3.1: Comparação de Isoladores

Composto	Isolador de Vidro (%)	Isolador de porcelana (%)
<b>SiO<sub>2</sub></b>	73	70
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	-	24
<b>K<sub>2</sub>O</b>	10	5
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	15	1

Fonte: PINHEIRO, 2008

Na fabricação do isolador de vidro, no processo de sinterização, normalmente alimentado a diesel, o processo dura aproximadamente seis dias. A temperatura do forno é de aproximadamente 1300°C, (MAMEDE, 2005)

A (figura 3.6) mostra a comparação entre um isolador BT de vidro e porcelana:



Figura 3.7 - Isoladores de Vidro e Porcelana BT. Fonte: MAMEDE (2005).

O volume de isoladores elétricos descartados da companhia de energia elétrica de São Paulo região metropolitana (AES/Eletropaulo) foi de 677 toneladas em 2011, representando aproximadamente 14% de todo o lixo gerado na manutenção e distribuição de energia (MANTOVANI et al., 2013). Os isoladores elétricos em atividade estão expostos ao meio ambiente em condições atmosféricas variáveis como a chuva, o vento e a poluição. Conseqüentemente, pode ocorrer uma diferença na composição química de isoladores elétricos cerâmicos novos e usados, mas essa se restringe principalmente à superfície dos mesmos.

Segundo a AES – Eletropaulo, a composição dos materiais descartados no total de 677 toneladas é expressa na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Composição dos Isoladores Elétricos Descartados por Ano.

<b>Materiais descartados</b>	<b>Isoladores elétricos descartados (%)</b>
Compostos de porcelana	87,29
Compostos de vidro	12,11
Material polimérico	0,59

Fonte: Mantovanni, 2011.

### 3.6.3. Fragmentação dos Materiais Cerâmicos

Para iniciar a reciclagem de um isolador elétrico cerâmico, inicialmente realiza-se sua fragmentação através de processos que envolvem moinhos e britadores. Dentre os mais utilizados, tem-se o britador de mandíbulas, de martelo e de rolos. A britagem corresponde à fase de redução mais grosseira do tamanho dos materiais e a moagem o refino. A redução de tamanho ocorre através das forças de impacto, compressão, cisalhamento, abrasão e atrito. Mas, considera-se principalmente três mecanismos básicos de cominuição que ocorrem sob intensidades e frequências próprias (DELBONI Jr., 1999): impacto, abrasão e atrição. Ocorre a dissipação de energia como na forma de calor. A britagem primária é utilizada em blocos de elevadas dimensões e dureza. A britagem secundária corresponde à fase subsequente à primária, a moagem é o último estágio no processamento.

Na operação de cominuição, a função de seleção é a probabilidade de cada classe de partículas ser selecionada para cada evento elementar de quebra. A função de quebra em cada classe representa a distribuição fracional nas diversas classes gravimétricas (SUDARIO; da LUZ, 2009). A separação entre as características do material cerâmico e as características do equipamento pode ser obtida através da utilização de parâmetros do equipamento que são calculados a partir de dados da amostragem. É importante realizar ensaios de impacto sobre as partículas individuais, visando à caracterização das rochas (CHIEREGATI; DELBONI Jr., 2001). O nível de enchimento da carga afeta diretamente a capacidade de moagem pela dependência da potência em função do grau de enchimento (BERALDO, 87).

A equação que pode indicar o consumo energético de moagem é a equação da Lei de Bond, equação (3.1):

$$w = 10 \cdot w_i \left( \frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{A}} \right) \quad (3.1)$$

W = energia aplicada [J/Kg].

Wi = índice de trabalho submetido à cominuição com 80% passante na malha de 100 micrômetros [J/Kg].

P = diâmetro dos produtos [ $\mu\text{m}$ ] (para moinho de bolas) no qual passa 80% da massa.

A = diâmetro da alimentação [ $\mu\text{m}$ ] na qual passa 80% da massa.

O teste tempo-consumo padrão de Bond é um método utilizado para obter os índices da Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Índice wi para Utilização na Equação de Bond

<b>Material</b>	<b>Work index</b>	<b>Material</b>	<b>Work index</b>
Barita	4,73	Fluorita	8,91
Bauxita	8,18	Granito	15,13
Carvão	13,00	Grafite	43,56
Dolomita	11,27	Calcário	12,74
Esmeril	56,70	Sílex	9,58
Ferro-sílica	10,01	Quartzo	13,57

Fonte: Wills (2008).

Rittinger (1867) e Bond (1952) demonstraram que a energia requerida para se alcançar certo grau de redução de tamanho aumenta com a diminuição do tamanho do fragmento e, para um mesmo nível de energia específica aplicada, a fragmentação diminui com a diminuição do tamanho do fragmento. Os processos de cominuição são fortes consumidores de energia e a eficiência energética da moagem. Para que a energia requerida no processo de cominuição seja reduzida, pode-se adicionar água ou para aumentar a redução, podemos adicionar agentes químicos promovendo absorção no material sólido e sua dispersão (HARTLEY et al., 1978).

Os britadores de impacto e martelo apresentam potência entre 11 e 450 kW. São utilizados para pequenas e médias capacidades, preferencialmente para um material pouco abrasivo. Os britadores de mandíbulas apresentam potência entre 2,25



a 225 kW, sendo utilizado para pequenas e médias capacidades, materiais plásticos como argilas devem ser em pouca quantidade (BERALDO, 1987).

A moagem de matérias-primas cerâmicas é principalmente realizada em um moinho de bolas a úmido. Carrega-se o moinho com determinada quantidade de matéria-prima, sendo moída até atingir a granulometria desejada (KAYACI et al., 2017). O controle do tempo de moagem é feito pela amostragem periódica e classificação em peneiras.

#### 3.6.4. Processo de Queima

A queima dos materiais cerâmicos é realizada após a secagem, propiciando a eliminação de aditivos da conformação, promovendo as reações entre matérias-primas e favorecendo a consolidação do formato final da peça. Na queima, ocorre a sinterização das partículas, no caso dos isoladores, por meio da formação de uma fase vítrea que preenche os poros e promove a retração do produto por ação da capilaridade. O produto adquire uma resistência mecânica considerável, já que, durante esse processo, a porosidade é reduzida, aumentando a densidade do material. O processo de queima pode ser realizado em diferentes tipos de fornos, como o elétrico, a gás, micro-ondas ou óleo combustível (RODRIGUES; LEIVA, 2010). No isolador elétrico é utilizado um esmalte que recobre a superfície da porcelana; a coloração marrom do esmalte corresponde à norma padrão utilizada. O esmalte contribui ao isolamento elétrico, uma vez que tem uma resistividade entre  $10^4$  e  $10^6$  ohm.cm, proporciona uma proteção diante de infiltrações e aumenta a resistência à degradação do material. Outra propriedade importante é que o esmalte exerce influência sobre a diminuição de correntes de fuga.

### 3.7. CARACTERÍSTICAS DIELÉTRICAS

Em um isolante elétrico a aplicação de um campo elétrico causa uma polarização produzindo um campo oposto ao original, a força resultante é chamada de constante dielétrica do material. Os isolantes cerâmicos possuem elétrons fortemente ligados e íons que não se difundem, o grau de oposição está na faixa entre  $10^{-10}$  e  $10^{-20}$  (ohm.m)<sup>-1</sup>. As características dielétricas estão relacionam-se com a oposição do material com relação à descarga elétrica. Uma irregularidade em um material cerâmico é capaz de defletir a onda senoidal reduzindo a mobilidade e

influindo na condutividade. Com relação aos testes dielétricos utilizados em materiais cerâmicos, a rigidez dielétrica representa quanto o material suporta a descarga antes de se degradar. A resistividade corresponde à medida do grau de oposição ao qual o fluxo de corrente ultrapassa as partes internas do componente, não ocorre a degradação do mesmo.

### 3.7.1. Impedância

A impedância indica a oposição total que um circuito oferece ao fluxo de uma corrente elétrica variável no tempo. É um conceito que considera a microestrutura do material, ou seja, a influência de cada fase, poros, contorno de grão, entre outros sobre a resistência elétrica. Ela corresponde à reação total ao fluxo de corrente, expressa em ohms e está relacionada à corrente alternada (circuito oscilante) (YAVORSKI, DETLAF, 1977). Com a Impedância é possível descrever a relação entre o fator tensão (V) e o fator corrente (A), e calcular a resistividade do grão e o contorno do grão, por exemplo.

A impedância em função do tempo pode ser representada através da equação (3.11):

$$Z_t = \frac{E_t}{I_t} \quad (3.2)$$

$E_t$ =tensão em função do tempo

$I_t$ =corrente em função do tempo

Os valores de tensão e corrente possuem uma defasagem sendo representado por  $\phi$  e  $\omega$  é a frequência angular em radianos por segundo. A diferença de fase está sempre entre  $0^\circ$  e  $90^\circ$  (PIVA, 2014). Com relação ao valor de pico, a impedância pode ser representada pela equação:

$$Z_\omega = Z_0 \frac{\cos(\omega t)}{\cos(\omega t - \phi)} \quad (3.3)$$

A defasagem relaciona-se com a frequência de oscilações entre a tensão e a corrente elétrica. Quando não temos a defasagem, dizemos que a tensão e corrente estão em fase. O fator de potência é  $FP = 1$ ,  $FP = \cos\phi$ .

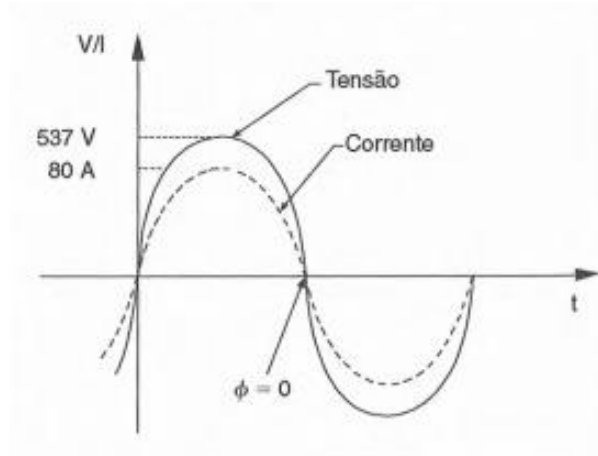


Figura 3.8 - A tensão e Corrente estão em Fase  $FP=1$ ,  $\phi=0$ . Fonte: MAMEDE (2005).

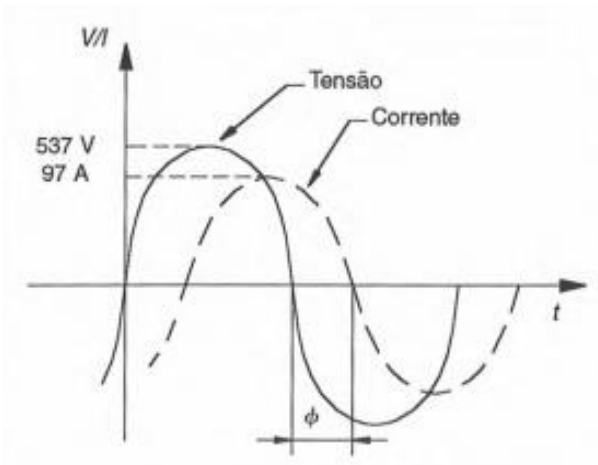


Figura 3.9 - Ocorre a Defasagem ( $\phi$ ) da Tensão com relação à Corrente Característica Indutiva. Fonte: MAMEDE (2005).

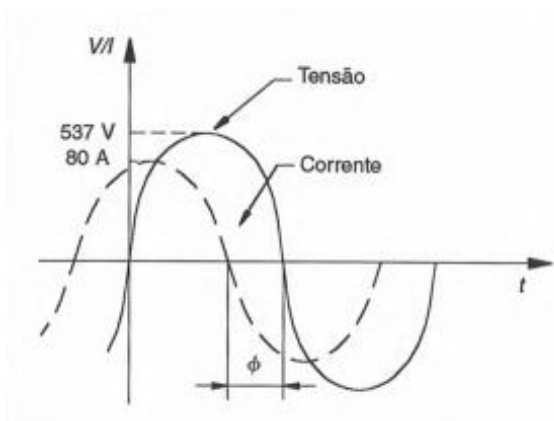


Figura 3.10: Ocorre uma Defasagem ( $\phi$ ) da Corrente com Relação à Tensão, Característica Capacitiva. Fonte: MAMEDE (2005).

No plano complexo a abscissa corresponde à parte resistiva do sistema e a ordenada à parte capacitiva ou indutiva (PIVA 2014). Através da equação de Euler, podemos representar a impedância através da forma polar ou retangular, onde  $Z=Z_0$  e  $j=\sqrt{-1}$ :

$$Z\omega = |Z|e^{j\phi} \quad (3.4)$$

$$Z\omega = |Z|\cos\phi + |Z|j\sin\phi \leftrightarrow \text{forma polar} \quad (3.5)$$

$$Z\omega = Z' + jZ'' \leftrightarrow \text{forma retangular} \quad (3.6)$$

$Z'$ =real

$Z''$ =imaginário

Na espectroscopia de impedância, o nível de dispersão na formação dos arcos pode ser calculado através da equação:

$$z = \frac{Z_0}{(j\omega)^n} \quad (3.7)$$

- Quando  $n$  estiver entre 0,9 e 1, representa o comportamento da maioria dos sólidos.
- Quando  $n=1$ , representamos o comportamento de um capacitor ideal;
- Quando  $n=0$ ,  $Z_0=R$ , temos um comportamento de um resistor.

