



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE MATERIAIS



TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO

**ESTUDO DA MECÂNICA DA FRATURA DE UMA PORCELANA ELÉTRICA
FORMULADA COM RESÍDUO DE ISOLADOR ELÉTRICO**

Autor: Lucas LAPRESA RIBAS

Matrícula: 00213321

Professor Orientador: Prof. Dr. Saulo ROCA
BRAGANÇA

Porto Alegre, janeiro de 2024.

Lucas LAPRESA RIBAS

**Estudo da Mecânica da Fratura de uma Porcelana Elétrica Formulada com
Resíduo de Isolador Elétrico**

Trabalho de diplomação apresentado para o Departamento de Engenharia de Materiais da Escola de Engenharia da Universidade do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro de Materiais

Professor Orientador: Prof. Dr. Saulo ROCA
BRAGANÇA

Porto Alegre, janeiro de 2024.

Agradecimentos

Começo a agradecer aqui a todos que, de uma forma ou de outra, contribuíram para que fosse quem sou hoje, pessoal e profissionalmente;

Agradeço à Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) pelas oportunidades e vivências que tive dentro desta instituição, dentro e fora do curso de Engenharia de Materiais. O período universitário pode não ser linear, mas é sempre progressivo;

Ao Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER), que durante meus anos como bolsista de iniciação científica tive o prazer de conviver com boas pessoas no ambiente científico, em especial ao Felipe por ter me ajudado com os experimentos deste trabalho;

Aos meus colegas da Empresa Junior de Engenharia de Materiais (EME-Jr), com quem me desafiei como consultor e, juntos, entregamos diversos projetos de engenharia à comunidade.

Ao programa BRAFITEC – BRAFIMAT, que fomentou minha dupla diplomação junto à École de Mines IMT d’Albi e me proporcionou uma das experiências mais enriquecedoras de todo esse percurso

Às grandíssimas pessoas que pude encontrar nestes anos universitários e tive o privilégio de dividir diversos bons momentos. Cabe, em especial, um agradecimento ao Pedro L., Pedro F., Pedro D., João M., e Gabriel C. De nada adiantaria alcançar o cume da montanha e não poder dividir a vista com alguém;

Agradecer ao professor Saulo, que, sempre muito solícito ao longo desses anos, me apoiou na condução deste trabalho e durante meu período como bolsista, acreditou em meu potencial e me acolheu com todo seu carinho;

Há uma quantidade enorme de esforços que são feitos para a obtenção de tal conquista, muitos são feitos atrás das cortinas e, principalmente, por outras pessoas. Agradeço, então, à minha família, Gabriella, Renato e Nilseia, pois, não chegaria aqui, em hipótese alguma, sem a ajuda deles.

Resumo

A expansão e manutenção das redes de distribuição de eletricidade resultam na geração de consideráveis quantidades de resíduos, predominantemente na forma de isoladores descartados que, em sua maioria, não são reutilizados nem reciclados. Neste contexto, este trabalho estudou a mecânica da fratura e a influência da microestrutura e temperatura de queima nas propriedades mecânicas de uma formulação de isolador elétrico de porcelana de baixa tensão. Abordou-se a formulação de uma porcelana elétrica com 40% de resíduo de isoladores descartados, explorando suas propriedades tecnológicas e mecânicas em relação à temperatura de queima e microestrutura. O processo teve início com a coleta de um isolador elétrico descartado durante a renovação da rede elétrica no bairro Belém Novo, em Porto Alegre. Posteriormente, procederam-se à cominuição e à preparação de corpos de prova compostos por 40% de isolador, 40% de argila caulínica e 20% de feldspato. As matérias-primas foram submetidas à análise por meio das técnicas de FRX e DRX. A queima foi realizada em três temperaturas distintas: 1300°C, 1350°C e 1400°C. O controle do processo de queima foi monitorado por meio da curva de gresificação, com análise dos valores de absorção de água e retração linear, porosidade e densidade aparente. As propriedades mecânicas foram avaliadas por meio de ensaios de flexão e microdureza. Através de técnicas de MEV foi possível associar o comportamento observado à microestrutura. Os resultados revelaram baixa absorção de água (0,32% e 0,51% a 1350°C e 1400°C) indicando boa sinterização. As condições de queima exercem grande influência na resistência mecânica. Observou-se que o isolador descartado e a peça queimada a 1350°C possuem mesma dureza. As peças produzidas tiveram resistência mecânica inferior à norma vigente para isoladores elétricos de porcelana, ainda assim, existe o potencial para reciclagem de isoladores elétricos.

Palavras-chave: Isolador elétrico; porcelana; mecânica da fratura; reciclagem.

Abstract

Study of Fracture Mechanics in an Electrical Porcelain made from Electrical Insulator Waste

The expansion and maintenance of electricity distribution networks results in the generation of considerable amounts of waste, predominantly in the form of discarded insulators which, for the most part, are neither reused nor recycled. In this context, this work studied fracture mechanics and the influence of microstructure and firing temperature on the mechanical properties of a low-voltage porcelain electrical insulator formulation. The formulation of an electrical porcelain with 40% waste from discarded insulators was addressed, exploring its technological and mechanical properties in relation to firing temperature and microstructure. The process began with the collection of an electrical insulator discarded during the renovation of the power grid in the Belém Novo neighborhood of Porto Alegre. Subsequently, it was comminuted and specimens made up of 40% insulator, 40% kaolinitic clay and 20% feldspar were prepared. The raw materials were analyzed using XRF and XRD techniques. Firing was carried out at three different temperatures: 1300°C, 1350°C and 1400°C. Control of the firing process was monitored using the gresification curve, with analysis of the values for water absorption and linear shrinkage, porosity and apparent density. The mechanical properties were assessed using bending and microhardness tests. Using SEM techniques, it was possible to associate the behavior observed with the microstructure. The results showed low water absorption (0.32% and 0.51% at 1350°C and 1400°C), indicating good sintering. Firing conditions have a major influence on mechanical strength. It was observed that the discarded insulator and the piece fired at 1350°C have the same hardness. The pieces produced had lower mechanical resistance than the standard in force for porcelain electrical insulators, but there is still potential for recycling electrical insulators.

Keywords: Electrical insulator; porcelain; fracture mechanics; recycling.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	15
2.1. Objetivo Geral	15
2.2. Objetivos Específicos	15
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1. Materiais Cerâmicos	16
3.1.1. Matérias-primas plásticas	17
3.1.2. Matérias-primas não plásticas	18
3.1.3. Porcelana	20
3.2. Microestrutura Durante o Ciclo de Queima	20
3.3. Propriedades Mecânicas	23
3.3.1. Resistência Mecânica	23
3.3.2. Dureza	24
3.3.3. Tenacidade à Fratura	24
3.4. Propriedades Dielétricas	25
3.4.1. Resistividade Elétrica	26
3.4.2. Espectro de Impedância	27
3.5. Isoladores Elétricos	28
3.5.1. Um olhar sobre Redes de Transmissão de Energia	28
3.5.2. Degradação de Isoladores Elétricos	31
3.6. Formulação de Isoladores Elétricos de Porcelana	32
3.7. Influência da Composição e da Microestrutura em Propriedades Mecânicas	33
3.8. Influência da Composição e da Microestrutura em Propriedades Dielétricas	34
3.9. Reciclagem de Isoladores Elétricos	36
3.10. Estado da Arte	37
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	39
4.1. Materiais	39

4.2.	Métodos	42
4.2.1.	Formulação	43
4.2.2.	Cominuição do Isolador Elétrico	44
4.2.3.	Conformação dos Corpos de Prova	45
4.2.4.	Queima dos Corpos de Prova	46
4.2.5.	Ensaio de Flexão	47
4.2.6.	Teste de Porosidade e Ensaio de Arquimedes	48
4.2.7.	Ensaio de Microdureza Vickers.....	48
4.2.8.	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	49
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	51
5.1.	Curva de Gresificação, Porosidade e Densidade Aparente.....	51
5.2.	Resistência Mecânica.....	52
5.3.	Microdureza Vickers.....	54
5.4.	Tenacidade à Fratura.....	55
5.5.	Microestrutura.....	56
6.	CONCLUSÕES	59
7.	SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS	60
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61

Lista de Figuras

Figura 1 - Microestrutura de uma porcelana, exemplificando a estrutura de muitas primárias e secundárias. Obtida a partir de uma análise de Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV). (CRUZ, PEDRASSANI e BRAGANÇA, 2022)	20
Figura 2 - Volume ocupado pelas MPs na peça à verde e após a queima ($T = 1200^{\circ}\text{C}$). (CRUZ, PEDRASSANI e BRAGANÇA, 2022).....	22
Figura 3 - Esquema da Teoria das Bandas, mostrando os valores energéticos para bandas de condução e valência para metais, semicondutores e isoladores. (CARTER, NORTON, 2013).	25
Figura 4 – Esquema mostrando o espectro de impedância com um circuito elétrico equivalente (à esquerda) e a influência da temperatura na resistência medida (à direita). (LERDPROM, 2017).	27
Figura 5 - Exemplo de instalação de uma torre de distribuição de energia. Fonte: Internet – Site Freepik. Acessado em 18 de janeiro de 2024	30
Figura 6 - Portfólio de produtos para um distribuidor de isoladores elétricos de porcelana (CST Isoladores Santa Teresinha). Fonte: Internet - Site CST Isoladores. Acessado em 18 de janeiro de 2024	30
Figura 7 - Representação da influência das fases da porcelana no espectro de impedância. (PIVA, 2014)	36
Figura 8 - Isolador cerâmico do tipo pino reciclado no trabalho. Fonte: Internet - Site CST Isoladores. Acessado em 18 de janeiro de 2024	39
Figura 9 - Fases minerais do isolador reciclado obtidas através do Ensaio de DRX. Fonte: Autor	41
Figura 10 - Fases minerais do feldspato obtidas através do Ensaio de DRX. Fonte: Autor	41
Figura 11 - Fases minerais do caulim obtidas através do Ensaio de DRX. Fonte: Autor	42
Figura 12 - Framework da metodologia adotada no trabalho. Fonte: Autor	43
Figura 13 -Moinho tipo planetário utilizado para cominuição do isolador elétrico (LACER – UFRGS). Fonte: Autor.....	44
Figura 14 - Prensa hidráulica (à esquerda) utilizada na conformação dos corpos de prova (à direita) (LACER – UFRGS). Fonte: Autor.	46
Figura 15 - Forno industrial do tipo mufla utilizado para queima à 1350°C e 1400°C (à esquerda) (LACER – UFRGS) e forno industrial Carbolite utilizado para queima à 1300°C (à direita) (LABIOMAT – UFRGS). Fonte: Autor	47

Figura 16 - Ensaio de Flexão de 4 pontos utilizado no trabalho (LACER - UFRGS). Fonte: Autor	48
Figura 17 - Ensaio de Microdureza Vickers (LAMEF - UFRGS). Fonte: Autor	49
Figura 18 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (LACER - UFRGS). Fonte: Autor	50
Figura 19 - Curva de Gresificação da peça à 1350°C e 1400°C. Fonte: Autor.....	51
Figura 20 - Porosidade e densidade aparente da peça queimada à 1350°C e 1400°C. Fonte: Autor	52
Figura 21 - Resistência Mecânica das peças queimadas à 1350°C e 1400°C. Fonte: Autor	53
Figura 22 - Microestrutura do CP à 1350°C mostrando as indentações. Fonte : Autor..	56
Figura 23 - Microestrutura do isolador descartado (à esquerda) e CP queimado à 1350°C (à direita) com 100x de aumento. Fonte: Autor	57
Figura 24 - Microestrutura do isolador descartado (à esquerda) e CP queimado à 1350°C (à direita) com 500x de aumento. Fonte: Autor	57
Figura 25 - Microestrutura sem fase vítrea da peça queimada à 1350°C em diferentes magnitudes. Fonte: Autor.....	57
Figura 26 - Microestrutura sem fase vítrea do isolador descartado em diferentes magnitudes. Fonte: Autor	58

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Propriedade dielétricas sugeridas para um isolador de alta tensão (BUCHANAN, 1986)	26
Tabela 2 - Propriedades dielétricas de uma porcelana e seus componentes. (BUCHANAN, 1986)	27
Tabela 3 - Composição das amostras de porcelana com a adição de vidro reciclado (em peso %). (BELHOUCHE, BAYADI, BELHOUCHE E ROMERO, 2019).	37
Tabela 4 - Composição das amostras de porcelana com a adição de isolador reciclado (em peso %). (FERREIRA, 2021).....	38
Tabela 5 - Composição química das MPs obtida através da análise de FRX.....	40
Tabela 6 - Formulação empregada no trabalho	44
Tabela 7 - Medidas dos CPs à seco. Fonte: Autor.....	45
Tabela 8 - Densidade pré-queima dos CPs. Fonte: Autor	47
Tabela 9 - Absorção de água, retração linear, porosidade e densidade aparente após a queima. Fonte: Autor	51
Tabela 10 - Comparação com as resistências mecânicas obtidas no trabalho de Ferreira, L., Ribas, L., De Souza, V. C., Bragança, S. R., (2018). Fonte: (FERREIRA, RIBAS, DE SOUZA, BRAGANÇA, 2018).....	53
Tabela 11 - Propriedade mecânicas e físicas da peça queimada à 1300°C. Fonte: Autor	54
Tabela 12 - Valores de microdureza HV do isolador descartado e peça queimada à 1350°C. Fonte: Autor	54

Lista de Abreviações

Abreviação	Designação
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
CP	Corpo de Prova
DRX	Difração de Raios X
FRX	Fluorescência de Raios X
LACER	Laboratório de Materiais Cerâmicos
LAMEF	Laboratório de Metalurgia Física
LABIOMAT	Laboratório de Biomateriais
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
AA	Absorção de Água
RL	Retração Linear
PA	Porosidade Aparente
DA	Densidade Aparente
MP	Matéria-prima

1. INTRODUÇÃO

Os materiais cerâmicos são amplamente conhecidos por suas propriedades características, como baixa condução elétrica, baixa condução térmica e alta resistência mecânica (CARTER, NORTON 2013). Ainda assim, suas propriedades podem variar significativamente dependendo da composição química e da estrutura microscópica. (CALLISTER, RETHWISCH 2012). Isso permite que eles sejam adaptados para atender a uma ampla gama de aplicações, desde produtos tradicionais como tijolos, até produtos de alta tecnologia para aplicações aeroespaciais. Para desenvolver uma peça cerâmica, combina-se, geralmente, um material plástico, como a argila ou o caulim, com um fundente como o feldspato e com um refratário como o quartzo ou a alumina. Essa combinação é chamada triaxial cerâmico (CRUZ, PEDRASSANI e BRAGANÇA, 2022).

A porcelana é uma classe de materiais cerâmicos, caracterizada por excelentes propriedades dielétricas e resistência mecânica (CARTER, NORTON 2013). A microestrutura complexa da porcelana é resultado de reações químicas e transformações microestruturais desencadeadas durante o processo de queima das matérias-primas. Portanto, uma administração cuidadosa das quantidades de matérias-primas e uma compreensão aprofundada das reações durante a queima são cruciais para o desenvolvimento de peças cerâmicas de qualidade (CRUZ, PEDRASSANI e BRAGANÇA, 2022). Sabe-se que as presenças de mulita e de outras fases refratárias contribuem para aumentar a resistência mecânica da porcelana, enquanto a transformação do quartzo $\beta \rightarrow \alpha$ e a presença de fase vítrea têm o efeito oposto, diminuindo essa resistência. Técnicas avançadas de análise microestrutural, como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com Microanálise por Energia Dispersiva (EDS), e métodos tradicionais de análise de processamento, como a curva de gresificação, ensaio de flexão e microdureza, desempenham um papel fundamental no entendimento do comportamento desses materiais (CHINELATTO, DE SOUZA, 2004).

Devido a suas propriedades, a porcelana é o material mais escolhido, dentre as cerâmicas tradicionais, para a produção de isoladores elétricos (NORTON, 1970). Os isoladores elétricos apresentam, em geral, uma alta resistência mecânica e alta dureza, quando se substitui o quartzo por alumina (CHINELATTO, DE SOUZA, 2004), porém a baixa tenacidade ainda é um ponto a se levar em conta. Esses materiais, segundo a Teoria das Bandas Eletrônicas (RETHWISCH, CALLISTER, 2012), têm um amplo intervalo entre a banda de condução e a banda de valência, resultando em uma notável resistividade elétrica. Para atender aos padrões desejados, é crucial que esses isoladores possuam alta resistência à ruptura dielétrica, minimizem a perda de energia, quando submetidos à campos elétricos e exibam baixa constante dielétrica, evitando o acúmulo de cargas quando o campo elétrico é removido (BUCHANAN,

1986). Do ponto de vista microscópico, nas porcelanas, a fase vítrea emerge como a de menor resistividade, tornando-se a preferida para o deslocamento de íons. Por outro lado, as fases cristalinas, como mulita, quartzo e alumina, desempenham o papel de barreiras ao movimento iônico, bloqueando esses íons, especialmente na região de interface. Assim, o controle preciso dessas fases tem como resultado um aprimoramento significativo nos comportamentos dielétricos das porcelanas (PIVA, 2014).

O consumo de energia elétrica tem aumentado significativamente no Brasil e em outros países em desenvolvimento devido à rápida evolução das indústrias, à mudança no estilo de vida humano e à expansão das zonas urbanas. Por exemplo, nos últimos 20 anos, a demanda de eletricidade no Brasil cresceu a uma taxa média de cerca de 4% ao ano. Em 2021, a demanda total de energia elétrica foi de aproximadamente 495 TWh, um aumento significativo em relação às décadas anteriores. (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, 2022). Por isso, os setores de energia concentram esforços no desenvolvimento e aprimoramento da infraestrutura de fornecimento de energia. Nas redes de transmissão e distribuição elétrica, a aplicação de isoladores é essencial para evitar curtos-circuitos e interrupções no fornecimento, assegurando um fluxo controlado e seguro de energia.

O aumento da demanda por energia no Brasil traz desafios ambientais, mas o país está comprometido em equilibrar o crescimento econômico com a sustentabilidade. Apesar dos esforços para promover fontes de energia mais limpas e implementar medidas de eficiência energética, a modernização das linhas de distribuição gera grandes quantidades de resíduos (MANTOVANI et al., 2013). Um exemplo é a AES/Eletropaulo, que em 2011 descartou 677 toneladas de isoladores, representando cerca de 14% de todos os resíduos de sua rede de distribuição, sendo 87% na forma de isoladores cerâmicos (MANCINI et al., 2011). Isso destaca a necessidade de abordagens sustentáveis na gestão de resíduos na indústria de energia.

A geração significativa de resíduos na indústria de isoladores elétricos está associada à sua degradação, que pode ocorrer devido a trincas resultantes de fadiga térmica, aumento de carga mecânica, corrosão ou descargas elétricas, (FERREIRA, 2021). Essa degradação contribui para interrupções nas redes elétricas e desperdício de energia nas linhas de transmissão devido a correntes de fuga ou *flashovers*, fenômeno que se intensifica em ambientes salinos e poluídos (FONTANELLA et al., 2008). Particularmente em condições de alta umidade do ar, filmes condutores de eletricidade podem se depositar na superfície dos isoladores, levando a descargas elétricas mesmo em tensões nominais de operação. (LIEBERMANN, 2002). Para minimizar este fenômeno o isolador é coberto por um esmalte a fim de eliminar a superfície porosa e o acúmulo de água, (FERREIRA, 2021) (FONTANELLA et al., 2008). Além disso, inspeções

periódicas ou modificações na geometria do isolador são estratégias adicionais para minimizar esse problema (LIEBERMANN, 2002) (GENÇOĞLU, CEBECI, 2008.).