### 3.7.2. Capacitores

O capacitor armazena energia elétrica, é constituído por um condutor separado por um dielétrico. A separação pode ser através de placas paralelas, sendo que a capacitância aumenta com a diminuição da espessura do dielétrico. A capacitância pode ser representada pela equação 3.13:

$$C = \epsilon_0 \frac{A}{l} = \epsilon \cdot A/l \quad (3.8)$$

$\epsilon_0$  = permissividade no vácuo

$\epsilon$  = permissividade no meio dielétrico

A relação da capacitância com a impedância no plano complexo pode ser expressa através da equação 3.14:

$$Z_C = \frac{1}{j\omega C} \quad (3.9)$$

No método de Espectroscopia de impedância ao qual é possível estudar os mecanismos de condutividade dos materiais, a impedância varia com a frequência, a capacitância é representada por pontos com relação ao eixo imaginário. A combinação da impedância e capacitância pode ser representada através de circuitos representados por equações em série ou paralelo (equação 3.10 e 3.11):

$$Z = R + \frac{1}{j\omega C} \leftrightarrow \text{Associação em série} \quad (3.10)$$

$$Z = \frac{R}{1 + Rj\omega C} \leftrightarrow \text{Associação em paralelo} \quad (3.11)$$

No diagrama polar, o ângulo de fase é medido no sentido anti-horário a partir do eixo das abscissas (PIVA 2014).

### 3.7.3. Condutividade

A condutividade possui relação com os espaçamentos entre as bandas de valência e a banda de condução, pode ser iônica, sendo freqüente nos materiais cerâmicos. Na presença de um campo elétrico os cátions e ânions realizam a condução, a alta temperatura e os defeitos pontuais como interstícios e vacâncias, facilitam a condutividade, pois aumentam o número de transportadores de carga. Como as propriedades elétricas são sensíveis à presença de impurezas, podemos ter um material semiconductor. Nos dielétricos exibem uma estrutura de dipolo elétrico como nos capacitores. Segundo Kawasaki (1992), a condutividade é dependente da porosidade.

A condutividade elétrica é dada pela equação 3.12:

$$\sigma = n \cdot e \cdot \mu_e + p \cdot e \cdot \mu_h \quad (3.12)$$

$\mu_e$  = mobilidade do elétron

$\mu_h$  = mobilidade do buraco

$n$  = elétrons/m<sup>3</sup>

$p$  = buracos/m<sup>3</sup>

Com relação aos transportadores:

- Os transportadores da carga negativa são os elétrons e ânions;
- Os transportadores da carga positiva são os cátions e os buracos eletrônicos.

#### 3.7.4. Resistividade Elétrica

A resistividade ( $\rho$ ) é uma característica física do material corresponde à oposição ao fluxo da passagem da corrente elétrica, utilizando-se a corrente contínua (DC), de acordo com a área de secção transversal e a espessura do material, pode ser expresso através da equação (3.13), levando-se em consideração a impedância real  $Z'$ .

$$\rho = \frac{A \cdot Z'_{total}}{l} \quad (3.13)$$

Onde:

$A$  = área de secção;  $l$  = espessura e  $Z'$  total é a impedância elétrica total obtida.

Quando se utiliza corrente alternada no método de espectro de impedância, realizamos a medição da resistividade com a variação da temperatura, a relação entre a resistividade elétrica e a constante dielétrica é dada pela equação (3.14):

$$\rho = w \text{ realr} * \tan \delta \quad (3.14)$$

Onde:  $\rho$ : resistividade elétrica, ( $\Omega \cdot \text{cm}$ );  $\omega$ : frequência angular ( $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  = frequência em Hz);  $\epsilon_0$ : a permissividade no vácuo ( $8,85 \times 10^{-12}$  F/m);  $\epsilon_r$ : constante dielétrica;  $\delta$ : ângulo de perda;  $\tan \delta$ : mede a perda de energia por ciclo (na forma de calor); o produto  $\delta \cdot \epsilon_r$  corresponde fator de perdas dielétricas (BUCHANAN, 1986; PIVA, 2014). A Tabela 3.4 apresenta as propriedades requeridas a um isolador elétrico. Comercialmente, os valores podem ser bem melhores.

Tabela 3.4: Propriedades Requeridas para um Isolador Elétrico de alta tensão.

Constante dielétrica ( $\epsilon_r$ )	$\leq 30$
Resistividade elétrica ( $\rho$ )	$\geq 10^{12}$ ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
$\tan \delta$	$\leq 0,001$
Ruptura dielétrica	$\geq 5,0$ kV/mm

Fonte: BUCHANAN (1986)

Buchanan (1986) considera que as características de resistividade devem ser próximas aos valores da Tabela 3.5 que são considerados como ideais para atender aos padrões das normas. Segundo Kawasaki (1992), a resistividade aumenta com a diminuição da porosidade.

Tabela 3.5: Propriedades Elétricas para Isoladores

Material	Tan $\delta$	Constante dielétrica	Ruptura dielétrica (kV/mm)	Resistividade 25°C ( $\Omega \cdot \text{cm}$ )
Porcelana	0,008 – 0,020	5,0 – 6,5	6,1 – 13,0	$10^{11} - 10^{14}$
Vidro alcalino	0,005 – 0,010	4,3 – 8,5	7,8 - 13,2	$10^{12}$

Fonte: BUCHANAN (1986).

De acordo com Piva (2014), em porcelanas, a fase vítrea é a fase de menor resistividade os íons se deslocam preferencialmente por ela. As fases cristalinas como mulita, quartzo, coríndon representam barreiras ao deslocamento dos íons, sendo esses bloqueados na região de interface. Assim, o autor afirma que quanto maior a quantidade dessas interfaces mais difícil será o movimento da corrente elétrica, ou seja, mais portadores serão bloqueados e maior será a resistência que o material

apresenta. O arco do espectro de impedância pode ser relacionado com as respectivas regiões de fases, conforme a Figura 3.10.

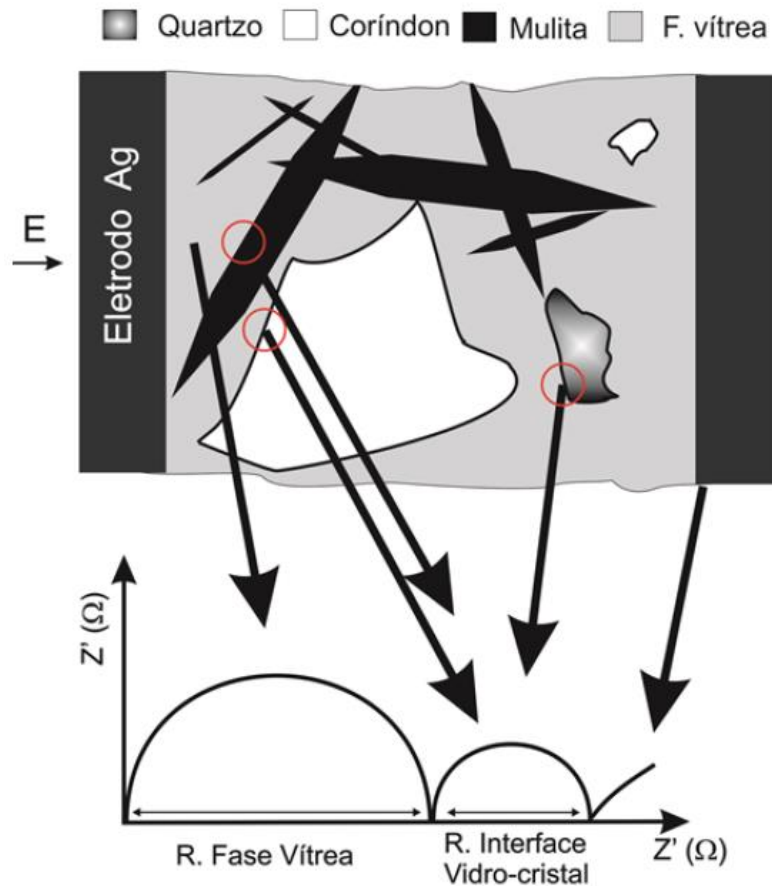


Figura 3.11 - Relação das Fases de uma Porcelana com os Arcos do Espectro de Impedância. Fonte: Piva (2014).

Com relação ao teste de espectro de impedância, a relação com a frequência, mostra quanto o capacitor desloca a onda (defasagem). Um resultado de alta capacitância representa uma frequência mais baixa. O valor de BIAS representa a variação do potenciostato com relação à amplitude de corrente contínua e alternada.

### 3.8. Estado da Arte

Os estudos atuais demonstram a necessidade de se melhorar às propriedades dielétricas e mecânicas para a manufatura de novos isoladores elétricos. Muitas pesquisas visam minimizar os impactos do meio ambiente sobre os isoladores, com relação à degradação. Existe também uma tendência com relação à reutilização de materiais como composição adicional às matérias-primas ou como substituição parcial



delas. A avaliação da variação do teor de alumina e de sílica com relação às propriedades físicas, mecânicas e elétricas da porcelana foram realizados por Mehta et al. (2018). Neste trabalho, a temperatura de sinterização variou entre 1250°C e 1350°C e a composição utilizada das amostras é apresentada na (Tabela 3.6):

Tabela 3.6: Composição das Amostras

<b>Composição das Amostras (%)</b>				
<b>Caulim</b>	<b>Argila Plástica</b>	<b>Feldspato</b>	<b>Sílica</b>	<b>Alumina</b>
25	20	10	0	45
25	20	10	5	40
25	20	10	10	35
25	20	10	15	30
25	20	10	20	25

Fonte: MEHTA et al. (2018)

Os melhores resultados foram obtidos na temperatura de sinterização de 1350°C com a adição de 10% de SiO<sub>2</sub> e 35% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Tabela 3.7). A presença de 10% de sílica foi suficiente para a diminuição da porosidade aparente e da absorção de água, devido à formação da fase vítrea. As amostras sinterizadas a 1350°C tiveram melhor resistência dielétrica dos que as queimadas a 1250°C. Constatou-se que a adição de alumina reduz a tanδ (MEHTA et al., 2018).

Recentemente foi desenvolvido um estudo para se obter uma porcelana a partir de matérias-primas disponíveis locais, como resíduos de vidro de automóveis substituindo parcialmente o feldspato potássico na elaboração da porcelana. O trabalho baseou-se nas propriedades mecânicas e dielétricas dos isoladores de porcelana sinterizadas em diferentes temperaturas (BELHOUCHE et al.; 2019). A composição do vidro reciclado utilizado na pesquisa é observada na (Tabela 3.7):

Tabela 3.7 Composição do Vidro de Automóvel Reciclado

<b>Composição vidro reciclado</b>	<b>(%)</b>
SiO <sub>2</sub>	70,22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,08
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,08
CaO	12,01
Na <sub>2</sub> O	13,10
K <sub>2</sub> O	0,03
MgO	1,55
SO <sub>3</sub>	0,38

BELHOUCHE et al.; (2019).

A composição com a adição de vidro reciclado é demonstrada na (Tabela 3.8):

Tabela 3.8 - Composição com a Adição de Vidro Reciclado

<b>Amostra</b>	<b>Caulim</b>	<b>Quartzo</b>	<b>Feldspato</b>	<b>Vidro reciclado</b>
<b>(%)</b>				
N00	50	20	30	0
G10	50	20	20	10
G20	50	20	10	20
G30	50	20	00	30

Fonte: BELHOUCHE et al. (2019)

Os testes demonstraram que a utilização do vidro em substituição do feldspato potássico, reduz a temperatura de queima em 200°C com 30% de adição de vidro. Os resultados experimentais apresentaram excelentes propriedades mecânicas, resistência dielétrica em comparação com os isoladores de porcelanas tradicionais. As propriedades dielétricas tiveram os melhores resultados na temperatura de 1100°C (BELHOUCHE et al., 2019). Para a análise das propriedades físicas, foi utilizada a difração de raios X. Conforme essa análise, após a queima a 1050°C, deu-se a formação de mulita e de anortita nas amostras queimadas entre 1150°C e 1300°C,

observou-se a dissolução do quartzo e o maior desenvolvimento da fase vítrea (BELHOUCHE et al., 2019).

Os testes dielétricos foram realizados por meio de um analisador de impedância e precisão. As características dielétricas de isolamento da porcelana são devido a forte ligação com seus átomos e íons (BELHOUCHE et al., 2019). As propriedades dependem das condições de manufatura do corpo porcelânico e das condições de medida de resistividade, como o fator de perda dielétrica e  $\tan\delta$  sobre a frequência. A constante dielétrica da porcelana aumentou com a presença de  $K^+$  e  $Na^+$  e decresceu quando esses foram substituídos pelos cátions  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  e  $Ba^{2+}$ . Estes resultados provaram a produção de um capacitor dielétrico (BELHOUCHE et al, 2019).

A mudança de fase durante a sinterização influencia as propriedades dielétricas das porcelanas como a permissividade e perda do fator dielétrico (KUMAR et al., 2014; GAUTAM et al., 2014). O feldspato é um dos mais importantes materiais e é capaz de melhorar as propriedades mecânicas da porcelana, mas contribui negativamente sobre os efeitos da isolamento com relação à quantidade dos óxidos de  $Na^+$  e  $K^+$  (LI'Iná, 2004). Uma quantidade excessiva de potássio no feldspato, por exemplo pode diminuir a resistividade.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. MATERIAIS

O isolador escolhido para estudar a reciclagem e realizar os ensaios é do tipo pino cerâmico de média tensão 15 kV, descartado pela concessionária após o final de sua vida útil (Figura 4.1 e 4.2). Atualmente, existe uma quantidade considerável de isoladores elétricos descartados, pois a manutenção realizada na rede é constante.



Figura 4.1 - Lote de Isoladores utilizados na pesquisa Isoladores Elétricos 15 kV. Fonte: O autor (2019).

O isolador elétrico cerâmico é composto por uma porcelana triaxial revestida por um esmalte e foi denominado 'isolador usado'. Este tipo de isolador elétrico (15 kV e 25 kV) é utilizado em redes trifásicas. Os contornos da superfície têm a finalidade de aumentar a superfície do isolador de modo a aumentar a oposição da trajetória de uma possível corrente de fuga.

A coleta dos isoladores elétricos cerâmicos descartados para a pesquisa foi feita em uma central de reciclagem localizada em Canoas-RS, no qual uma concessionária de energia elétrica do Rio Grande do Sul realiza o descarte dos materiais elétricos. Após a triagem, os lotes que possuem boas condições são enviados para a cidade de São Paulo para uma empresa que realiza a restauração dos isoladores, para que possam ser reutilizados. Isoladores descartados em caçambas de materiais de construção (RCD) não são reutilizados, devido à contaminação com outros materiais.



Figura 4.2 – Corpo Isolador 15 kV. Fonte: MAMEDE (2005)

As composições do corpo de porcelana foram obtidas através da análise química de fluorescência de raios X, realizadas no SENAI/CTC de Criciúma. Os resultados são mostrados na Tabelas 4.1. Observa-se que a composição do corpo corresponde a fragmentos da britagem dos isoladores, nos quais o esmalte não estava presente. Portanto, a britagem produz partículas da superfície em que o esmalte está presente, e partículas do interior (corpo) sem a presença de esmalte. Esse resultado da britagem será analisado mais detalhadamente no Item 5.1 “Avaliação do processo de britagem e moagem dos isoladores”.

Tabela 4.1: Composição do corpo dos isoladores elétricos (fragmentos sem esmalte). (-) Elemento não analisado

Óxido	Teor (%)	Óxido	Teor (%)
SiO <sub>2</sub>	68,5	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,8	Li <sub>2</sub> O	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,63	BaO	< 0,1
K <sub>2</sub> O	3,1	Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,1
MgO	1,3	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,1
MnO	0,05	PbO	< 0,1
Na <sub>2</sub> O	1,8	SrO	0,07
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07	ZnO	< 0,1
CaO	0,83	ZrO <sub>2</sub> +HfO <sub>2</sub>	< 0,1
TiO <sub>2</sub>	0,14	Perda Fogo	0,50

A composição do corpo do isolador usado está de acordo com as informações na literatura (CHINELATTO, 2004). A composição fornecida pelo fabricante de isoladores é de SiO<sub>2</sub> 70%; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 24%; Na<sub>2</sub>O 1% e K<sub>2</sub>O 5%. Essa composição é próxima à apresentada na Tabela 4.1.

A composição de ambos os materiais (corpo e esmalte) foi bastante próxima. Testes preliminares de gresificação não mostram diferenças na caracterização dos corpos de prova, com e sem esmalte. Face a isso, decidiu-se pela utilização dos fragmentos de isoladores sem nenhuma separação (corpo + esmalte), ou seja, todo o isolador usado, incluindo os fragmentos com esmalte. Assim, após a britagem todo o material foi moído. A análise do isolador moído (isolador usado) é mostrada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Composição química por FRX das matérias-primas e do isolador usado.

<b>Matérias-primas (% em peso)</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MgO</b>	<b>CaO</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>
Feldspato	66,0	19,4	0,07	0,10	0,06	2,50	11,4	0,42
Isolador usado	69,4	22,0	0,7	1,1	0,8	1,7	3,2	0,08
Caulim	57,0	29,8	0,78	0,1	<0,05	<0,05	0,67	0,06
Alumina		99,5						
Quartzo	99,8	0,12	0,08	-	-	0,03	0,06	0,02

As outras matérias-primas utilizadas na preparação das formulações cerâmicas são mostradas na Tabela 4.2. O caulim é uma argila branca caulinítica, proveniente de Pantano Grande-RS. O feldspato e o quartzo são utilizados pela indústria local. A alumina é do fornecedor Almatís (%αAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>99,5%; %Na<0,08%).

As amostras preparadas da desagregação dos isoladores usados foram submetidas à análise por difração de raios X no Laboratório de Materiais Cerâmicos LACER-UFRGS, equipamento Phillips modelo X'Pert – MPD com auxílio do software X'Pert High Score. O resultado é mostrado na Figura 4.3, podendo-se observar as fases cristalinas, como o quartzo e a mulita.

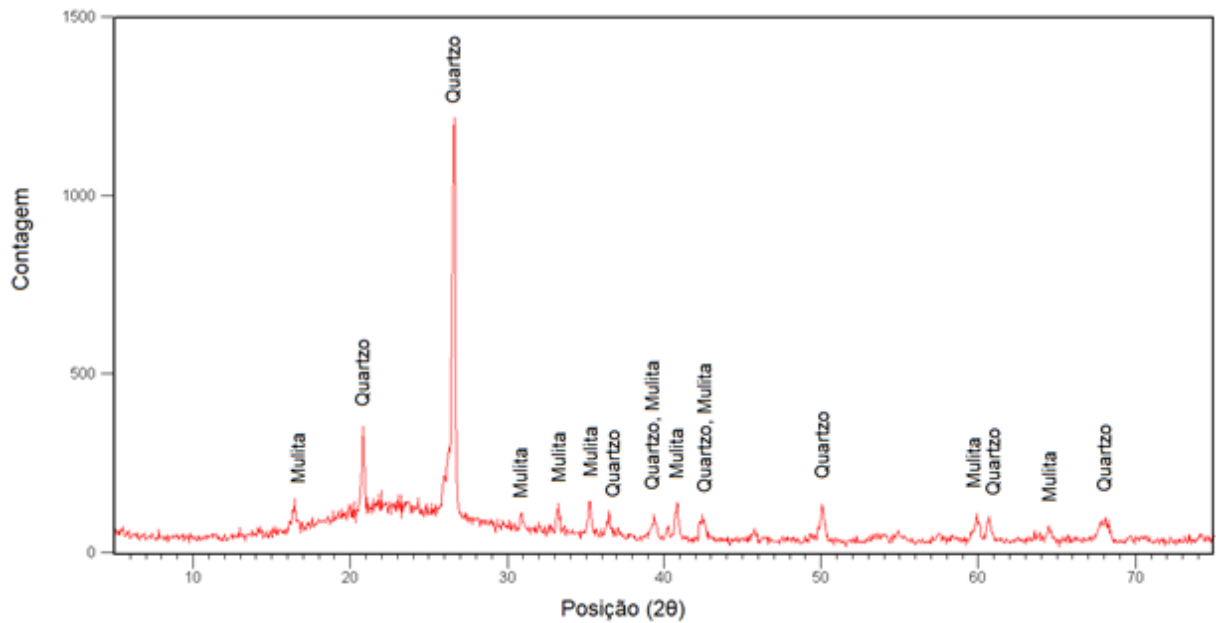


Figura 4.3 - Difração Raios X do Isolador Usado. Fonte: O Autor (2019).

## 4.2. FORMULAÇÃO

O material reciclado (isolador de porcelana usado) foi utilizado para o estudo de uma formulação de um isolador elétrico cerâmico de porcelana triaxial. Para tanto, utilizou-se, além do isolador usado, as matérias-primas caulim, feldspato, quartzo e alumina.

A Tabela 4.3 mostra as formulações utilizadas. A partir da formulação A, o isolador é introduzido, substituindo o quartzo na formulação B, e o quartzo e a alumina, na Formulação C.

Tabela 4.3: Formulações Estudadas.

<b>Matérias-primas (%) / Formulações</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Caulim	40	40	40
Feldspato	20	20	20
Quartzo	20	-	-
Alumina	20	20	-
Resíduo de isolador de porcelana	-	20	40

### 4.3. MÉTODOS

#### 4.3.1. Preparação dos Corpos de Prova

O procedimento da parte experimental envolveu as etapas descritas conforme o fluxograma da Figura 4.4.

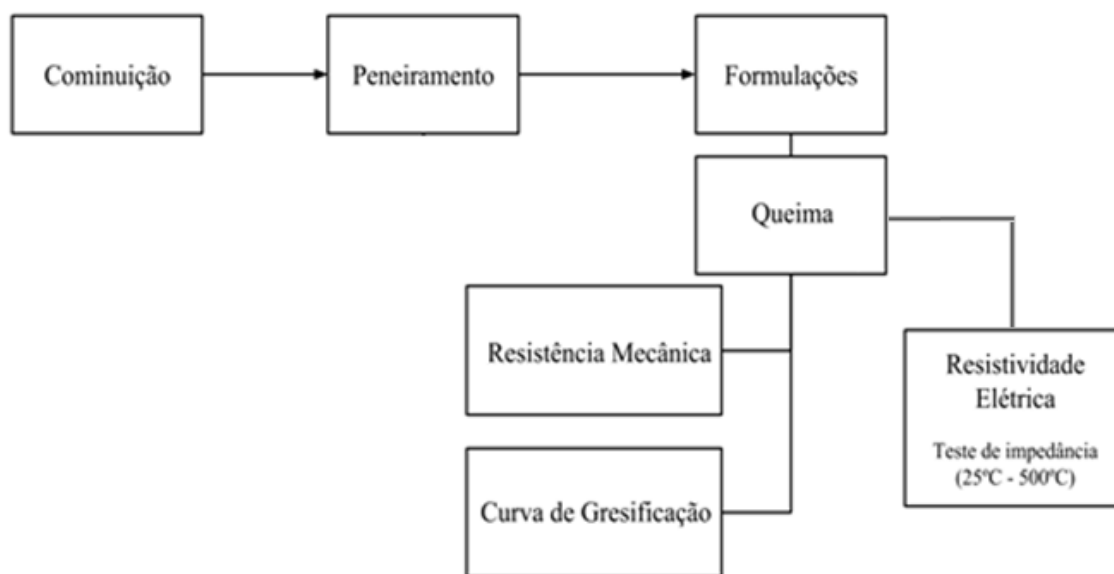


Figura 4.4 - Fluxograma do estudo de reciclagem de isoladores usados elétricos cerâmicos.

#### 4.3.1.1. Cominuição dos Isoladores Elétricos

Inicialmente foi realizado um ensaio de impacto em um britador de mandíbulas no laboratório (LAPROM – UFRGS), visando caracterizar a porcelana e o nível de enchimento, para ter uma ideia da capacidade da abertura principal e de britagem pela dependência da potência. O processo de cominuição inicial foi isento umidade superficial. O isolador de 15 kV, ocupou totalmente a abertura principal do britador de mandíbulas, cuja abertura principal era de 110 x 190 mm (Plangg) com 10 cv de potência. Como o isolador elétrico possui a dimensão de 120 x 100 mm, para que ocorresse a fragmentação da peça no sentido horizontal, a tampa principal foi removida e adaptada para uma abertura de 150 x 190 mm. Toda britagem foi realizada no Laboratório de Processamento Mineral (LAPROM-UFRGS).



A principal desvantagem do britador de mandíbulas é a largura pequena, limitando a capacidade do carregamento, evitar o bloqueio da abertura durante a alimentação. Por outro lado, após a adaptação, a fragmentação do isolador elétrico foi instantânea, na média de 5 segundos em cada passagem, observando-se as forças de impacto, esmagamento, compressão e atrito.

Portanto, o uso do britador de mandíbulas (Plangg) de 10 cv de potência (Figura 4.4A), de abertura principal foi de 150 x 190 mm, se mostrou compatível e eficiente à cominuição dos isoladores elétricos. Como dito, o tempo de britagem de cada isolador foi de ~5 segundos em cada passagem, ou seja, o material, na prática, passa diretamente pelo britador. A média dos produtos variou entre 25 mm e 5 mm na primeira passagem e de 10 a 5mm na segunda passagem (Figura 4.4A).

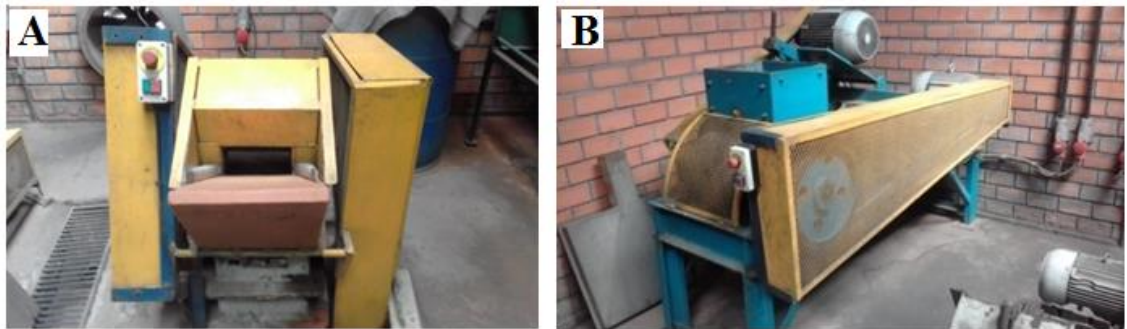


Figura 4.5 – A: Britador de Mandíbulas. B: Britador de Rolos 10 cv (LAPROM-UFRGS). Fonte: O autor (2019).

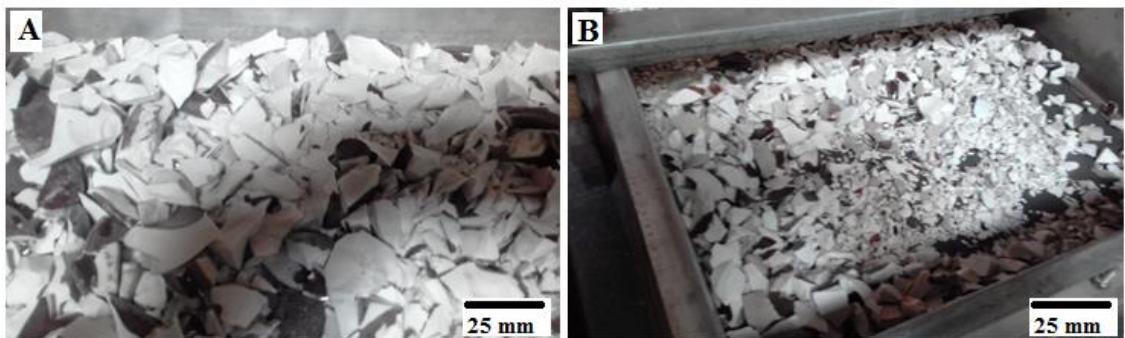


Figura 4.6 – Resultado da britagem no britador de mandíbulas. A: Primeira passagem. B: Segunda passagem. Fonte: O autor (2019).

Após o britador de mandíbulas, o material foi passado pelo britador de duplo rolo (Figura 4.5B), com dois motores de 5.0 cv de potência. Os fragmentos de aproximadamente 5 mm, no total 5700g foram divididos em bandejas de 263,3 g e remetidos ao moinho de rolos em três passagens, conforme o exemplo de três lotes abaixo:

- 1º lote: A primeira passagem teve a duração de 25 segundos, a segunda 35 segundos e a terceira 35 segundos.
- 2º lote: A primeira passagem teve a duração de 35 segundos, a segunda 34 segundos e a terceira 30 segundos.
- 3º lote: A primeira passagem teve a duração de 45 segundos, a segunda 32 segundos, a terceira 20 segundos.