Os isoladores elétricos de porcelana são basicamente produzidos a partir de matérias-primas naturais, como argilas, feldspato, quartzo e alumina e inúmeras formulações já foram propostas a fim de atender as propriedades desejadas para isoladores de alta, média e baixa tensão. (NORTON, 1970) (BUCHANAN, 1986) (MERGA et al., 2019). Os estudos da influência da microestrutura nas propriedades mecânicas e dielétricas são amplos e oferecem um profundo entendimento sobre como manipular o processamento e escolher as matérias-primas a fim de se obter um isolador elétrico com as desejadas propriedades (MASLENNIKOVA et. Al, 1984) (KOBAYASHI et al., 1994) (CHINELATTO et al., 2004) (CHAUDHURI et. Al, 1999).

Casando o crescente entendimento sobre os isoladores elétricos de porcelana junto com o aumento de resíduo gerado pela indústria elétrica, estudos vêm sendo feitos a fim de propor rotas de reutilização e revalorização desses materiais. Por exemplo, a substituição da areia por resíduo de isoladores de porcelana descartados aumentou a resistência do concreto (PEREIRA et al., 2022) ou para uso como chamota ou cascalho na própria indústria elétrica (MANTOVANI et al., 2013) (OCAMPO et al., 2023)

A rota mais sustentável contudo, seria a da reciclagem, assim, a fabricação de novos isoladores elétricos a partir de isoladores descartados já foi estudada. (FERREIRA, 2021) (FERREIRA, RIBAS, DE SOUZA, BRAGANÇA, 2018). Foi observado que uma formulação de 40% de resíduo, 40% de caulim e 20% de feldspato, queimada à 1350°C produziram peças com resistência mecânica superior à Norma IEC 60672-3, e com resistividade elétrica compatível com isoladores de baixa tensão. O presente trabalho procura continuar esse estudo, avaliando as propriedades mecânicas, como a dureza e a tenacidade à fratura, e a microestrutura dos materiais.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo principal desta pesquisa é aprofundar a compreensão sobre a produção de isoladores elétricos de porcelana a partir do reaproveitamento de isoladores degradados. O foco está na análise das propriedades mecânicas, com ênfase na mecânica da fratura do material. Dessa forma, procura-se embasar a reciclagem com essas caracterizações de modo a garantir que com o reaproveitamento de resíduos sejam produzidas peças de alta performance mecânica.

2.2. Objetivos Específicos

Caracterizar as matérias-primas utilizadas no trabalho, destacando-se as propriedades do material reciclado.

Avaliar o processo de queima de porcelanas por meio da porosidade e densidade aparente, curva de gresificação e microestrutura.

Avaliar as propriedades mecânicas, como resistência à fratura, dureza e tenacidade à fratura das peças produzidas, comparando os valores de isoladores formulados com materiais reciclados com produtos comerciais e com a bibliografia.

Estudar a qualidade e o potencial dos isoladores como matéria-prima para a produção de cerâmicas triaxiais.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Materiais Cerâmicos

Os materiais cerâmicos são uma classe de materiais sólidos inorgânicos que são amplamente conhecidos por suas propriedades características como baixa condução elétrica, baixa condução térmica, alta resistência mecânica, principalmente sob esforços de compressão, fratura de caráter frágil além de serem quimicamente inertes. (CARTER, NORTON 2013)

Eles são compostos de estrutura cristalina formados principalmente por elementos metálicos e não metálicos. Suas ligações interatômicas variam de caráter puramente iônico, puramente covalente ou uma combinação dos dois, em razão da eletronegatividade de cada elemento. Devido a este comportamento, os materiais cerâmicos são, normalmente, encontrados sobre forma de óxidos, silicatos, carbonetos etc. (CALLISTER, RETHWISCH 2012).

As propriedades dos materiais cerâmicos podem variar significativamente dependendo da composição química e da estrutura microscópica. Isso permite que eles sejam adaptados para atender a uma ampla gama de aplicações, por exemplo, podem ser encontradas em várias formas, desde produtos tradicionais como telhas, tijolos e utensílios de cozinha até produtos de alta tecnologia, como cerâmicas avançadas usadas em eletrônicos, cerâmicas estruturais para aplicações aeroespaciais e cerâmicas biomédicas para implantes e próteses.

Para o desenvolvimento de um material cerâmico a escolha de matérias-primas é de suma importância, pois, uma diferença na composição química, na composição mineral ou no tamanho das partículas influencia diretamente a performance final do material.

Devido ao comportamento com a água, as matérias-primas são divididas entre plásticas e não plásticas. Matérias-primas plásticas têm como capacidade reter água e formar uma massa maleável, dando plasticidade à massa de maneira que o corpo seja moldado no processo de conformação. Matérias-primas não plásticas, por sua vez, são divididas em fundentes e refratárias. Matérias-primas fundentes irão predizer a temperatura de queima da peça, e matérias-primas refratárias irão auxiliar no empacotamento das partículas, diminuição da porosidade e retração durante a fase de secagem e, conseqüentemente, os riscos que disso derivam (CRUZ, PEDRASSANI e BRAGANÇA, 2022). Uma boa administração na quantidade desses três tipos de matérias-primas é crucial para o desenvolvimento de uma boa peça cerâmica, também chamada de triaxial cerâmico.

Os triaxiais cerâmicos são compostos por uma combinação de materiais plásticos e não plásticos. Formam um sistema ternário com, geralmente, um material plástico, um fundente e um refratário. A combinação equilibrada das quantidades no sistema ternário desempenha um papel crucial na formulação de cerâmicas de alta qualidade.

Muitas cerâmicas, especialmente porcelanas e cerâmicas estruturais, contêm silicatos como parte integrante de sua composição. Um silicato é um composto mineral que contém sílica (SiO_2) como elemento fundamental em sua estrutura combinados com outros elementos como Al, Fe, Ca, etc. Eles são a classe mais abundante de minerais na crosta terrestre. Formam uma estrutura tetraédrica do tipo $(\text{SiO}_4)^{4-}$ com forte caráter covalente entre o Si e o O (apenas 40% de caráter iônico), o que permite que tais tetraedros liguem entre si por meio do compartilhamento de átomos de oxigênio, formando cadeias, folhas ou anéis, (CARTER, NORTON 2013) em consequência, os silicatos podem ser encontrados sob geometrias e composições distintas, desde minerais com estrutura cristalina até compostos amorfos. Alguns exemplos de silicatos incluem o quartzo, a feldspato, a mica e o caulim.

3.1.1. Matérias-primas plásticas

3.1.1.1. Argila

As argilas são, geralmente, escolhidas como matérias-primas plásticas na composição do triaxial cerâmico. Elas são formadas a partir de processos de intemperismo de minerais ricos em alumino silicatos, sendo encontrados em inúmeras as partes do globo terrestre. Isso torna as argilas um dos materiais de mais difícil caracterização e controle em processos industriais, pois, diferentes origens geológicas, aliadas a uma complexa estrutura mineral, podem causar variações em sua configuração final, logo, em seu comportamento. (CRUZ, PEDRASSANI e BRAGANÇA, 2022). A argila é um material de granulação fina e com tamanho de grão inferior à $2 \mu\text{m}$, e que geralmente adquire plasticidade ao entrar em contato com a água. (SOUZA SANTOS 1989). Elas são formadas por argilominerais, que por sua vez são compostos por uma estrutura de silicatos em folhas ou lâminas. Assim, as diferentes estruturas dos argilominerais resultam em diferentes materiais, seriam eles, por exemplo, a caulinita, a mica, a montmorilonita, etc. (CRUZ, PEDRASSANI e BRAGANÇA, 2022).

3.1.1.2. Caulim

Caulim é uma argila relativamente pura, ou seja, livre de impurezas como Fe, Ti, e matéria orgânica por exemplo, e disso resulta sua tonalidade branca quando seca e quando queimada. (NORTON 1970) Caulins são um tipo de mineral em que o argilomineral predominante é a caulinita. (CRUZ, PEDRASSANI e BRAGANÇA, 2022). Entretanto, por não fornecerem tanta plasticidade à massa como outras argilas, é necessário a adição de pequenas quantidades de argila plástica para dar resistência mecânica à verde e trabalhabilidade à massa. (CHINELATTO et al., 2004).

3.1.2. Matérias-primas não plásticas

3.1.2.1. Feldspato

Presente em cerâmicas triaxiais e em porcelanas, o feldspato possui baixo ponto de fusão e por consequência atua como fundente na mistura, viabilizando, assim, o processo de sinterização de peças via fase líquida. (CHINELLATO et al., 2004). A dispersão da fase vítrea durante a queima propicia o fechamento de poros, diminuindo a porosidade final da peça e pode chegar a compor até 50% da microestrutura final (NORTON 1987). Existem dois tipos de feldspato existentes, o feldspato potássico ($K_2O Al_2O_3 6SiO_2$) e o feldspato sódico ($Na_2O Al_2O_3 6SiO_2$), historicamente, o feldspato potássico é mais empregado pois gera um fundente de maior viscosidade que o feldspato sódico (VINCENZINI 1991). Entretanto, o emprego de um feldspato sódico pode gerar uma retração linear menor no corpo queimado, elevando, assim, a resistência à flexão (CHATTERJEE, A. et al., 2001).

3.1.2.2. Quartzo (Sílica)

A sílica (SiO_2) é o óxido mais difundido na natureza, onde se encontra combinada com outros óxidos, formando os silicatos, ou sob a forma livre, quando é denominada simplesmente quartzo. O quartzo, na composição da cerâmica, é utilizado como refratário, contribuindo para a formação da estrutura do corpo tanto no estado verde quanto no estado seco, o que resulta na diminuição da retração e facilita o processo de secagem. Além disso, oferece outras vantagens, tais como o aumento da resistência mecânica e a tenacidade à fratura, além da redução de

custos, uma vez que o quartzo é uma matéria-prima economicamente vantajosa em comparação com outros componentes do triaxial cerâmico (CRUZ, PEDRASSANI e BRAGANÇA, 2022).