A classificação do tamanho das partículas foi realizada por peneiramento, utilizando-se uma peneira ABNT de malha 10 (abertura de 2 mm). Após a britagem, realizou-se o peneiramento com o auxílio de um sistema vibratório (com temporizador). Ocorreram três peneirações com o tempo de 1 minuto e 30 segundos (Figura 4.7). Algumas partículas que não fragmentaram, devido à sua forma e tamanho, foram classificadas como materiais retidos e novamente britados. Portanto, uma última passagem foi realizada no sentido de reduzir os fragmentos de maior tamanho, mas algumas partículas não fragmentaram, sendo separado como material retido no total de 900 g gramas.



Figura 4.7 - Peneiração malha 10 (abertura de 2 mm) (LAPROM-UFRGS).

Fonte: O autor (2019).

Após o processo de britagem e peneiramento, o material passante na peneira ABNT de abertura de 2 mm foi encaminhado para um moinho de jarros tipo periquito Servitech modelo CT – 242 (LACER), Figura 4.8.



Figura 4.8 - Moagem no Moinho de jarros Servitech. Fonte: O autor (2019).

O moinho foi utilizado por ~20 minutos em bateladas de ~200g, com esferas de alumina, sendo bastante eficiente quanto à função de reduzir as partículas de tamanho médio para pós finos. A amostra foi reduzida a uma granulometria ideal para a reciclagem de um isolador elétrico cerâmico (Figura 4.9). O material obtido foi 100% passante em uma peneira de ABNT malha 270 (abertura 53  $\mu\text{m}$ ).



Figura 4.9 - Isolador moído após moinho de bolas. Fonte: O autor (2019).

#### **4.3.1.2. Conformação por prensagem uniaxial**

Para realizar a prensagem, as massas (formulações de acordo com a Tabela 4.3) foram colocadas em um moinho periquito para que a mistura fosse homogeneizada no tempo de cinco minutos, sendo posteriormente granuladas por umidificação a ~10% (Figura 4.10), em mistura manual.

Foram fabricados dois tipos de corpos de prova, relativos ao tipo de teste ao qual seriam submetidos: para o teste de flexão e caracterização tecnológica, foram feitos corpos de prova (CPs) de formato retangular, para o ensaio de resistividade, CPs cilíndricos.



Figura 4.10 - Mistura e granulação das massas. Fonte: O autor (2019).

Para a conformação dos corpos de prova de formato retangular visando o ensaio de resistência mecânica à flexão, foi utilizada uma prensa hidráulica com a capacidade de 100 Kgf /cm<sup>2</sup> ou 1500 PSI (Figura 4.11). As massas foram compactadas em prensagem uniaxial de 35 MPa, variando-se o teor de umidade de 8 a 12%, a fim de se produzir peças com as três formulações de densidade a verde de ~1,9 g/cm<sup>3</sup>.



Figura 4.11 - Prensa hidráulica (LACER – UFRGS). Fonte: O autor (2019).

Após a conformação dos CPs para o teste de flexão (Figura 4.12), eles foram secos em 24 horas ao ar livre e posteriormente conduzidos para a estufa na temperatura de 110°C por mais 24h. As dimensões de cada peça após a prensagem e secagem foram medidas por um paquímetro e calculadas as suas respectivas massas em gramas em balança analítica.

O valor da densidade em média de 10 corpos de CPs foi de  $\sim 1,86 \text{ g/cm}^3$ . Em dimensões aproximadas de 60 x 20 x 5,8 mm.



Figura 4.12 - Corpos de prova prensados para caracterização tecnológica.

Fonte: O autor (2019).

Para os ensaios de resistividade os corpos de prova foram prensados em pequenas peças cilíndricas. Após o processo de mistura e granulação, o material foi moldado na prensa em forma cilíndrica em uma prensa hidráulica BOVENAU com capacidade de 10 toneladas, curso hidráulico de 130 mm e ajuste de fuso máximo de 85 mm, (Figura 4.13). A dimensão de cada CP verde foi em média de diâmetro = 9,8 mm e altura = 6 mm, como pode ser visto na Figura 4.14. Cerca de 1g de pó foi utilizado para cada prensagem.



Figura 4.13 - Prensa hidráulica (LABIOMAT – UFRGS). Fonte: O autor (2019).



Figura 4.14 – Corpos de prova para o teste de resistividade. Fonte: O autor (2019).

#### **4.3.1.3. Processo de queima das peças**

Após a secagem na estufa, os corpos de prova retangulares (Figura 4.12) de cada grupo foram queimados em uma taxa de queima de 2,5°C/min com o tempo de patamar de 30 minutos, variando a temperatura de 1300°C a 1600°C. O resfriamento foi realizado naturalmente dentro do forno.

Para o teste de resistividade os corpos de prova cilíndricos (Figura 4.14) foram queimados simultaneamente na temperatura de 1350°C. Nessas condições os corpos de prova alcançaram densidades próximas.

#### **4.3.1.4. Teste de resistência à flexão**

Após a queima, realizou-se o teste de resistência à flexão, o qual foi realizado no aparelho Shimadzu AG-X 50 kN (Figura 4.15).



Figura 4.15: Ensaio de resistência à flexão (Lacer - UFRGS). Fonte: O autor (2019).

A resistência mecânica à flexão ( $\sigma$ ) foi calculada segundo a equação 4.1:

$$\sigma = \frac{3}{2} \cdot \frac{P \cdot (L \cdot s)}{b \cdot d^2} \quad (4.1)$$

- $\sigma$  = tensão máxima de ruptura;
- P = carga máxima aplicada;
- b = base do corpo de prova;
- d = altura do corpo de prova;
- L = distância entre os apoios inferiores (mm);
- l = distância entre os apoios superiores (mm).

#### 4.3.1.5. - Teste de Porosidade

No ensaio de porosidade, as peças são imersas em água e após 24 horas são retiradas. Realizou-se em seguida o método de Arquimedes conforme a equação 4.2:

$$AA = \frac{Pu - Ps \cdot 100}{Ps} \quad (4.2)$$

Pu = massa do corpo de prova úmido (g)

Ps = massa do corpo de prova seco (g)

$$PA = \frac{Pu - Ps}{Pu - Pi} \cdot 100 \quad (4.3)$$

$$DA = \frac{Ps}{Pu - Pi} \cdot Pl \quad (4.4)$$

Pi = massa do corpo de prova seco

Pl = densidade do líquido

#### 4.3.1.6. – Caracterização elétrica

Para o teste de resistividade elétrica, utiliza-se um recobrimento condutor, neste caso a tinta de prata foi depositada na superfície inferior e superior dos corpos de provas (CPs), e para fixar os eletrodos nas amostras, essas foram submetidas ao aquecimento a 600°C por 10 minutos. Este recobrimento é importante para materiais que são maus condutores elétricos, como os isoladores de porcelana, de modo a fazer o contato entre os eletrodos do equipamento e os CPs. A aplicação do filme de prata é importante também, para que a tensão aplicada na cerâmica se espalhe em toda a



superfície da amostra de forma homogênea sem que haja região de maior concentração de fluxo de corrente (IGOR, 2017).

#### **4.3.1.6.1. Caracterização elétrica em corrente contínua a temperatura ambiente.**

Para o teste de resistividade máxima na temperatura ambiente, foi utilizada a fonte de alta tensão modelo Keithley 237 com capacidade máxima de 1000V e 10 mA e 50-60Hz, por meio do qual verificou-se as variações de tensão, corrente e resistência (Figura 4.16).



Figura 4.16: Fonte de alta tensão (LABIOMAT-UFRGS). Fonte: O autor (2019).

#### **4.3.1.6.2. – Caracterização elétrica em corrente alternada**

A técnica de espectroscopia de impedância, que envolve corrente alternada foi realizada usando o potenciostato modelo PGSTAT 302 da Metrohm Autolab B. (Figura 4.17). O range de frequência de varredura foi de 0,1 Hz a 1 MHz com uma voltagem de 0,5 volts. As medidas elétricas foram realizadas em ar atmosférico em um intervalo de temperatura de 25 a 700°C com uma medida geralmente a cada 50°C. A taxa de aquecimento utilizada foi 10°C/min e estabeleceu-se um patamar de 10 min antes de cada medida com o objetivo de homogeneizar a temperatura do CP. Os resultados foram analisados pelo programa de análise de impedância NOVA (versão 2.1.2). Isso é necessário porque os dados coletados referem-se às medidas reais de sistemas elétricos e os semicírculos não aparecem de maneira clara, com muitos pontos dispersos e sobrepostos, de maneira que o espectro precisa ser analisado em um

programa (NOVA), para que os dados obtidos representem os valores dos elementos que constituem o circuito equivalente.



Figura 4.17: Potenciostato (LABIOMAT-UFRGS). Fonte: O autor (2019).

Para realizar o ensaio, os corpos de prova, dois de cada vez, foram colocados no porta amostra, conforme indica a seta nas hastes ao qual contém eletrodos (figura 4.18a), sendo posteriormente inseridos no interior do forno de teste termoelétricos modelo INT, FTR – 1100 com a tensão de 220 V, 16 A e 3,5 kVA de potência. (Figura 4.19b).



Figura 4.18: Eletrodos para o Teste de Impedância (LABIOMAT-UFRGS).  
Fonte: O autor (2019).



Figura 4.19: a) Porta amostra e b) Forno termoelétrico para o ensaio de espectroscopia de impedância (LABIOMAT-UFRGS). Fonte: O autor (2019).

Na realização do teste no potenciostato PGSTAT302N da Autolab as diversas temperaturas utilizadas para o teste são escolhidas por meio de testes preliminares. Por exemplo, em diversos valores de 25°C a 700°C, selecionam-se posteriormente os melhores resultados. O potenciostato está de acordo com a capacidade de variação da frequência.

O aumento de temperatura é importante para o aumento de condutividade em materiais de alta resistividade. Ele permite que se saiba qual fase contribui mais a condutividade iônica de um material. A condução iônica em função da temperatura pode ser expressa através da Equação 4.5 (KINGERY et al., 1976).

$$\rho = \rho_0 \cdot \exp - w/kT \quad (4.5)$$

Onde,  $\rho$  é a resistividade em uma determinada temperatura,  $\rho_0$  é um fator pré-exponencial e  $W$ ,  $k$  são a energia de ativação e a constante Boltzmann ( $8,62 \times 10^{-5} \text{eV}$ ), respectivamente, e  $T$ , a temperatura absoluta.

A resistividade elétrica e a constante dielétrica são relacionadas pela  $\tan \delta$ , a qual mede a perda de energia por ciclo (na forma de calor) do material, em corrente alternada (AC), conforme a equação 4.6:

$$\rho = w. \epsilon_0. \epsilon_r. \tan \delta \quad (4.6)$$

Onde,  $\epsilon_0$  é a permissividade no vácuo,  $8,85 \times 10^{-12}$  F/m;  $\omega$  é a frequência angular,  $\omega = 2\pi f$ , sendo  $f$  a frequência em Hz.

O produto entre tangente de perdas e constante dielétrica ( $\epsilon_r \cdot \tan \delta$ ) é o fator de perdas dielétricas de acordo com BUCHANAN (1986). Ele representa o quanto o material irá perder de energia elétrica em energia térmica, ou seja, quanto maior for esse produto, maior será o aquecimento do isolador.

A resistividade elétrica para cada temperatura foi obtida conforme Piva (2014), através da Equação 4.7.

$$\rho = A. Z' / l \quad (4.7)$$

Onde:  $A$  é a área e  $l$  a espessura da amostra,  $Z'$  é a interseção final do arco de impedância com o eixo real do espectro de impedância ( $-Z'' \times Z'$ ), quer dizer, a resistência do CP.

Os resultados de resistividade foram expressos em  $\Omega \cdot \text{cm}$ :

A unidade da característica elétrica das porcelanas foi obtida através da medida da área de secção transversal e a espessura das amostras em  $\text{m}^2$  e  $\text{m}$  respectivamente. Através dos valores dimensionais os resultados foram convertidos na seguinte unidade:

$l$  = espessura da amostra:  $\text{m} \rightarrow \text{cm}$

$A$  = área de secção transversal  $\text{m}^2 \rightarrow (\text{cm}^2)$

$$z = \rho \cdot \frac{l}{A}; \quad \Omega = \rho \frac{\text{cm}}{\text{cm}^2}; \quad \rho \cdot \text{cm} = \Omega \cdot \text{cm}^2; \quad \rho = \Omega \cdot \frac{\text{cm}^2}{\text{cm}} = (\Omega \cdot \text{cm}) \quad (4.8)$$

Através da variação de temperatura, formam-se diferentes gráficos no diagrama de Nyquist. O diagrama de Nyquist consiste em uma série de pontos, cada um representando a grandeza e a direção do vetor de impedância para determinada frequência particular. É um plano complexo real e imaginário de coordenadas

cartesianas em que temos a abscissa na parte real e a ordenada na parte imaginária (termos capacitivos ou indutivos) (Ribeiro et al., 2015).

Com o aumento de temperatura, diminui a resistividade, pois aumenta a mobilidade das cargas. Caso o diagrama apresente mais de uma fase, tem-se a representação do contorno dos grãos, resistência do grão, etc. Cada ponto no gráfico representa a impedância em uma única frequência, de maneira que o eixo das abscissas corresponde à componente resistiva do sistema, enquanto que o eixo das ordenadas representa a componente capacitiva ou indutiva. No entanto, a dificuldade está na correta interpretação dos dados adquiridos. Conforme Piva (2014): “O resultado apresentado define somente a relação entre a voltagem aplicada e a corrente resultante, através do sistema em estudo, como uma função da frequência. A natureza física do sistema, monocristal, policristais, interfaces e contornos de grãos bloqueantes e não bloqueantes, e suas propriedades elétricas, isto é, condutores iônicos, eletrônicos ou mistos, devem ser considerados”.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE BRITAGEM E MOAGEM DOS ISOLADORES

A britagem no britador de mandíbulas de rolos foi bastante fácil, já que as amostras não mostraram resistência à cominuição. Os isoladores tiveram quebra praticamente imediata (em ~5s). Com um tamanho inicial de aproximadamente 100 mm × 120 mm foram reduzidos a 5 mm × 10 mm.

Após 3 passagens pelo britador de rolos, devido à forma geométrica de alguns fragmentos, não foi possível a cominuição completa, acumulando no total 900 g de material (retido) na peneira ABNT 10 (abertura de 2 mm). Portanto, do total de ~12 kg (10 isoladores elétricos), 11kg foram produzidos, estimando-se 100 g de perdas.

Após a passagem pelo britador de rolos, o material foi moído no periquito, mostrando uma moagem rápida em ciclos de 20 minutos com esferas de alumina. O resultado alcançado foi um pó 100% passante na peneira de malha de 270 *mesh* (abertura de 53µm).

De um modo geral, pode-se dizer que o modo de cominuição dos isoladores, em britadores e moinhos laboratoriais, foi equivalente à das matérias-primas cerâmicas, como rochas feldspáticas. A mesma rotina de operação empregada na preparação das rochas cerâmicas foi utilizada na cominuição dos isoladores, sendo a mesma aprovada para esse material.

### 5.2. AVALIAÇÃO DA NECESSIDADE DA RETIRADA DO ESMALTE PARA A RECICLAGEM

No isolador elétrico é utilizado um esmalte de coloração marrom sobre o corpo de porcelana triaxial, corresponde à norma padrão utilizada. O esmalte proporciona uma série de vantagens à peça como, proteção diante de infiltrações, reduz a difusão e a degradação de material, diminui a presença de correntes de fuga, promove o aquecimento da superfície (evitando a presença de umidade) e permite uma distribuição homogênea da tensão. Sobretudo, o esmalte possui uma resistividade menor do que o corpo de porcelana, entre  $10^4 \Omega$  e  $10^9 \Omega$ , de modo que sua utilização seria uma vantagem, considerando-se essa propriedade. Por outro lado, o esmalte é um material de maior fusibilidade que o corpo, o que poderia prejudicar a sinterização

da peça, possivelmente, propiciando uma maior porosidade e, até mesmo, a formação de bolhas. Face a essas propriedades peculiares, questionou-se a necessidade de se retirar o esmalte na reciclagem dos isoladores de porcelana.

Como resultado da britagem, algumas partículas apresentam esmalte, mas a maior parte, proveniente do corpo cerâmico, não tem esmalte. Portanto, no momento da britagem, algumas partículas quebram, ficando o esmalte aderido a elas. Esse comportamento era esperado, devido a maior resistência que o esmalte produz na interface esmalte-corpo, uma vez que o esmalte preenche a porosidade nessa interface. Em princípio, essas partículas com esmalte poderiam ser separadas, manualmente, em laboratório, ou, possivelmente, de forma mecanizada em uma indústria.

As composições químicas do corpo de porcelana e de partículas do corpo com esmalte aderido (partículas da superfície do isolador), após a separação manual, foram obtidas por meio da análise em fluorescência de raios X, conforme a Tabelas 5.1.

Tabela 5.1: Composição do corpo dos isoladores elétricos e de partículas da superfície do corpo com o esmalte.

<b>Óxidos / Teor (%)</b>	<b>Corpo dos Isoladores</b>	<b>Corpo + Esmalte</b>
SiO <sub>2</sub>	68,5	73,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,8	18,8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,63	0,92
K <sub>2</sub> O	3,1	3,7
MgO	1,3	0,31
MnO	0,05	0,08
Na <sub>2</sub> O	1,8	1,3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07	0,10
CaO	0,83	0,67
TiO <sub>2</sub>	0,14	0,29
Outros	0,28	0,25
Perda Fogo	0,50	0,58

Como pode ser visto na Tabelas 5.1, a composição de ambos os materiais, corpo sem esmalte e corpo com esmalte, é bastante próxima. Testes preliminares realizados de gresificação, como dito anteriormente (Materiais e Métodos), não mostraram diferenças nas propriedades dos corpos de prova, com ou sem esmalte, alcançando índices de absorção de água muito semelhantes. Diante dos resultados,

não é recomendada a separação das partículas com o esmalte, a qual teria que ser realizada por seleção manual após a britagem, ou mediante um equipamento a ser desenvolvido/adaptado.

### **5.3. PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS DAS PORCELANAS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE QUEIMA**

#### *5.3.1 Absorção de Água, Retração Linear, Porosidade Aparente e Densidade Aparente*

Os resultados da caracterização inicial dos corpos de prova, considerando-se a absorção de água, a retração linear, a porosidade e a densidade, são mostrados na Tabela 5.2 para as três formulações estudadas. As Figuras 5.1 a 5.3 apresentam as curvas de gresificação, por meio das quais foram discutidas as propriedades de queima dos materiais testados. Observa-se que as Formulações A, B e C possuem 0%, 20% e 40% de porcelana reciclada, respectivamente (ver Tabela 4.3).

A Tabela 5.2 mostra os resultados da medição das propriedades das três formulações estudadas nos corpos de prova prensados e queimados. A temperatura de sinterização ideal é considerada aquela em que a absorção de água atinge valores menores que 0,5%. Isso é particularmente importante para porcelanas elétricas, uma vez que a porosidade deprecia as propriedades de isolamento elétrico e de resistência mecânica de uma peça. Pode-se observar que a Formulação C alcança esse índice de absorção na temperatura de 1300°C, a formulação B em 1450°C, e a formulação A só em 1600°C. Portanto, o aumento da quantidade do resíduo de isolador propiciou uma significativa redução da temperatura de gresificação das peças. Esse fato mostra claramente o efeito fundente do material reciclado, ao substituir o quartzo (Formulação B) e o quartzo e a alumina (Formulação C).



Tabela 5.2: Absorção de água, retração linear, porosidade aparente e densidade aparente das formulações A, B e C.

Temperatura (°C)	Absorção de água (%)	Retração linear (%)	Porosidade aparente (%)	Densidade aparente (g/cm <sup>3</sup> )
Formulação A				
1300	11,9±1,02	4,59±0,28	24,03±2,66	2,20±0,11
1350	11,01±0,53	5,0±0,18	24,10±1,12	2,21±0,04
1400	9,23±0,39	6,48±0,06	20,18±0,78	2,28±0,01
1500	4,43±0,20	7,9±0,23	9,85±0,51	2,39±0,08
1600	0,33±0,03	9,1±0,19	0,71±0,08	2,48±0,12
Formulação B				
1300	4,78±0,32	8,95±0,06	10,39±1,43	2,17±0,29
1350	3,39±0,12	9,87±0,15	7,88±0,28	2,32±0,01
1400	2,25±0,41	10,7±0,32	5,32±1,30	2,50±0,07
1450	0,48±0,03	9,01±0,11	1,21±0,11	2,36±0,23
Formulação C				
1300	0,42±0,04	10,12±0,08	0,99±0,19	2,36±0,32
1350	0,21±0,05	9,45±0,11	0,5±0,12	2,39±0,06
1375	0,36±0,08	7,60±0,16	0,76±0,17	2,25±0,02
1400	0,84±0,04	6,34±0,23	1,89±0,04	2,15±0,06

A formulação C, começa a mostrar efeitos de sobrequeima, com o aumento da absorção de água e a diminuição da retração de queima, a partir da temperatura de 1375°C, sendo essa sobrequeima mais acentuada em 1400°C. Esse fenômeno é conhecido como “inchamento” (*bloating*) da peça devido ao aumento de tamanho de poros. As formulações A e B mostraram uma contínua diminuição da absorção de água e aumento da retração de queima. No entanto, a formulação B apresentou uma pequena diminuição da densidade na queima de 1400°C para 1450°C, mas predominando ainda a sinterização, com significativa redução da absorção de água entre essas temperaturas.

O aumento de temperatura de queima reflete diretamente a diminuição da porosidade aberta das peças, a qual é medida por meio da absorção de água. Isso é um comportamento esperado de materiais que utilizam silicatos em sua formulação, os quais formam fase vítrea em consequência da reação com os álcalis presentes.

Portanto, a proporção de álcalis e de silicatos (incluindo os aluminossilicatos) pode ser relacionada com a temperatura de queima ideal.

A queima em temperaturas mais elevadas, além da chamada temperatura ideal de queima, pode causar o aumento da absorção de água, como foi o caso da formulação C, chegando a 0,86% em 1400°C, não justificando a queima nessa temperatura. O aumento da porosidade aberta é explicado como consequência da diminuição da viscosidade e da decomposição de sais e óxidos, permitindo que elementos mais voláteis saiam da peça. Alguns autores relatam a decomposição do óxido férrico, liberando o oxigênio gasoso ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{FeO} + \text{O}_2$ ) (KOBAYASHI, 1992; CARTY, 1999). O  $\text{O}_2$  tem um volume molar considerável e, ao sair da peça, “força” seu caminho, gerando um poro aberto. Por outro lado, os gases e vapores, presentes na fase vítrea, que formam a porosidade fechada, tendem a aumentar de volume em consequência do aumento de temperatura. Essa pressão interna pode ser suficiente para vencer a viscosidade e aumentar o volume da peça (CARTY, 2002).

Os dados de absorção de água e retração linear em relação a temperatura de queima formam a curva de gresificação (Figuras 5.1 a 5.3). Essa curva mostra o intervalo de temperatura de queima que pode ser utilizado para a produção das peças de cada formulação. Quanto mais amplo for o intervalo de queima, mais fácil será a produção do material, pois serão produzidas peças com propriedades semelhantes, até mesmo, quando variam um pouco as condições térmicas de um forno.

A Formulação A (Figura 5.1) atingiu a gresificação desejada em uma temperatura bastante elevada – 1600°C. Como essa temperatura é considerada alta para produção de uma porcelana elétrica, não foram realizados testes em maiores temperaturas. Como o valor de absorção de água é elevado a 1500°C, e conforme a tendência mostrada na Figura 5.1, é bastante provável que essa formulação não atinja o valor de absorção <0,5% em uma temperatura significativamente menor que 1600°C (por exemplo, em 1550°C).

Na Figura 5.2, é mostrada a gresificação da Formulação B. A temperatura em que foi alcançada a absorção <0,5% é considerada aceitável para a queima rápida desse produto; no entanto, outros trabalhos (CHINELLATO, 2004; BONETTI, 2009) mostraram menores temperaturas de queima, em diferentes condições experimentais. Como a retração linear na queima em 1450°C é um pouco menor do que em 1400°C, provavelmente, a queima atingiu a temperatura máxima. Portanto, a temperatura ideal de queima dessa formulação é entre 1400 e 1450°C. Em face disso, o intervalo (ou

janela) de queima é muito reduzido para a produção industrial e alguns ajustes na composição devem ser feitos para melhorar a performance dessa formulação. Por exemplo, pode-se trocar de feldspato ou alterar a proporção dos componentes da formulação.

A Formulação C (Figura 5.3) mostrou o melhor comportamento de gresificação em relação às outras formulações estudadas. Primeiro, a temperatura para uma absorção de água <0,5% foi consideravelmente menor e bastante atrativa para queima desse tipo de produto. Por exemplo, Norton (1987) apresentou a queima industrial em ~1326°C por 24 horas, e Bonetti (2009), a queima em 1250°C por 30 horas em forno industrial. Na queima rápida em laboratório, Chinellato (2004) relatou como a melhor condição de queima em 1350°C. Em segundo lugar, o intervalo de queima de 1300 a 1375°C foi bastante amplo para a produção de peças com a Formulação C.

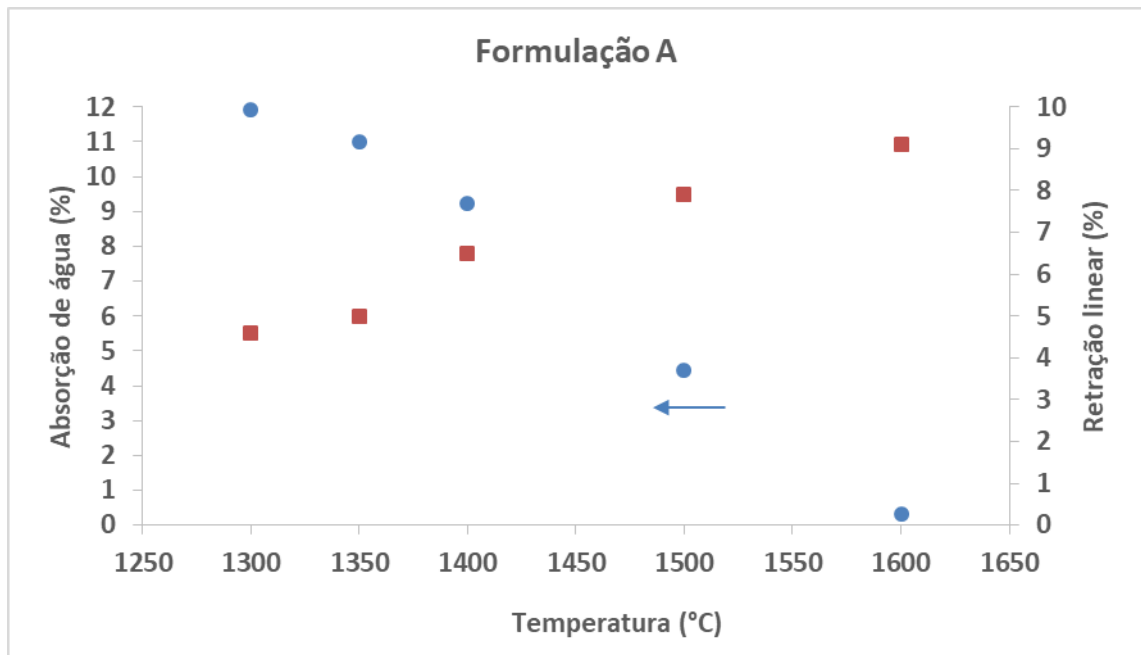


Figura 5.1: Formulação A. Curva de gresificação.