3.1.2.3. Alumina

O óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3) é frequentemente usada como um material refratário em cerâmicas, já que são materiais que podem suportar altas temperaturas sem se deformar ou sofrer danos significativos, assim, são um componente valioso em cerâmicas refratárias. As cerâmicas aluminosas são utilizadas como isoladores elétricos de alta tensão devido à sua elevada resistividade elétrica e baixa constante dielétrica. Para a maioria das aplicações, a alumina pura não é utilizada. Em vez disso, misturamos a alumina com silicatos para reduzir a temperatura de sinterização. (CARTER, NORTON 2013)

3.1.2.4. Mulita

A mulita não existe na natureza em grandes quantidades e frequentemente tem de ser produzida sinteticamente. Podem ser produzidas quando certas matérias-primas, como caulim e alumina, são submetidas a processos de sinterização em fornos especiais. (CARTER, NORTON 2013). A mulita é um mineral cerâmico e uma fase cristalina comum em cerâmicas e materiais refratários. É um silicato de alumínio com a fórmula química geralmente representada como ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), embora a estrutura exata possa variar dependendo das condições de formação. A mulita é conhecida por suas propriedades de alta resistência térmica, baixa condutividade térmica e estabilidade em altas temperaturas. A diferença entre a mulita primária e secundária está relacionada à temperatura de formação e à origem mineralógica. A mulita primária se forma em temperaturas mais baixas a partir de partículas de argila, enquanto a mulita secundária se desenvolve em temperaturas mais elevadas. A mulita primária apresenta estrutura lamelar enquanto a secundária uma estrutura em forma de agulhas. As estruturas podem ser observadas na Figura 1. (CRUZ, PEDRASSANI e BRAGANÇA, 2022)

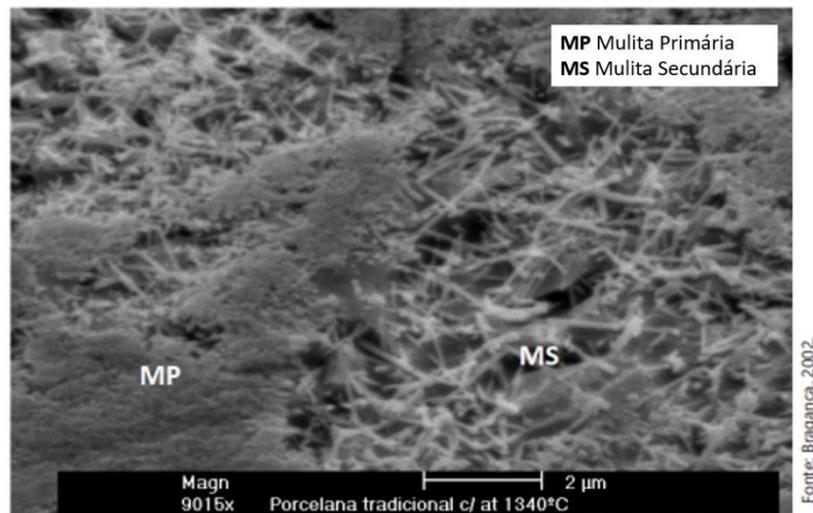


Figura 1 - Microestrutura de uma porcelana, exemplificando a estrutura de mulitas primárias e secundárias. Obtida a partir de uma análise de Microscopia Eletrônica por Varredura (MEV). (CRUZ, PEDRASSANI e BRAGANÇA, 2022)

3.1.3. Porcelana

Cerâmica é um termo amplo que abrange diversos materiais à base de argila, enquanto a porcelana é um tipo específico de cerâmica conhecido por suas propriedades específicas. De acordo com CARTER e NORTON (2013) a porcelana é uma cerâmica branca, fina e translúcida que possui um som de toque semelhante ao do metal quando batida. A porcelana é feita de caulim, quartzo e feldspato, podendo ser adicionada a alumina para melhorar propriedades físico-químicas. Devido às impurezas presentes nas argilas, que resultam em sua cor avermelhada, cinzenta, ou preta, sua utilização é limitada em porcelanas, preferindo, assim, o caulim como fonte de caulinita. Geralmente são queimadas entre 1250°C e 1400°C e produzem uma microestrutura bastante complexa. Porcelanas que consistem em alumina, feldspato e caulim são conhecidas como porcelanas aluminosas. Elas encontram aplicação na produção de isoladores elétricos de alta tensão, devido às suas propriedades dielétricas adequadas e ao desempenho mecânico superior em comparação com porcelanas que contêm quartzo (CHINELATTO, DE SOUZA, 2004). A performance de porcelanas é influenciada significativamente pela presença de impurezas, bem como pelos fatores de temperatura, tempo e atmosfera durante o processo de sinterização.

3.2. Microestrutura Durante o Ciclo de Queima

Durante o processo de queima, a temperatura é elevada gradualmente, desencadeando reações químicas complexas e transformações microestruturais nas matérias-primas. Durante o ciclo de queima, a porcelana passa por três estágios, sendo eles as reações preliminares, a sinterização e o resfriamento. Durante o processo, ocorrem a decomposição das fases minerais das matérias-primas, a reorganização atômica, a formação de novas fases, o crescimento dos grãos, a vitrificação, a retração do corpo, a alterações na distribuição de poros, a redução da permeabilidade, e o aumento da resistência mecânica (CRUZ, PEDRASSANI e BRAGANÇA, 2022). As reações são resumidas abaixo.

- Até 120°C. Eliminação da água adsorvida
- Entre 350 e 650°C. Combustão das substâncias orgânicas;
- À ~550°C A caulinita reordena-se e transforma-se em metacaulinita. Ocorre breve redução de volume da peça.
- À 573°C. Transformação do quartzo $\alpha \rightarrow \beta$ com um aumento de volume de suas partículas no aquecimento. Essa transformação é reversível;
- Entre 700 e 950°C. Decomposição dos carbonatos e outros inorgânicos. A peça começa a perder a rigidez com o amolecimento dos fundentes
- À ~980°C. Ocorre a transformação da metacaulinita em uma estrutura do tipo espinélio e uma fase amorfa de sílica livre. Essa sílica amorfa é extremamente reativa e vai ajudar a formar a fase vítrea;
- Acima de 1000°C. O feldspato funde completamente e forma a fase vítrea juntamente com a sílica liberada na transformação da metacaulinita. A viscosidade da fase vítrea depende da razão sílica/alumina/alcalinos da formulação empregada. A porosidade começa a desaparecer.
- Acima de 1050°C. A mulita se forma da fase tipo espinélio
- À ~1200°C. A fase vítrea ataca o quartzo, dissolvendo completamente os grãos pequenos e parte dos grãos grandes, dependendo da temperatura e da concentração de sílica na fase vítrea. Há também a formação de mais mulita, mas essa se forma no seio da fase vítrea, sendo denominada “mulita secundária”. O vidro líquido preenche a porosidade e o produto retrai, principalmente por ação da capilaridade. A retração da peça evolui até a queima estar completa.
- Entre 1200°C e 1400°C, em função da composição da porcelana, pode-se observar a diminuição da densidade da peça devido ao aprisionamento de poros, comportamento associado à super queima.
- A alumina permanece inerte durante a sinterização, tendo uma taxa de dissolução no vidro feldspático muito baixa até temperaturas de 1450 °C (CARTY 1998)

- Transformação do quartzo $\beta \rightarrow \alpha$, durante o resfriamento ($\sim 573^\circ\text{C}$), resultando em uma diminuição de 2% no volume dos grãos de quartzo, produzindo tensões suficientes para trincar a matriz ou o próprio grão.

As modificações que ocorrem em um corpo cerâmico durante a queima podem ser condensadas e visualizadas na Figura 2. Ressaltando que ao resfriar a peça, o quartzo sofreria novamente a transformação $\beta \rightarrow \alpha$, a mulita e a fase vítrea permaneceriam, relativamente, inalteradas.

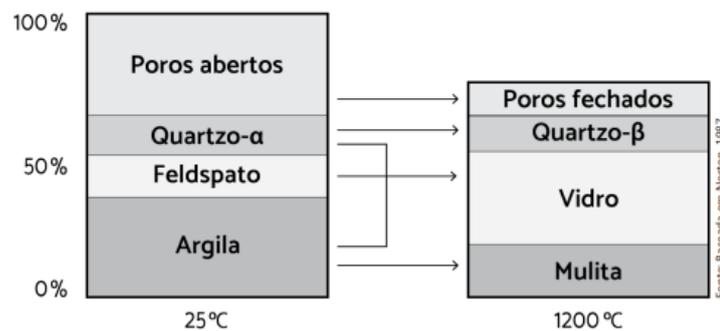


Figura 2 - Volume ocupado pelas MPs na peça à verde e após a queima ($T = 1200^\circ\text{C}$). (CRUZ, PEDRASSANI e BRAGANÇA, 2022)

Uma forma de assegurar a precisão do processamento prévio à queima em cerâmicas é verificar se uma peça sai do forno com deformidades, no entanto, mesmo se a peça estiver íntegra, o sucesso só é avaliado através de alguns indicadores como a gresificação, porosidade e densidade da peça. Durante as temperaturas mais elevadas do ciclo de queima, a massa se transforma em um líquido viscoso, esse líquido escorre e ocupa os espaços vazios entre as partículas mais refratárias, reduzindo assim a porosidade. Devido às forças de capilaridade, ocorre a aproximação das partículas, resultando na retração do material. Dessa forma, duas das principais variações sofridas pelo corpo cerâmico durante a queima são a diminuição da porosidade, que pode ser caracterizada pela absorção de água (AA), e a retração, geralmente caracterizada através da retração linear (RL). A curva de gresificação é a exposição simultânea da AA e da RL em um mesmo gráfico. Além disso, a densidade aparente (DA) e a porosidade aparente (PA) são propriedades importantes para caracterizar materiais cerâmicos e estão relacionadas à distribuição de massa e vazios em uma amostra. 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 (FERREIRA, 2021).

3.3. Propriedades Mecânicas

3.3.1. Resistência Mecânica

A busca por aprimorar a performance das porcelanas levou ao desenvolvimento de teorias que buscam estabelecer uma conexão entre a microestrutura e o desempenho mecânico. Três teorias principais, resumidas por CARTY (1998), surgiram nesse contexto.