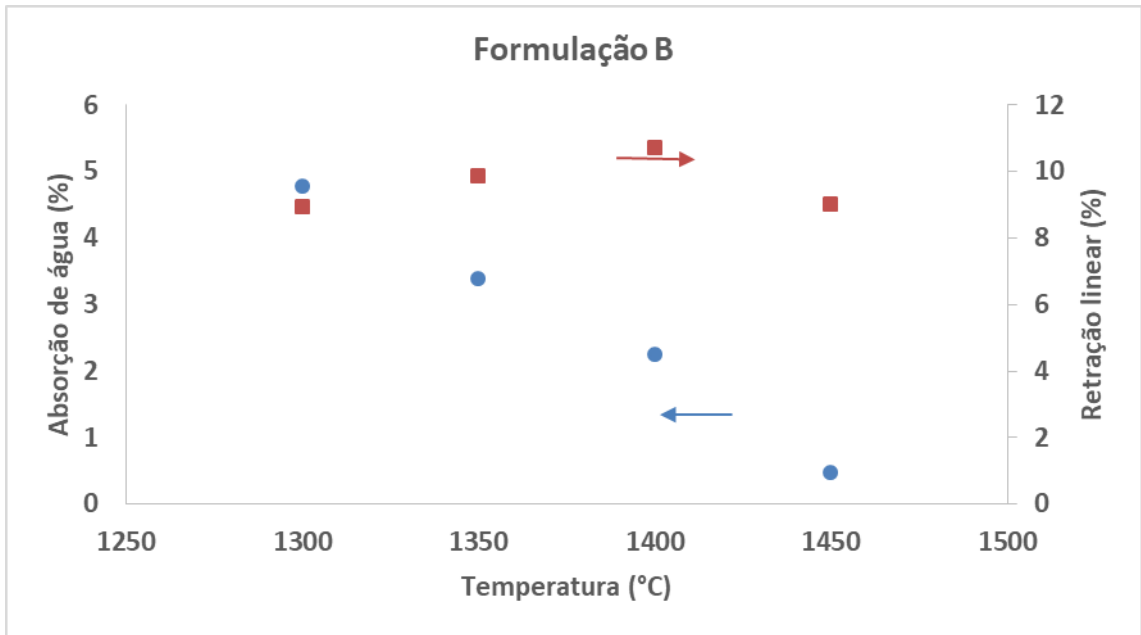


Figura 5.2: Formulação B. Curva de gresificação.

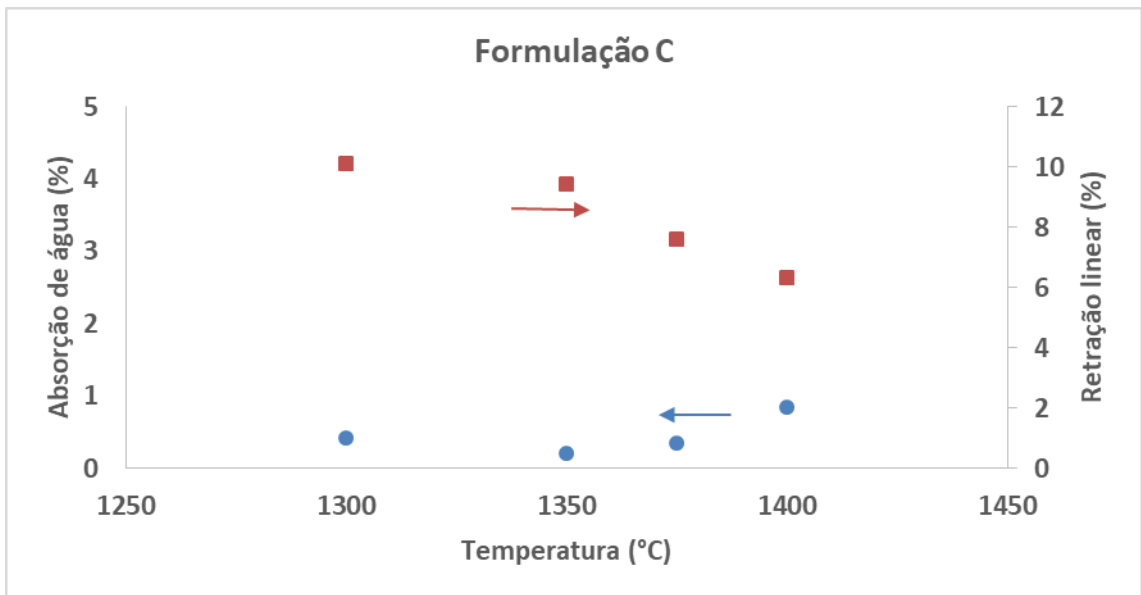


Figura 5.3: Formulação C. Curva de gresificação.

A densidade das peças produzidas com as três formulações em relação a temperatura de queima é comparada na Figura 5.4. Normalmente, almeja-se a densificação máxima na queima de um material, já que as maiores resistências mecânicas são obtidas nas maiores densidades. As maiores densidades foram obtidas com as Formulações B e C, porém, isso foi alcançado em maiores temperaturas que a Formulação C. Essa formulação apresentou a vantagem de atingir

praticamente a mesma densidade da Formulação B, considerando-se o erro experimental, mas como uma redução de 50°C na temperatura de queima. Como é conhecido, as maiores densidades coincidem com as maiores retrações do corpo de prova, como mostrado na Tabela 5.2.

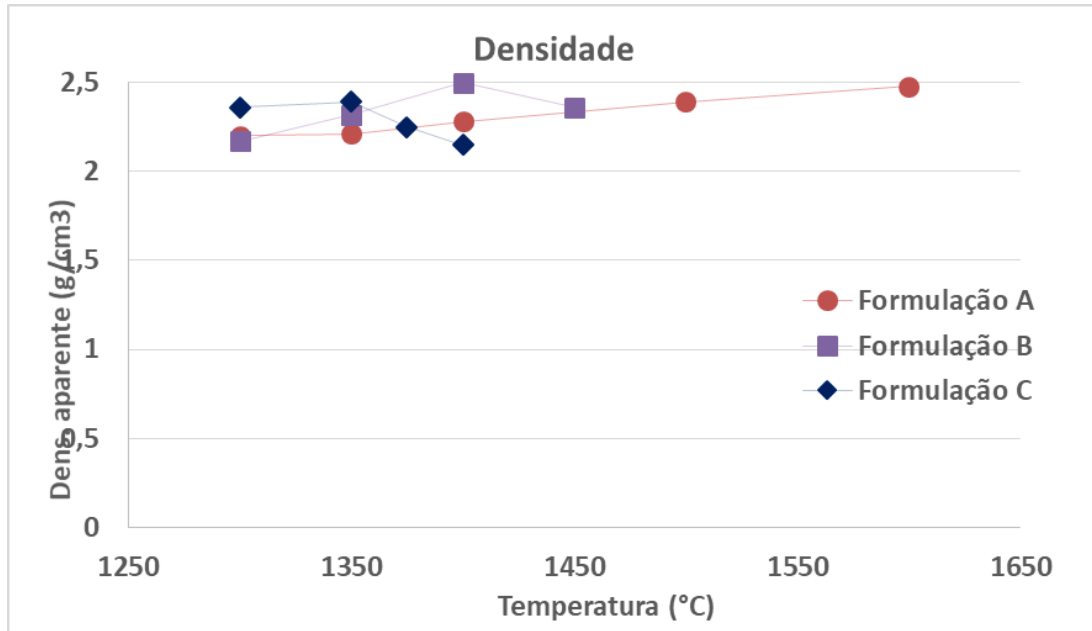


Figura 5.3: Formulações A, B e C. Densidade em função da temperatura.

A porosidade aparente mostrou o comportamento esperado em relação à elevação da temperatura de queima, acompanhando o aumento da retração das peças e a redução da porosidade aberta (absorção de água). A formulação C apresentou um pequeno aumento da porosidade na queima em 1400°C. Como ocorreu uma baixa variação da absorção de água, comparando-se com a queima em 1375°C, pode-se supor que houve um incremento da porosidade, em consequência do fenômeno de *bloating*, mencionado anteriormente.

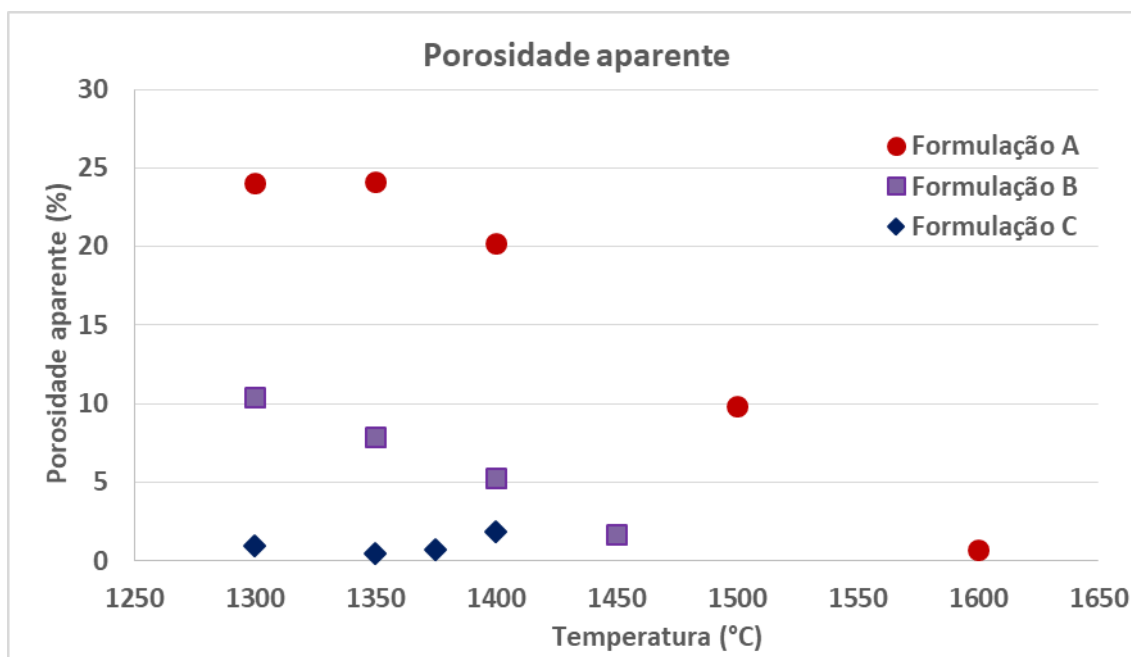


Figura 5.4: Formulações A, B e C. Porosidade aparente em função da temperatura.

### 5.3.2 Resistência Mecânica

A Tabela 5.3 e a Figura 5.5 apresentam a resistência mecânica à flexão dos corpos de prova produzidos com as três formulações estudadas. As maiores resistências alcançadas em cada formulação foram superiores a de 50 MPa – valor recomendado para peças não esmaltadas de isoladores elétricos, conforme a Norma IEC – 60672 (1995). Segundo essa norma, a classificação de porcelanas não esmaltadas à base de quartzo e com teor de 33 a 35% de alumina é da classe C 110.

As maiores resistências mecânicas foram obtidas nas temperaturas de maior gresificação, ou seja, em que as peças atingiram os menores índices de absorção de água e as maiores densidades, com exceção da formulação B, na qual a densidade máxima oscilou dentro do intervalo de valores do desvio padrão nas temperaturas de 1400 e 1450°C. Em face disso, pode-se afirmar que a maximização da resistência mecânica depende principalmente de uma boa queima, uma vez que o tamanho de defeito crítico se relaciona diretamente com a porosidade aberta da formulação.

Ao se comparar as três formulações, observa-se que, em ordem crescente, a resistência mecânica máxima foi:

## Formulação C &lt; Formulação B &lt; Formulação A

Assim, considerando-se uma absorção de água <0,5%, nota-se que existem outros fatores que influenciaram a tenacificação dos materiais. A ordem apresentada se relaciona com a diminuição da quantidade do isolador reciclado, de 40% (Formulação C), 20% (Formulação B) e 0% (Formulação A). Portanto, a adição de isolador reciclado, em substituição ao quartzo e à alumina, aumenta a fundência da massa, o que favorece a gresificação em menores temperaturas de queima (Tabela 5.2), no entanto, essa adição leva à redução da resistência mecânica, possivelmente, devido à diminuição das fases mais refratárias, como as partículas de quartzo e de alumina.

Tabela 5.3: Resistência mecânica das formulações A, B e C.

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>RM (MPa)</b>
<b>Formulação A</b>	
1300	24,05±3,02
1350	24,87±2,87
1400	28,40±2,85
1500	41,39±4,98
1600	61,02±5,09
<b>Formulação B</b>	
1300	20,71±1,75
1350	40,53±3,29
1400	45,74±5,22
1450	58,08±6,24
<b>Formulação C</b>	
1300	45,75±7,78
1350	54,35±5,15
1375	42,50±2,01
1400	42,10±8,47

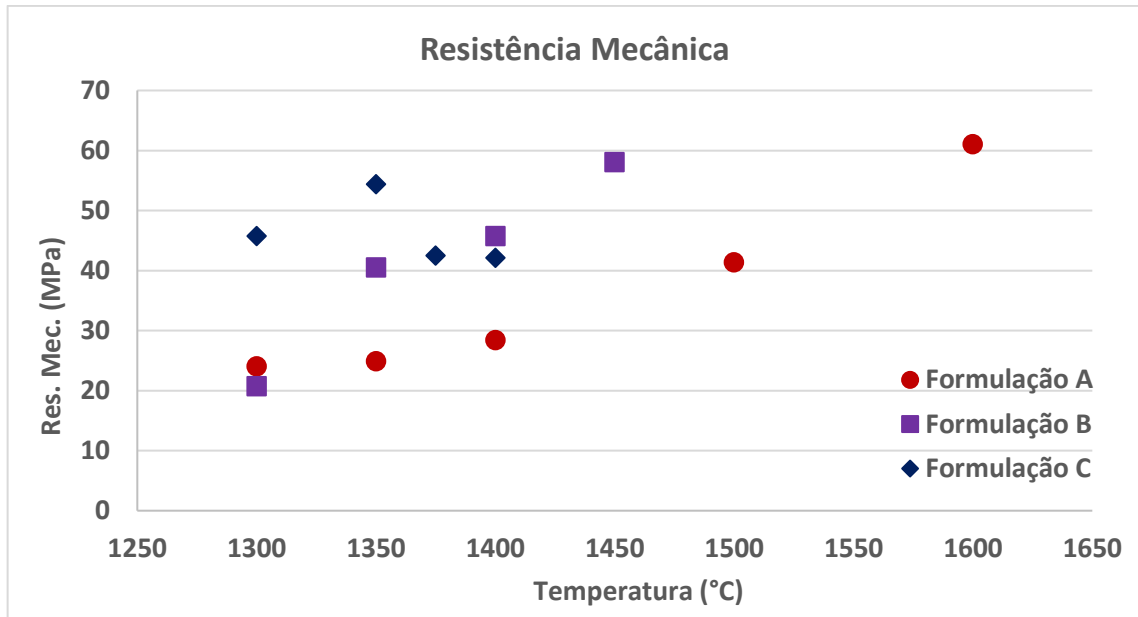


Figura 5.5: Formulações A, B e C. Resistência mecânica em função da temperatura.

Ao se observar a Figura 5.5, nota-se que as Formulações A e B alcançaram as maiores resistências e, praticamente, a mesma resistência máxima. Porém, a formulação B atingiu sua resistência máxima em uma temperatura de 150°C abaixo da Formulação A. Já quando se compara a Formulação A e C, nota-se que um aumento de 250°C foi necessário para se obter um pequeno aumento de resistência na Formulação A, em relação a resistência da Formulação C. É claro que são possíveis quase que infinitas combinações de diferentes teores dos componentes em uma formulação, mas, para esses valores alcançados de resistência mecânica, basicamente, deve-se priorizar a gresificação das peças. Em face disso, o uso do isolado reciclado se mostrou uma opção bastante interessante na composição de massas para isoladores de porcelana da classe C 110.

#### 5.4. CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES ELÉTRICAS DAS PORCELANAS

O teste de resistividade foi realizado após a queima dos corpos de prova na temperatura de 1350°C. O teste de resistividade foi realizado também com a formulação C queimada em 1400°C, denominada Formulação CC. Nessa condição,



essa formulação apresentou uma densidade menor, em consequência do início de sobrequeima, como explicado anteriormente (Tabela 5.2).

Devido aos ruídos e interferências a temperaturas abaixo de 300°C, como aferido por meio dos dados obtidos de tensão (V) e corrente elétrica (A), calculou-se os valores referentes à resistividade em temperatura ambiente (25°C) com o auxílio da fonte de alta tensão modelo Keithley 237. Nessa, utilizou-se a capacidade máxima de 1000VA e verificou-se as variações de tensão e corrente. Com os resultados de resistência elétrica, mediu-se a área de secção transversal e a espessura das amostras, convertendo na unidade  $\Omega.cm$ :

$l$ = espessura da amostra: m  $\rightarrow$  cm

$A$ =área de secção transversal  $m^2 \rightarrow (cm^2)$

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}; \quad \Omega = \rho \frac{cm}{cm^2}; \quad \rho \cdot cm = \Omega \cdot cm^2; \quad \rho = \Omega \cdot \frac{cm^2}{cm} = (\Omega \cdot cm) \quad (5.1)$$

Por meio dos valores de corrente e tensão obtidos, chegou-se a uma resistividade de  $10^{11}$  ( $\Omega \cdot cm$ ). A resistividade de todas as formulações, na temperatura ambiente, é alta e na ordem de grandeza de isolantes elétricos comerciais. Com o aumento de temperatura, a resistividade diminui, pois aumenta a mobilidade entre as cargas, favorecendo o aumento de condutividade. As composições com resíduo apresentaram menor resistividade, apesar da menor porosidade, contudo, na temperatura de 25°C, os valores de resistividade são muito próximos para todas as formulações (Figura 5.6).

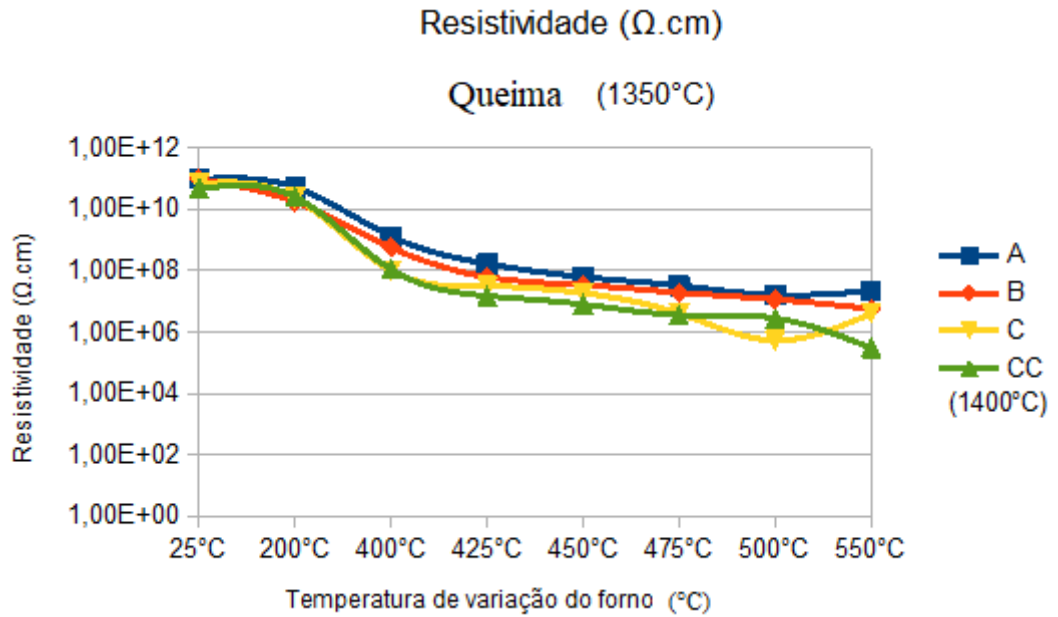


Figura 5.6: Resultado do Teste de Resistividade das Formulações A, B, C e CC, ( $\Omega \cdot \text{cm}$ ).

As Figura 5.7 a 5.9 apresentam os resultados referente a espectroscopia de impedância. Nesse teste, é verificada a influência do grão, contorno do grão e fase vítrea (BARSOUKOV et al., 2005). Em altas temperaturas os pontos ficam mais alinhados e pouco dispersos, formando uma semicircunferência.

A Figura 5.7 representa a curva de Nyquist da Formulação A. Observa-se a presença de um semicírculo que pode ser representado pelo circuito RC. O arco formado na Formulação A, aproximou-se de um capacitor com desvio  $n = 0,98$  na temperatura de 550°C. Essa amostra apresenta elevada resistividade, tal como já observado em corrente contínua, na ordem de  $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ , no entanto, é uma das amostras com maior porosidade. Em baixas frequências, os pontos se tornam dispersos devido às características e limites do equipamento.

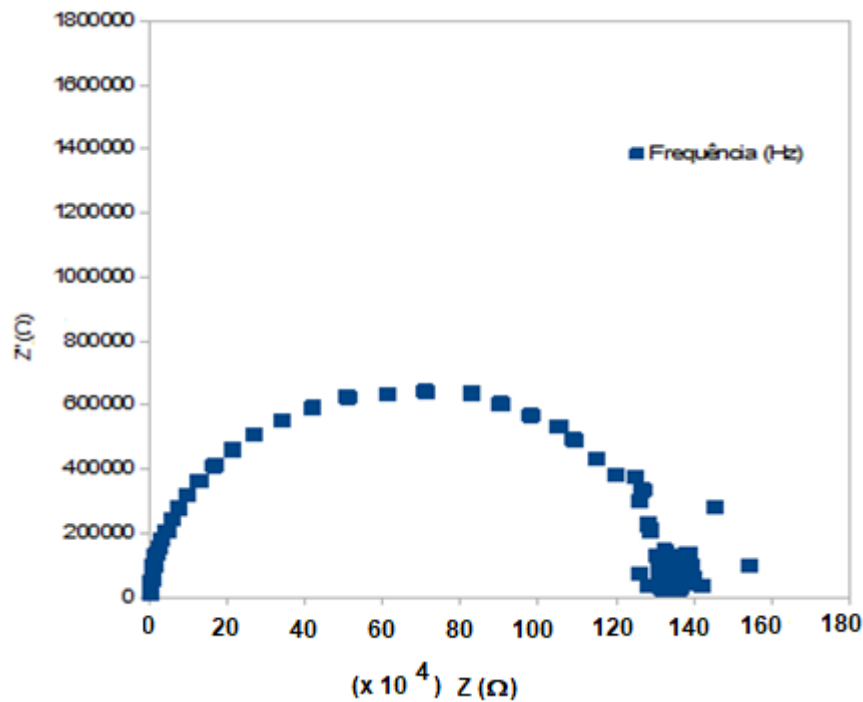


Figura 5.7: Arco de Impedância da Formulação A. Teste em 550°C.

Nas formulações B e C, a representação do gráfico da curva de Nyquist não apresentou uma circunferência perfeita, pois, em alta frequência, ocorre um comportamento de indutância. Isso é devido ao tipo de eletrodo usado, ou seja, da tinta de prata, a qual tende a se difundir na estrutura do material e interferir nos resultados de 550°C. As duas composições foram as que apresentaram menor resistividade elétrica. Além dos poros, o contorno dos grãos, o tamanho dos grãos, as fases formadas têm influência direta sobre a resistividade das amostras. A mulita, por exemplo, é um material que possui uma alta resistividade e pode influenciar nas características dielétricas, decorrente de alterações da microestrutura. Do mesmo modo, a fase vítrea pode interferir, uma vez que ela pode ser ou menos condutora, dependendo de sua composição química.

A formulação B (Figura 5.8) apresentou pontos dispersos, principalmente em baixas frequências. Em altas frequências ocorreu o desalinhamento no arco de impedância com baixa reatância capacitiva e características indutivas com  $n = 1,22$ , representando uma grande fração volumétrica. A amostra não se comportou como um capacitor ideal, ou seja, ocorreu diferença de defasagem. A diferença de defasagem pode ser calculada pelo valor ( $\epsilon_r \cdot \tan \delta$ ).

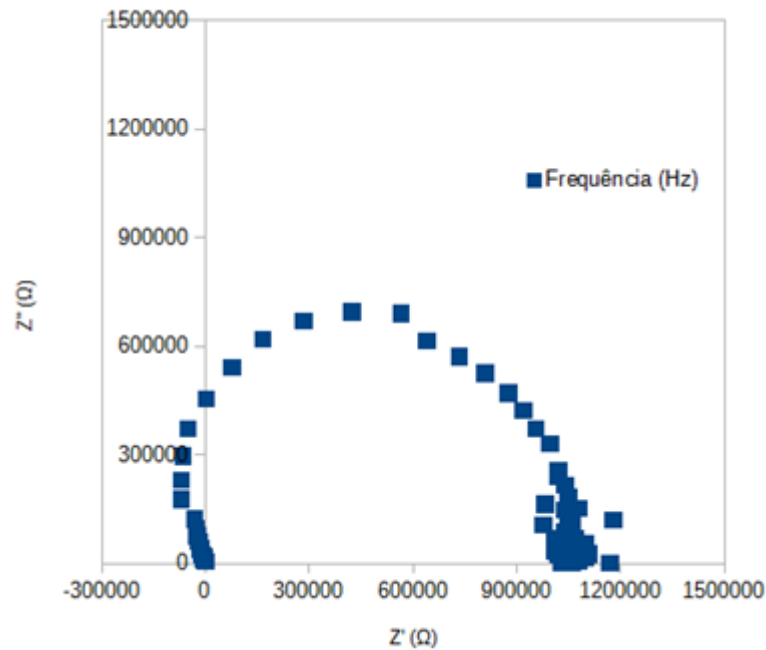


Figura 5.8: Arco de Impedância da Formulação B. Teste em 550°C.

A Formulação C (Figura 5.9) apresentou desvios indutivos similares à porcelana da Formulação B, com resistividade próxima a  $10^{11}$   $\Omega\text{cm}$ . A resistividade de uma porcelana elétrica de “alta tensão” elétrica deve ser superior a  $10^{12}$   $\Omega\text{cm}$ . Portanto, o produto da Formulação C, nesse estágio de desenvolvimento, é adequado apenas como um isolador de baixa tensão.

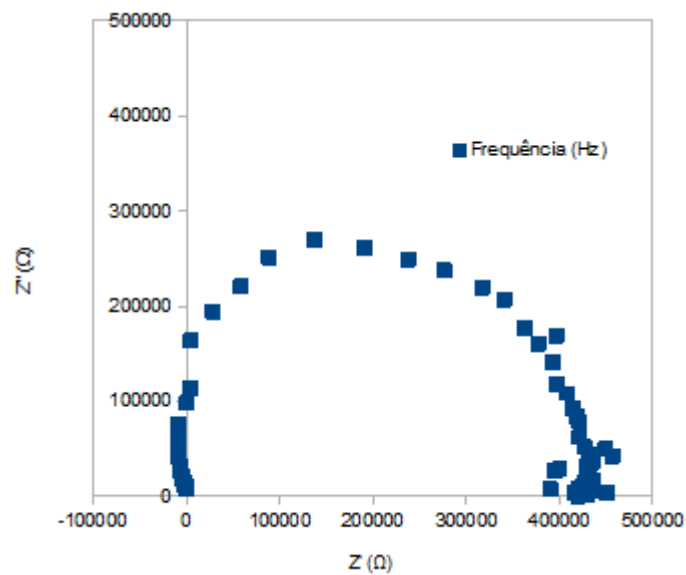


Figura 5.9: Arco de Impedância da Formulação C. Teste em 550°C.

A formulação A apresentou uma porosidade maior, em relação às outras formulações, de modo que se esperaria propriedades elétricas piores. Porém, a formulação A foi a porcelana que mais se aproximou com as características de um capacitor ideal, não apresentando características indutivas, e com “n” próximo de 1.

A formulação B, contendo 20% de isolador reciclado, apresentou uma resistividade levemente inferior à formulação “A”. Apesar do bom resultado em relação à oposição ao fluxo de cargas, a formulação não apresentou uma capacitância pura.