A Hipótese do Reforço da Matriz é um conceito que se refere à incorporação de materiais ou fases na matriz cerâmica. Nessa teoria, a diferença nos coeficientes de expansão térmica entre a matriz cerâmica e as partículas dispersas, como quartzo e alumina, gera tensões compressivas na matriz, aumentando sua resistência mecânica. As trincas nas peças dependem dos coeficientes de expansão ($\Delta\alpha$), variação de temperatura (ΔT), módulo elástico (E) e módulo de Poisson (ν) da matriz e do particulado, como sugere a equação 1:

$$P = \frac{\Delta\alpha \Delta T}{(1+\nu_m)/2E_m + (1+2\nu_p)/E_p} \quad (1)$$

No caso de porcelanas, as partículas de quartzo contraem mais que a matriz feldspática. A tensão e as trincas geradas tendem a ser mais severas devido à rápida transformação do quartzo $\beta \rightarrow \alpha$ durante o resfriamento. Partículas pequenas não chegam a colocar matriz sob tensão, enquanto partículas muito grandes incentivam a formação de trincas. O tamanho das partículas de quartzo é crucial, sendo 25 μm o tamanho ideal. (WARSHAW, 1967) (CARTY, 2002)

A Hipótese da Mulita, por sua vez, baseia-se no entrelaçamento de cristais de mulita em forma de agulhas para aumentar a resistência mecânica, dependendo da quantidade de mulita. O tamanho dos cristais de mulita é controlado pela temperatura de sinterização, e a mulita secundária, com cristais menores e bem entrelaçados, melhora a resistência. Ressaltando que a mulita primária se forma em temperaturas mais baixas a partir de partículas de argila, enquanto a mulita secundária se desenvolve em temperaturas mais elevadas.

A Hipótese de Reforço por Dispersão de Partículas sugere que partículas dispersas na matriz vítrea, resultam em um aumento na resistência mecânica. Portanto, a resistência mecânica depende da fração volumétrica e do tamanho das partículas dispersas na matriz.

Somada a essas três teorias, BRAGANÇA e BERGMANN (2004) propõem que se adicione outros três fatores: A relação entre a presença de quartzo e cristobalita, o efeito da porosidade e a influência do tipo de fundente. Os autores explicam que a presença de cristobalita em vez de quartzo geralmente aumenta a resistência mecânica, apesar da cristobalita apresentar uma transformação com variação volumétrica maior no resfriamento do que o

quartzo. A bibliografia sobre o impacto negativo da porosidade na resistência mecânica destaca que poros interconectados são mais prejudiciais do que os isolados, enquanto poros arredondados têm efeitos menos danosos. Autores enfatizam que o tamanho dos poros é mais crucial do que a quantidade de porosidade. Além disso, o tipo de fundente desempenha um papel significativo em vários mecanismos, como a reação da fase vítrea com a mulita, as propriedades do vidro formado, a dispersão de partículas e a formação de porosidade. Essa complexidade ressalta a importância de considerar o fundente em relação aos diferentes aspectos que influenciam a resistência mecânica do material. Geralmente, a resistência mecânica é explicada através dessas seis hipóteses que agem de maneira conjunta no material.

3.3.2. Dureza

A dureza é uma propriedade mecânica que descreve a capacidade de um material resistir à deformação plástica, abrasão ou penetração. Em materiais cerâmicos, a avaliação da dureza é de particular importância devido à sua aplicação em ambientes industriais e tecnológicos, onde a resistência ao desgaste e à fratura é essencial. A dureza e a resistência mecânica estão relacionadas no contexto das propriedades dos materiais, mas elas representam características distintas. A dureza se concentra na capacidade de um material resistir a riscos, enquanto a resistência mecânica refere-se à capacidade de um material suportar cargas sem falhar, envolvendo testes de tração, compressão, flexão ou impacto. (CALLISTER, RETHWISCH 2012). A dureza é geralmente avaliada por meio de testes específicos, como Vickers, Brinell ou Rockwell. A ideia fundamental é que uma impressão na superfície é formada no material por um penetrador. Em seguida, mede-se a área projetada da impressão. A dureza é então determinada dividindo a força aplicada, F , por esta área. A microdureza Vickers é a mais utilizada para materiais cerâmicos. (CARTER, NORTON 2013).

3.3.3. Tenacidade à Fratura

A tenacidade à fratura está relacionada à capacidade do material de absorver energia antes de falhar. A tenacidade à fratura em porcelanas é uma propriedade importante que avalia a resistência do material à propagação de trincas ou fissuras quando submetido a cargas. Em cerâmicas, como as porcelanas, que são geralmente materiais frágeis, a tenacidade à fratura destaca-se como um indicador crucial de sua capacidade de resistir a condições mecânicas impostas. Quanto maior o valor da tenacidade (K_{IC}), melhor é o comportamento mecânico do material. Várias características, como resistência mecânica, resistência ao choque térmico, susceptibilidade ao desgaste erosivo, são controladas por esta propriedade. Trata-se de uma avaliação muito útil, uma vez que, a tenacidade, está mais ligada aos fatores intrínsecos do

material do que às variáveis na superfície do espécime decorrentes do preparo da amostra, como a dureza.

3.4. Propriedades Dielétricas

As cerâmicas apresentam a mais ampla gama de propriedades elétricas de todas as classes de materiais. Num extremo, temos os supercondutores de alta temperatura, que não têm resistência a uma corrente elétrica. No outro extremo, temos os isoladores elétricos. (CARTER, NORTON 2013). A condutividade dos isolantes pode ser entendida a partir da perspectiva dos modelos de ligação atômica. Nos materiais isolantes elétricos, as ligações interatômicas são iônicas ou fortemente covalentes. Dessa forma, os elétrons de valência estão firmemente ligados ou são compartilhados entre os átomos individuais. Em outras palavras, esses elétrons estão altamente localizados e não estão, em nenhum sentido, livres para vagar pelo cristal, resultando, assim, em uma baixa condutividade de elétrons. (RETHWISCH, CALLISTER. 2012)

Outra forma de explicar é pela Teoria das Bandas (Figura 3). Num isolante elétrico, existe um grande intervalo de energia entre a parte inferior da banda de condução e a parte superior da banda de valência. Este *gap* tende a diminuir com o aumento de temperatura, já que os elétrons ganham energia e aumenta-se a probabilidade de saltos para a banda de condução (CARTER, NORTON 2013). No caso dos vidros, a condução elétrica ocorre devido à presença de cátions como Li^+ , K^+ ou Na^+ quando aplicado campo elétrico. (BRAUNGER, 2012).

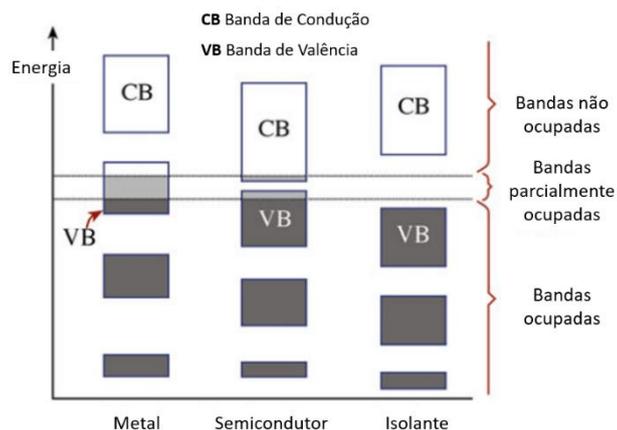


Figura 3 - Esquema da Teoria das Bandas, mostrando os valores energéticos para bandas de condução e valência para metais, semicondutores e isoladores. (CARTER, NORTON, 2013).

3.4.1. Resistividade Elétrica

A resistividade elétrica (ρ) indica o quanto um material é capaz de se opor a uma corrente elétrica. Pode ser calculado (Equação 2) pelo inverso da condutividade elétrica (σ) ou a razão entre a resistência elétrica (R) e área de secção transversal (A) por comprimento (L). A unidade, de acordo com o SI, é o $\Omega \cdot m$.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad \text{ou} \quad \rho = \frac{R \cdot A}{L} \quad (2)$$

Os materiais isolantes exibem resistividade ou condutividade na ordem de 10^{-10} a 10^{-20} $\Omega \cdot m$ e tendem a diminuir a resistividade com o aumento de temperatura. (RETHWISCH, CALLISTER. 2012)

Ruptura Dielétrica, Constante Dielétrica e Fator de Dissipação Elétrica

Quando campos elétricos muito grandes são aplicados através de materiais dielétricos, um grande número de elétrons pode repentinamente ser excitado para energias dentro da banda de condução. Como resultado, a corrente através do dielétrico, devido ao movimento desses elétrons, aumenta drasticamente; algumas vezes, uma fusão, queima ou vaporização localizada produz uma degradação irreversível e talvez até mesmo a falha do material. Esse fenômeno é conhecido como ruptura dielétrica. A resistência dielétrica representa a magnitude do campo elétrico necessária para produzir a ruptura. (RETHWISCH, CALLISTER, 2012). A constante dielétrica (ϵ_R) está relacionada à capacidade de armazenamento de energia elétrica de um material, enquanto o fator de dissipação elétrica ($\tan \delta$) mede as perdas de energia no material quando submetido a um campo elétrico alternado.

BUCHANAN (1986) sugere as propriedades dielétricas mínimas a serem atendidas por isoladores de alta tensão (Tabela 1) e correlaciona com as propriedades dos componentes da porcelana (Tabela 2):

Tabela 1 - Propriedade dielétricas sugeridas para um isolador de alta tensão (BUCHANAN, 1986)

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

Tabela 2 - Propriedades dielétricas de uma porcelana e seus componentes. (BUCHANAN, 1986)

Material	$\tan \delta$	Constante dielétrica	Ruptura dielétrica (kV/mm)	Resistividade a 25 °C (Ω -cm)
Porcelana	0,008 – 0,020	5,0 – 6,5	6,1-13,0	$10^{11} - 10^{14}$
Mullita	0,004 – 0,005	6,2 - 6,8	7,8	10^{14}
Quartzo	0,0002 – 0,018	4,4 – 4,6	6,5	$10^{10} - 10^{14}$
Vidro*	0,0005 – 0,010	4,3 - 8,5	7,8 – 13,2	10^{12}
Coríndon	0,0003 – 0,002	8,2 – 10,2	9,9 – 15,8	10^{16}

*Valor baseado em uma composição típica de um vidro alcalino.

3.4.2. Espectro de Impedância

A impedância é frequentemente utilizada para estudar a resposta de uma amostra sujeita a um campo elétrico aplicado de frequência fixa ou variável, assim, descreve as propriedades dielétricas de um material em função da frequência. (DESHMUKH et al., 2017). Geralmente, o espectro de impedância é apresentado em gráficos, em que a impedância, medida em ohms (Ω), é plotada no eixo vertical e a frequência no eixo horizontal (Figura 4). Isso permite visualizar como a impedância muda à medida que a frequência varia. O eixo horizontal fornece a resistividade do sistema enquanto o eixo vertical a capacitância ou indutância do mesmo. O ponto em que o arco corta o eixo x, fornece a resistência total do sistema. (PIVA, 2014)

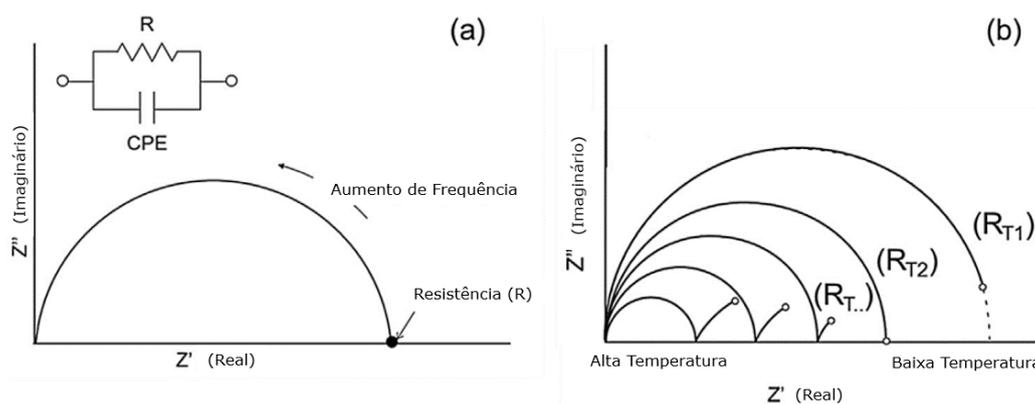


Figura 4 – Esquema mostrando o espectro de impedância com um circuito elétrico equivalente (à esquerda) e a influência da temperatura na resistência medida (à direita). (LERDPROM, 2017).

3.5. Isoladores Elétricos

Os isoladores elétricos têm um papel crítico na indústria elétrica, desempenhando um duplo papel de segurança e eficiência nas redes de distribuição e transmissão de eletricidade. Sua função fundamental é isolar condutores elétricos, prevenindo a passagem de corrente elétrica indesejada e, assim, garantindo a segurança das pessoas e a proteção dos equipamentos elétricos contra choques elétricos e curtos-circuitos. Nas redes de transmissão de tensão, os isoladores elétricos são utilizados para sustentar as linhas de eletricidade aéreas e proporcionar isolamento elétrico entre os condutores e as estruturas de suporte. Nesse contexto, esses isoladores devem exibir excepcionais propriedades dielétricas, a fim de evitar a fuga de corrente elétrica, garantindo a integridade do sistema.

3.5.1. Um olhar sobre Redes de Transmissão de Energia

As redes de distribuição de eletricidade geralmente são altamente dinâmicas e, frequentemente, possuem uma infraestrutura de longa data. O crescimento de novas comunidades e empresas frequentemente demanda a expansão de novas redes elétricas para atendê-los, enquanto as redes existentes podem passar por atualizações programadas. Além disso, eventos pontuais, como interrupções de energia, oscilações de tensão e corrente, podem necessitar de intervenções imediatas. Em todas essas circunstâncias, as redes de distribuição elétrica requerem a incorporação de novos componentes, que podem incluir fios, cabos, postes, braçadeiras, cruzetas, chaves e isoladores, entre outros elementos essenciais. (MANTOVANI et al., 2013)

O Brasil tem sido palco de um notável aumento na infraestrutura e na demanda de energia elétrica ao longo das últimas décadas, em estreita correlação com o desenvolvimento econômico do país, o aumento da urbanização e o crescimento do padrão de vida da população. Este progresso tem sido impulsionado pelo florescimento de setores-chave como a indústria, a agricultura e os serviços, todos dependentes do fornecimento confiável de eletricidade para suas operações. Nos últimos 20 anos, a demanda de eletricidade no Brasil cresceu a uma taxa média de cerca de 4% ao ano. Em 2021, a demanda total de energia elétrica foi de aproximadamente 495 TWh, um aumento significativo em relação às décadas anteriores. (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, 2022)

À medida que as cidades se expandiram e a urbanização ganhou ritmo, a eletrificação de residências, empresas e infraestrutura pública se tornou imperativa. Esse processo resultou em um aumento substancial na demanda por energia elétrica nas áreas urbanas, tornando a

eletricidade um componente essencial do cotidiano. Impulsionada por dois fatores, tanto o aumento de energia por residência, com aparelhos eletrônicos mais potentes, sistemas de climatização e outras comodidades elétricas, quanto a abertura de novas residências, empresas e comunidades. O crescente padrão de vida e a expansão das cidades ou criação de novos centros urbanos resultaram em um consumo crescente de eletricidade. De 2010 a 2020, foram investidos mais de R\$ 180 bilhões na expansão e modernização do setor elétrico. Em 2021, o número de novas ligações chegou a 27,7 mil e propiciando o atendimento de 110 mil novas pessoas. no país. (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, 2022)

No entanto, o aumento da demanda de energia também traz desafios ambientais. O Brasil está comprometido em equilibrar o crescimento econômico com a sustentabilidade, promovendo fontes de energia mais limpas e implementando medidas de eficiência energética para mitigar o impacto ambiental. Além disso, principalmente na modernização das linhas de distribuição e nas substituições durante a manutenção preventiva ou corretiva, são geradas grandes quantidades de resíduos. (MANTOVANI et al., 2013)

Para exemplificar o volume de isoladores descartados e vendidos como sucata, apenas uma das empresas que fornece energia para a região metropolitana de São Paulo, a AES/Eletropaulo, descartou 677 toneladas de isoladores em 2011, representando aproximadamente 14% de todos os resíduos gerados na manutenção e expansão de sua rede de distribuição. Estudos sobre a composição desses componentes constataram que pouco mais de 591 toneladas são porcelanas, 82 toneladas estão na forma de vidro, e 4 toneladas são materiais poliméricos. Assim, em torno de 87% do total descartado está sob a forma de isoladores cerâmicos. (MANCINI et al., 2011). De acordo com a Energisa (2019), a vida útil de isoladores-pilar é de 37 anos, em que, a partir de 30 anos não se admite falhas decorrentes do processo de fabricação.

Uma rede de transmissão de energia elétrica é um sistema fundamental para a distribuição eficiente de eletricidade em larga escala. Começa com a geração de eletricidade em usinas, que podem ser de diversos tipos, e a elevação da tensão por meio de transformadores para reduzir perdas durante o transporte. A eletricidade é então transmitida por linhas de transmissão, que podem ser aéreas ou subterrâneas, suportadas por torres de transmissão projetadas para manter os cabos isolados do solo. No caso de uma torre de distribuição de energia elétrica, os isoladores oferecem isolamento elétrico, mantendo os fios condutores afastados da estrutura da torre e do solo, prevenindo assim curtos-circuitos e interrupções no fornecimento de energia (Figura 5).



Figura 5 - Exemplo de instalação de uma torre de distribuição de energia. Fonte: Internet – Site Freepik. Acessado em 18 de janeiro de 2024

Para realizar a instalação de um poste de distribuição de energia é necessário diferentes geometrias de isoladores, a fim de satisfazer a engenharia do projeto. Fornecedores disponibilizam no mercado diversos tipos de isoladores cerâmicos de porcelana, como mostra a Figura 6.



Figura 6 - Portfólio de produtos para um distribuidor de isoladores elétricos de porcelana (CST Isoladores Santa Teresinha). Fonte: Internet - Site CST Isoladores. Acessado em 18 de janeiro de 2024

Um dos isoladores elétricos amplamente empregado é o isolador de pino cerâmico de média tensão, com uma classificação de 15 kV (FERREIRA, 2021). O isolador de pino porcelana 15kv é indicado para projetos de redes de distribuição de 5,5 kV até 48 kV, ou baixa e média tensão, respectivamente. Além disso, conforme a Norma IEC 60672-3, existem três classes que variam na composição dos isoladores cerâmicos com relação à alumina: 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 apresenta um nível mais elevado de alumina, resultando, por conseguinte, em uma

considerável resistência mecânica, o que a torna apropriada para isoladores de grandes dimensões. Já as categorias C 110 e C 120 são empregadas em isoladores de dimensões reduzidas e médias. (BONETTI, 2009)

A indústria de isoladores elétricos de porcelana para alta tensão era inexistente até o início do século 20. Consequentemente, o aumento da transmissão de eletricidade em longas distâncias e em níveis de voltagem mais elevados ampliou a necessidade de isoladores que atendessem a requisitos mais rigorosos. Esses isoladores devem exibir excelentes propriedades dielétricas e uma notável resistência mecânica. (NORTON, 1970)

De acordo com a Global Market Insights, o mercado de isoladores de alta tensão, hoje, é avaliado em 1,7 B USD em 2023, e é esperado atingir os patamares de 3,2 B USD em 2032, um aumento de 6.3%. (GLOBAL MARKET INSIGHTS, 2023)

Em resumo, o mercado de porcelanas elétricas desempenha um papel crítico no fornecimento de componentes essenciais para a infraestrutura elétrica global. A demanda contínua por eletricidade e a necessidade de produtos confiáveis e de alta qualidade garantem que esse mercado continue sendo uma área de interesse e investimento significativo.