A amostra C, sinterizada a 1350°C, embora tenha ficado menos resistiva em relação às outras composições, apresentou menor porosidade e maior resistência à flexão, nessa temperatura de queima. Sob essa ótica, ela apresentou melhores propriedades para ser usada como isolador elétrico, mesmo com uma menor resistividade. Entretanto, pode-se concluir que a presença do isolador reciclado na composição não é favorável às propriedades elétricas, já que as outras formulações foram melhores nesse quesito, até mesmo, com uma porosidade mais elevada. De acordo com o formato das curvas de Nyquist, a menor resistividade da Formulação C pode ser atribuída às propriedades das fases, já que não se observou arcos referentes às interfaces, como demonstrado na literatura (Piva, 2014). Assim, a presença do isolador reciclado na formulação, diminuindo proporcionalmente o quartzo e/ou o quartzo e a alumina, contribui ao aumento da concentração de íons alcalinos (como o  $K^+$ ,  $Na^+$ ) que, sabidamente, aumentam a condutividade iônica da fase vítrea. Por outro lado, esse efeito não impede que a porcelana produzida com a Formulação C seja utilizada como isolador de baixa tensão.

## 6. CONCLUSÃO

Com os resultados obtidos no presente trabalho, é possível se inferir as seguintes conclusões:

A composição química das partículas geradas após a britagem, partículas do corpo e do corpo com o esmalte aderido, é bastante próxima. Além disso, os testes (preliminares) de gresificação não mostraram diferenças nas propriedades dos corpos de prova, com ou sem esmalte, alcançando índices de absorção de água muito semelhantes. Diante dos resultados, não é recomendada a separação das partículas na reciclagem dos isoladores usados.

O aumento da quantidade do resíduo de isolador em uma formulação, em substituição ao quartzo ou ao quartzo e à alumina, propiciou uma significativa redução da temperatura de gresificação das peças. A Formulação C alcançou um índice de absorção de água inferior a 0,5% na temperatura de 1300°C, a formulação B em 1450°C e a formulação A em 1600°C. Portanto, o material reciclado apresentou um efeito fundente, propiciando uma menor temperatura de queima à Formulação C. Esse efeito fundente é uma consequência direta da maior quantidade de álcalis na Formulação C, em razão da substituição das outras matérias-primas pelo isolador reciclado.

A Formulação C mostrou o melhor comportamento de gresificação em relação às outras formulações estudadas, já que a temperatura de 1300°C, para a absorção de água <0,5%, foi consideravelmente menor no teste de queima. Além disso, o intervalo de queima de 1300 a 1375°C foi mais amplo e é industrialmente viável para a produção de peças com a Formulação C.

As maiores resistências mecânicas, para todas as formulações estudadas, foram obtidas nas temperaturas de maior gresificação, ou seja, em que as peças atingiram os menores índices de absorção de água. Por conseguinte, pode-se afirmar que a maximização da resistência mecânica dependeu principalmente da eficiência do processo de queima.

A adição de isolador levou à redução da resistência mecânica, em decorrência da diminuição das fases mais refratárias, como as partículas de quartzo e de alumina. A resistência mecânica apresentou uma relação inversamente proporcional à quantidade do isolador reciclado, de modo que a Formulação A, sem a presença de

isolador, mostrou a maior resistência. No entanto, as Formulações A e B alcançaram praticamente a mesma resistência, mas a formulação B atingiu sua resistência máxima em uma temperatura de 150°C abaixo da Formulação A. A Formulação C obteve uma pequena redução de resistência em comparação com a Formulação A, mas com uma diminuição de 250°C na temperatura de queima. Em face disso, o uso do isolado reciclado pode ser considerado uma opção bastante interessante na composição de massas para isoladores de porcelana da classe C 110.

A amostra C apresentou uma menor resistividade em relação às outras composições, considerando a queima de todas as formulações em 1350°C. Portanto, a presença do isolador reciclado na composição da massa não foi favorável às propriedades elétricas, até mesmo quando comparadas com formulações com uma porosidade mais elevada. De acordo com o formato das curvas de Nyquist, a menor resistividade da Formulação C pode ser atribuída às propriedades elétricas das fases, principalmente da fase vítrea. A presença do isolador reciclado na formulação, e, conseqüentemente, a redução da quantidade do quartzo e/ou de quartzo e da alumina, contribuiu ao aumento do teor de íons alcalinos (como o  $K^+$ ,  $Na^+$ ), os quais aumentam a condutividade iônica da fase vítrea. No entanto, a resistividade é suficientemente elevada para que a porcelana produzida com a Formulação C seja utilizada como isolador de baixa tensão.

## **7. SUGESTÃO PARA OS PRÓXIMOS TRABALHOS**

Produzir outras formulações com diferentes teores de isolador elétrico usado, procurando-se otimizar as propriedades mecânicas e elétricas, a partir do estudo desenvolvido nesse trabalho.

Desenvolver um isolador elétrico esmaltado e caracterizar suas propriedades elétricas em condições similares às da prática.

Realizar a caracterização microestrutural do material produzido, comparando-se com materiais comerciais.



## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASKELAND, D.R.; WRIGHT, W.J; Ciência e Engenharia dos Materiais. 3º edição, 2015.

BARSOUKOV, E., MAC DONALD, J.R., Impedância Spectroscopy: Theory Experimental André Application. 2005.

BELHOUCHE et al., Improcedente oficial mechanical and dieletric properties of porcelain insulators using economic raw materials. Boletim de la Sociedad (Espanhola) de cerâmica y Vidrio 58 (2019) 28-37.

BERALDO, J.L., Moagem de minérios em moinhos tubulares – pró-minerio. São Paulo. Edigard (Blucher).1987.

BOND, F.C.; The Third Theory of Comminution Transactional of The American Institute of Mining André Metalúrgica Ltda Engineering. V.193., p.484-494.

BONETTI, A.N., TOMEELIN, J.C., ALARCON, O.E., OLIVEIRA, A.P.N., HOTZA, D., Desenvolvimento de porcelana de quartzo para isoladores elétricos de alta tensão. São Paulo.v.7; n.2, p. 187-194, 2009.

BUCHANAN, R. C. Ceramic Materials for Eletronics- Processing, Properties and Applications. 2º Ed. New York, 1986.

CABUSSU, M.S.; CERQUEIRA, D.P.; SILVA CHAVES, C.S.; Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia, Salvador BA, 2008.

CAVALCANTE et al., Fatores chaves na residência a abrasão de pisos de grés porcelanato UFRJ, CNR-STEC. Faenza (Itália), 2003.

CARTY, W.M., SENAPATI, U., Porcelain—raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior, J. Am. Ceram. Soc. 81(1998) 3–20.

CHINELATTO, A.L.; SOUZA, D.P.F.; “Porcelanas elétricas aluminosas: Parte II – Desenvolvimento da Microestrutura e sua Influência no Módulo de Ruptura”. Cerâmica. V.50, n.315. pp. 172-184, 2004.

CHO, Y.R.;YOON, K.H.; Dielétrico ceramics. Em Malwares HS., Editor, Handbook of advanced Electronic André Photonic Materials and Devices. New York. Acadêmicos Pressão, 4, 5 (2001) 175-199.

DELBONI, Jr.H., A load-interactive model of Autogenous and Semi-Autogenous Mill, Ph.D. Thesis. Universitário of Queensland, Austrália.1999.

FIGUEIREDO, J.M.P., FERNANDES, I.M.M., SILVA, V. J., NEVES, G.A., FERREIRA, H. C., SANTANA, L.N.L. Influência da composição e das variáveis de processamento de formulações ( a) base de argilas-uso em materiais refratários. *Cerâmica* 64 Campina Grande-PB (2018) 10-19.

GAUTAM, C.R., MADHESIYA, A. MAZUMDER, R. Preparation, crystallization, microestrutura and dielétrico properties of lead bismuth titanate borosilicate Glass ceramics, *J., Adv. Ceram.* 3 (2014) 194-206.

GERSON, R.; MARSHALL, T.C.; Dielétrico Breakdown of Porous Ceramics. *J. Appl. Phys.* 1959; 30 (11):1650.

Kingery, W.D., Bowen H. K., Uhlmann D.R., *Introduction to Ceramics*, 2a edição, Ed. Wiley, 1976.

LIEBERMANN, J., Avoiding quartz in alumina porcelain for high-voltage insulators. Part I. *Am. Ceram. Soc. Bull.* 80 (2001) 37–42.

MANTOVANI, V.A.; FRANCO, C. S. MANCINI, S.D.; HASEAGAWA, H.L.; GIANELLI, G.F.; BATISTA, V.X.; RODRIGUES, L.L.; Comparação de polímeros e cerâmicos de novos e descartados isoladores elétricos: possibilidades de reciclagem e reuso. *Revista matéria*, v.18, n.04, PP. 1549-1562.

MARTINS, R., Desenvolvimento de isolador polimérico inteligente. Curitiba 2015, tese Universidade Federal do Paraná-PPE 2015 p. 88-91.

MEDEIROS, S. G.; DUTRA, R.P.S.; GRILO, J.P.F. MARTINELLI, A. E.; PASKOCIMAS, C. A.; MACEDO, D. A. Preparação de comparação de compósitos alumina- militar de baixo custo via sinterização reativa entre uma argila caulinitica da Paraíba e hidróxido de alumínio. *Cerâmica* 62.222-271 (2016).

MEHTA et al., Influence of alumina and sílica addition on the physico-mechanical and dielectric behaviorismo of ceramics porcelana insulator att high sintering temperatura. *Boletim de La Sociedad Espana Lá de cerâmica y Vidrio* 57 (2018) 151-159.

Norma Ansi. American National Standard for Electrical Power Insulators—Test Methods ANSI/NEMA C29.1, 2018.

NORMA IEC 60672-3 Ed. 2.0 b IEC - International Electrotechnical Commission Ceramic and glass-insulating materials - Part 3: Specifications for individual materials 17/10/1997. <https://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=68050>

NORTON, F.H., *Cerâmica fina -Tecnologia y aplicações*. 3° Ed. Ediciones Omega S.A. Barcelona (1988) p. 384-404.

ORLOVA, R.G.; BESHENTSEV, J.K.; BOGDANIS, E.P.; Glass Ceram.45, 11/12 (1988) 466-469.

PIVA, D.H. Influência da atmosfera de sinterização sobre as propriedades elétricas de porcelanas aluminosas contendo diferentes concentrações de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2014. Dissertação de Mestrado UFRGS - PPGE3M.

PORTELLA, K. F.; PIAZA, F.; CABUSSU, MS.; INONE, P.C., CERQUEIRA, D.P.; and CHAVES, C.S.; Estudo dos efeitos de poluição atmosférica em isoladores de distribuição e métodos alternativos para minimiza-los [Relatório Final de projeto LALTEC/COELBA]. Curitiba: Institutos Lactec. 2007.

PORTELLA, K. F.; PIAZA, F.; INONE, P.C.; RIBEIRO JR., S.; Efeitos da poluição atmosférica (litoral e industrial) em isoladores da rede elétrica da região metropolitana de Salvador. Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba – PR.

QUEIRÓS, J.P.; Análise corporativa do comportamento dielétrico dos isoladores compósitos com isoladores em materiais convencionais - Universidade do Porto Tese Mestrado. 2013.

RIBEIRO, S.; RIBEIRO, G.C.; RODRIGUES, J.A.; Tenacidade a fratura de cerâmicas de carbetto de silício, alumina e argila vermelha pelos métodos iF e SEVNB. 2014; DEMAR.

RIBEIRO, S. RIBEIRO, G. C., RODRIGUES, J. A., Tenacidade a fratura de cerâmicos de carbetto de silício, alumina e argila vermelha pelos métodos F e SEVNB. Cerâmica 60 (2014) 509 – 515.

ROCHA, J. C.; JOHN, V.M.; Utilização de Resíduos na Construção Civil Habitacional, Porto Alegre (2003) volume 4. Editora Antac.

RODRIGUES, J.A., LEIVA, D.R., Engenharia de Materiais para Todos. EduFscar. São Carlos. 2010.

ROULA, A.; BOUDEGHDEGH, K.; BOUFABA, N.; Improving usual and dielectric properties of ceramics high voltagem isoladores. Cerâmica 2009. 55: 206 - 208.

SARAIVA, D.B.; Isolantes e dielétricos, in Materiais Elétricos, Rio de Janeiro. Guanabara Koogan 98. – 107. (1988).

SOUZA, F. J. P.; DAS NEVES, W.F.; ALARCON O.E.; Estudo da viabilidade de obtenção de isoladores elétricos a partir de resíduo de esmaltação. Cerâmica 50. 2004. 217 – 224. Florianópolis – UFSC.

SOUZA, D.F., NUNES, E.H.M., VASCONCELOS, D.C.L., VASCONCELOS, W.L., Preparação e caracterização estrutural de materiais cerâmicos obtidos via processo freeze-casting. *Cerâmica*. 62 (2016) 351-357.

SOUZA SANTOS, P., *Cerâmica e tecnologia nde argilas*. Edgard Bucher. São Paulo – SP (1989).

TAKEI, T., KAMESHIMA, Y., YASUMORI, A., OKADA, K., J. Eur. *Cerâmica.Soc.* 21. (2001). 2487 – 2493.

TEJADA, V.; PLEE, D.; *Study of CeramicFormulations for Electrical Insulators* (2015).

TROMBINI, V., BRESSIANI, A.H.A., PALLONE, E.M.J.A, TOMASI, R., Otizacao dos processos de moagem e secagem do pó de alumina, TiC obtido por moagem reativa. UFSCar, S.Carlos – SP. Brasil. *Cerâmica* 57 (2011) 416 – 421.

VINCENZINI, V., *Fundamentals of Ceramic Engineering*. Elsevier Applied Science LTD. New York (1991) p. 27 – 50.

VLACK, L.H.V. *Princípio da Ciência dos Materiais*. Editora Edgard Blucher LTDA – 1970. 15° reimpressão – 2004. SP – Brasil.

ZAUBERAS, R. T.; GOMES, P.L.S.; DINIZ, C.A.R.; BOSCHI, A. O.; Planejamento estatístico de experimentos aplicado ao desenvolvimento de formulações para revestimentos cerâmicos. *Cerâmica* 50 (2004) 33 – 37 – DEMA. S. Carlos, SP.