3.5.2. Degradação de Isoladores Elétricos

É essencial que os isoladores sejam resistentes aos danos provocados por condições climáticas adversas e à absorção de água, que poderia resultar na formação de arcos voltaicos, que são descargas elétricas de alta energia que ocorrem em um ambiente de alta tensão, quando há uma quebra na continuidade do isolamento entre condutores. Um exemplo comum de cerâmica empregada para essa finalidade é a porcelana. (CARTER, NORTON 2013)

Isoladores elétricos podem se degradar devido às trincas causadas por fadiga térmica, aumento de carga mecânica, efeitos de corrosão, ou descargas elétricas causadas por influência de ambientes severos como ambientes salinos ou poluídos (FERREIRA, 2021). Uma das principais causas de interrupções nas redes elétricas e do desperdício de energia nas linhas de transmissão é a ocorrência de correntes de fuga nos isoladores, fenômeno que se intensifica em ambientes sujeitos à poluição industrial ou atmosfera com alta concentração de salinidade. (FONTANELLA et al., 2008)

É crucial reduzir as perdas na transmissão de energia, desenvolvendo isoladores mais eficientes para proteger as redes elétricas em ambientes desafiadores. Isso evita prejuízos

significativos para as empresas distribuidoras de energia, que poderiam enfrentar custos de manutenção, perda de eletricidade e indenizações devido a interrupções no fornecimento. Assim, a mitigação das correntes de fuga é essencial para garantir a eficiência e a confiabilidade do sistema elétrico (FONTANELLA et al., 2008). Dependendo da situação meteorológica, as emissões atmosféricas como poeira, gases ou gotículas podem causar poluição do ar, especialmente em áreas industriais. Sob condições de alta umidade do ar, especialmente neblina, filmes condutores de eletricidade podem se depositar na superfície dos isoladores, o que, mesmo na tensão nominal de operação, pode levar a *flashover* e causar problemas no circuito elétrico. (LIEBERMANN, 2002)

Uma solução para mitigar este problema seria a inspeção periódica dos isoladores a fim de retirar esta camada condutora. Uma alternativa seria alterar a geometria da peça. (LIEBERMANN, 2002). Estudos vêm sendo realizados com a ajuda de métodos computacionais em elementos finitos para prever, com certa rapidez, se com uma dada geometria em certas condições, haveria o fenômeno do *flashover*. (GENÇOĞLU, CEBECI, 2008.). Além disso, outros métodos de inspeção estão sendo desenvolvidos, como apresentado por Cho et al. (2019) onde, utilizando a análise de *X-ray 3D computed tomography* (CT), um ensaio não destrutivo, pode-se, com certa facilidade, visualizar os defeitos em escala milimétrica de isoladores e assim avaliar sua degradação.

3.6. Formulação de Isoladores Elétricos de Porcelana

Entre os vários tipos de porcelanas, as mais utilizadas como isoladores elétricos são as porcelanas triaxiais compostas por quartzo, feldspato e argila, contudo, a substituição total ou parcial do quartzo por alumina tem sido utilizada para promover aumento da resistência mecânica (CARTY, 1998). As porcelanas formadas por alumina, feldspato e caulim são chamadas de porcelanas aluminosas e são utilizadas na fabricação de isoladores elétricos de alta tensão, por possuírem propriedades mecânicas superiores às das porcelanas que utilizam o quartzo (CHINELATTO, DE SOUZA, 2004)

Norton (1970) sugere composições para isoladores de alta tensão com porcelanas aluminosas, com 15% de caulim, 20% de argila, 25% de feldspato e 40% de alumina para uma porcelana rica em alumina, e 20% de caulim, 25% de argila, 35% de feldspato e 20% de alumina para porcelanas com baixo teor de alumina. Dentro do contexto de isoladores de baixa tensão, Buchanan (1986) define uma faixa de composição para porcelanas silicosas em que a quantidade de caulim varia de 40% a 60%, o feldspato varia de 20% a 35%, e o quartzo varia de 20% a 30%. Essas composições são submetidas a um processo de sinterização a temperaturas

entre 1250 °C e 1330 °C. Merga et al. (2019) produziram um isolador de porcelana a partir de matérias-primas locais, com composição de argila (40-50%), feldspato (40-50%) e quartzo (10%) a uma temperatura de queima de 1300 °C, e foi constatado atender aos padrões necessários em termos de boas propriedades dielétricas (ruptura dielétrica acima de 5 kV/mm) para a fabricação de isoladores elétricos de porcelana.

3.7. Influência da Composição e da Microestrutura em Propriedades Mecânicas

Goulart et al. (1989) estudaram porcelanas silicosas (22% de quartzo) e porcelanas aluminosas (22% a 40% de alumina) e observaram que as porcelanas ricas em alumina, possuem tensão de ruptura sob flexão maior que as ricas em quartzo, em todas as temperaturas de sinterização estudadas. Maslennikova et. al. (1984) constatou que a diminuição da quantidade de feldspato aumenta a temperatura de sinterização e a resistência mecânica em porcelanas sem a presença de quartzo ou alumina (21% argila, 56% caulim e 23% feldspato), o fato é explicado pela disponibilização de uma maior quantidade de sílica e alumina para a formação da mulita, e diminuindo o número de óxidos alcalinos, como K_2O e Na_2O na matriz vítrea, fortificando as ligações Si-O. Com menos óxidos alcalinos disponíveis, a dissipação dielétrica e a constante dielétrica diminuíram. A resistência dielétrica não sofreu grandes efeitos com a variação de feldspato.

Kobayashi et al.. (1994) analisaram a tensão de ruptura em amostras de porcelanas aluminosas, variando o teor de alumina de 0% a 50%. Os resultados demonstraram que amostras sem a presença de alumina atingiram uma tensão de ruptura de 200 MPa, enquanto aquelas com 50% de alumina alcançaram 371 MPa. Sugiyama et al.. (1997) notaram que ao substituir completamente o quartzo por alumina, observou-se um aumento no módulo de ruptura na porcelana silicosa. Essa melhoria no módulo de ruptura não se restringiu apenas ao aumento do módulo elástico devido à presença de alumina- α , mas também resultou da redução no tamanho dos defeitos devido às pequenas partículas de alumina- α dispersas na fase vítrea.

Segundo Liebermann (2001), o uso de alumina, em vez de quartzo, em isoladores é vantajoso devido ao aumento significativo da resistência mecânica. Além disso, o tamanho de grão e a dispersão dos grãos de alumina na porcelana também influenciam o comportamento mecânico. Para alcançar uma microestrutura mecanicamente resistente e estável em isoladores elétricos de alta tensão, sugere-se eliminar a quantidade residual de quartzo, promover a formação da fase vítrea mais cedo, adicionar alumina à composição, realizar a queima sob atmosfera redutora e promover o resfriamento rápido. Seguindo essas orientações, a composição

final da porcelana deve atender aos seguintes critérios: a porcentagem de mulita deve ser igual ou inferior a 15%, a de alumina igual ou superior a 40%, a de fase vítrea em torno de 45%, e a quantidade residual de quartzo deve ser menor que 1%.

Chinelatto et al. (2004) estudaram a microestrutura e o módulo de ruptura de porcelanas aluminosas quando se aumentava a temperatura de sinterização. Foi observado que o módulo de ruptura aumenta com a quantidade de fase cristalina e que as partículas de alumina contribuem de forma mais efetiva para esse aumento que os cristais de mulita, já que são insolúveis na fase líquida e que a formação de um esqueleto de alumina inibe o rearranjo das partículas durante a sinterização. Além disso, o máximo valor do módulo de ruptura é associado à temperatura de sinterização, pois, observou-se que passada a temperatura de sinterização, ou atingindo-se a chamada super-queima, o módulo de ruptura começa a diminuir.

Meng et al. (2012) estudaram a influência da microestrutura em isoladores elétricos de porcelana de ultra resistência. A composição (40% alumina, 45% argila e 15% feldspato) foi preparada com matérias primas de alta pureza. Observaram que o aumento de resistência se produz pela combinação de três fatores: a matriz reforçada com partículas de alumina e quartzo com diâmetro $\leq 25 \mu\text{m}$; o reforço por dispersão de poros uniformemente distribuídos com diâmetro $\leq 25\mu\text{m}$; e o reforço da mulita interconectada. Cho et al. (2019) observaram que a porcelana rica em sílica apresentou menor dureza em relação às outras duas porcelanas aluminosas, na faixa de 600 HV, as outras na faixa dos 700 HV. O autor associa isso à quantidade de cristobalita presente na microestrutura.

3.8. Influência da Composição e da Microestrutura em Propriedades Dielétricas

Maslennikova et. al. (1984) e Bishai et al. (1985) confirmaram que as propriedades dielétricas de porcelanas silicosas dependem da relação Feldspato/Quartzo. Eles observaram que a constante dielétrica diminui e o fator de dissipação diminui com a diminuição de fase vítrea e aumento na quantidade de mulita. Chaudhuri et. al. (1999) investigaram a dependência da resistividade elétrica de porcelanas com a presença de mulita, foi observado que o aumento da concentração de mulita provoca uma diminuição da resistividade da porcelana. Porém o aumento em quartzo, cristobalita e fase vítrea aumentava a resistividade elétrica. Esse resultado é consequência da natureza semicondutora dos cristais de mulita, que surgem a partir de seus defeitos estruturais, e incorporação de íons com diferentes valências em sua estrutura.

Em outro trabalho, Chaudhuri et. al. (2000) mostraram que, em porcelanas silicosas (63% caulim, 12% quartzo e 25% feldspato) o efeito da quantidade e do tamanho dos cristais de mulita afeta a constante dielétrica sob forma de parábola. De acordo com o autor, a presença de mulita aumenta o fator de dissipação elétrica e a constante dielétrica até um máximo para depois baixar. Além disso, o aumento de tamanho dos cristais de mulita aumentou o fator de dissipação, o autor explica que as fronteiras entre os cristais de mulita são consideradas os caminhos que permitem a dissipação da corrente da amostra. O número e o comprimento dessas fronteiras, ou caminhos contínuos, também chamados de caminhos médios livres, controlam o fluxo ininterrupto de corrente através da amostra, de modo que fronteiras mais longas constituem caminhos médios livres mais longos, resultando em mais corrente e perda dielétrica. Caminhos médios livres mais longos são formados por cristais de mulita maiores. Portanto, o fator de dissipação aumenta com o aumento do tamanho dos cristais de mulita. A natureza das curvas sugere que as propriedades dielétricas das amostras eram uma função complexa de seus parâmetros constitucionais

Segundo Chinelatto et al. (2004) a discrepância encontrada em diferentes trabalhos, como nos últimos quatro trabalhos citados, pode ser entendida considerando que o parâmetro importante para a constante dielétrica e fator de perda é a composição de cada fase e não só a relação entre suas quantidades. Como a composição de cada fase é dependente da composição das matérias primas que, por sua vez são intrínsecas de cada região, é natural que não exista uma coerência entre os resultados da literatura com relação ao comportamento geral da relação entre microestrutura e propriedades dielétricas. Ribeiro et al.. (2004), em seu estudo, concluiu que uma maior concentração de mulita estequiométrica foi o fator primordial para aumentar a resistividade elétrica do cerâmico. Esta observação é explicada pelo fato de a mulita ser uma fase mais resistiva que a fase vítrea, logo, os caminhos de percolação para o transporte de carga tendem a diminuir com o aumento de mulita. De acordo com Piva (2014), em porcelanas, a fase vítrea é a fase de menor resistividade e 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 7.

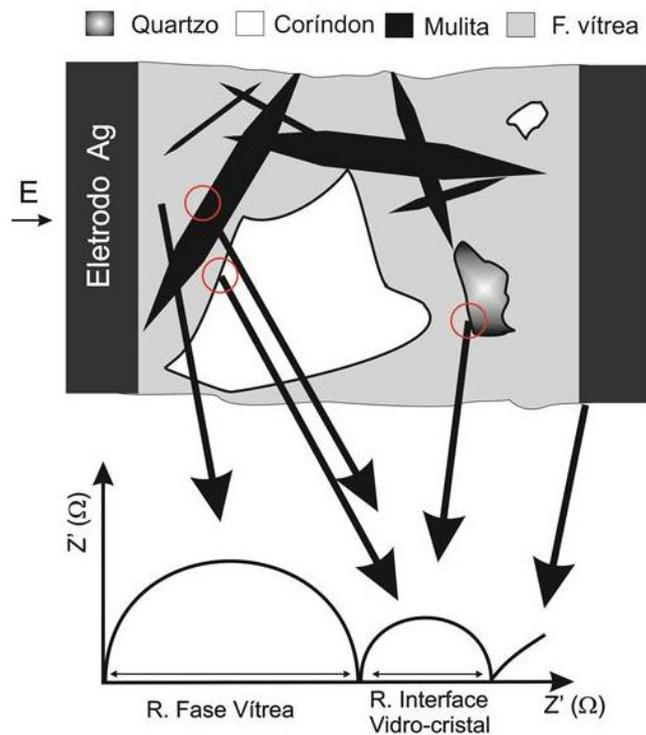


Figura 7 - Representação da influência das fases da porcelana no espectro de impedância. (PIVA, 2014)

3.9. Reciclagem de Isoladores Elétricos

Ocampo et al. (2023) estudou rotas de reutilização e revalorização de resíduo cerâmico. Os autores mostram que uma das indústrias em que o descarte de materiais cerâmicos aumentou drasticamente é a indústria de energia elétrica, sob forma de isoladores elétricos de porcelana. Ao fim de seu estudo, os autores apontam quatro alternativas ao reuso do resíduo cerâmico: a manufatura do concreto, produção de isoladores elétricos, extração de alumina, e construção de barreiras geológicas contra o lixo nuclear. O reuso de isoladores elétricos como fonte de matéria-prima para fabricação de novos isoladores elétricos também foi observado no trabalho de Caligaris et al. (2000), onde mostrou-se um aumento de resistência mecânica com o uso de isoladores elétricos como matéria prima, o fato se deve ao teor de mulita já presente no isolador reciclado. Pereira et al. (2022) observou que a substituição da areia por resíduo de isoladores de porcelana descartados aumentou a resistência à compressão do concreto. Mantovani et al. (2013) propuseram o reuso de isoladores como chamota devido à sua estabilidade térmica. Esse resíduo também pode ser triturado e utilizado em formulações com cimento ou como substituto para o cascalho, já que muitas empresas de serviços públicos de eletricidade usam em suas subestações.

3.10. Estado da Arte

Como visto acima, vários estudos se propuseram a investigar de maneira abrangente as propriedades mecânicas e dielétricas dos isoladores elétricos de porcelana, destacando a importância de compreender os mecanismos físicos e mecânicos para um desempenho eficiente desses dispositivos. Além disso, sob uma visão sustentável e a longo prazo, autores buscaram também maneiras de reciclar ou reutilizar isoladores elétricos degradados e já não mais em uso.

Belhouchet, Bayadi, Belhouchet e Romero (2019) estudaram a reutilização de vidro reciclado proveniente de painéis de carro para a produção de isoladores elétricos. Propuseram quatro composições diferentes aumentando-se o teor de vidro reciclado, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Composição das amostras de porcelana com a adição de vidro reciclado (em peso %). (BELHOUCHE, BAYADI, BELHOUCHE E ROMERO, 2019).

Amostra	Caulim	Quartzo	Feldspato	Vidro Reciclado
N00	50	20	30	0
G10	50	20	20	10
G20	50	20	10	20
G30	50	20	0	30

A adição de vidro diminuiu a temperatura de sinterização das amostras, 1250°C sem adição de vidro (N00) e 1050°C com 30% de vidro adicionado (G30), explicado, segundo o autor, pelo aumento na quantidade de fase vítrea. A partir das análises de MEV e DRX foi possível observar a presença de quartzo, mulita e anortita nas amostras em temperaturas abaixo de 1100°C, após essa temperatura, ocorre a dissolução do quartzo e anortita, deixando apenas a mulita e a fase vítrea presentes na estrutura. Observou-se que a inclusão de vidro na porcelana resultou no aumento da dureza das amostras, passando de 4 GPa (N00) para 7 GPa (G20) (medidos pela microdureza Vickers) entre 1000°C e 1100°C. Esse aumento está associado à maior presença de mulita e ao aumento da densidade aparente ocasionado pela adição de vidro à porcelana. A amostra G20, escolhida para a análise dielétrica devido ao seu melhor desempenho mecânico, apresentou uma considerável redução na constante dielétrica em comparação com a amostra N00, enquanto o fator de dissipação elétrica ($\tan \delta$) teve uma redução relativamente baixa. O autor destaca a influência dominante da fase vítrea nas propriedades dielétricas das porcelanas, sendo estas geridas pela concentração e mobilidade de íons K^+ e Na^+ . Outros estudos indicam que a constante dielétrica aumenta na presença de cátions K^+ e Na^+ e diminui

quando substituídos por Ca^{2+} , Mg^{2+} e Ba^{2+} . A adição de vidro reciclado aumentou a quantidade de fase vítrea e aprimorou as propriedades dielétricas da amostra.

Nos trabalhos de L. Ferreira (2021) e de L. Ferreira, L. Ribas, V. C. de Souza, S. R. Bragança (2018) estudou-se a incorporação de isoladores elétricos de porcelana já degradados como matéria-prima, em substituição ao quartzo e à alumina, na fabricação de novos isoladores elétricos de porcelana. Foram propostas três composições distintas, como vistas abaixo. A formulação C, com adição de 40% de resíduo de isolador elétrico, apresentou melhor comportamento de gresificação, atingindo uma baixa absorção de água (<0,5%) na temperatura de 1350°C, e atingindo uma temperatura de sinterização menor que as outras formulações, o que indica que o resíduo atuou como fundente na composição.

Tabela 4 - Composição das amostras de porcelana com a adição de isolador reciclado (em peso %). (FERREIRA, 2021)

Amostra	Caulim	Feldspato	Quartzo	Alumina	Isolador Reciclado
A	40	20	20	20	0
B	40	20	0	20	20
C	40	20	0	0	40

As propriedades mecânicas foram investigadas, destacando-se que a composição contendo quartzo e alumina (formulação A) demonstrou uma resistência mecânica superior (61 MPa a 1600°C) em comparação com as outras formulações. A formulação com resíduo exibiu a menor resistência (54 MPa a 1350°C), embora todas tenham atendido aos padrões estabelecidos pela Norma IEC – 60672 (1995). A redução na tenacidade está associada à diminuição das fases refratárias, como quartzo e alumina. As propriedades dielétricas também foram avaliadas, e todas as formulações mostraram resistividade elétrica bastante próxima, na ordem de $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ entre 25°C e 200°C, e valores de 10^7 - $10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ a 500°C. Esses valores superam os encontrados em isoladores elétricos comerciais.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. Materiais

O material central empregado nesta pesquisa é o isolador elétrico de porcelana do tipo pino, projetado para sustentação e transmissão de energia em média tensão (15kV).

O isolador de pino cerâmico de média tensão é um dos isoladores elétricos amplamente utilizados em redes trifásicas (FERREIRA, 2021). A coloração marrom desse isolador está relacionada à cobertura de uma camada fina e contínua de esmalte vítreo, que contribui para melhorar as propriedades mecânicas e elétricas. Os contornos da superfície e a geometria são projetados para aumentar a superfície do isolador, proporcionando maior resistência à trajetória de uma possível corrente de fuga. É relevante observar que os isoladores de baixa tensão têm uma composição distinta em comparação com os de alta tensão, devido às suas diferentes áreas de aplicação. O isolador de pino porcelana 15kv é recomendado para projetos de redes de distribuição de 5,5 kV até 48 kV, abrangendo baixa e média tensão, respectivamente.

O isolador foi obtido a partir de um descarte durante o processo de renovação da infraestrutura de uma rede elétrica no bairro Belém Novo, em Porto Alegre – RS. Optou-se por esse material, obtido de uma fonte real de descarte durante a renovação da infraestrutura elétrica, devido ao seu grande volume de descarte. Trata-se do tipo de isolador mais comum em redes de transmissão elétrica.



Figura 8 - Isolador cerâmico do tipo pino reciclado no trabalho. Fonte: Internet - Site CST Isoladores. Acessado em 18 de janeiro de 2024

Para a produção deste trabalho, utilizou-se três tipos de matérias-primas: o isolador elétrico mencionado anteriormente, caulim e feldspato. A composição química das matérias-primas está detalhada na Tabela 5, obtida por meio da análise de Fluorescência de Raios X

(FRX) realizada no LACER – UFRGS, que foi realizada a partir da prensagem do pó do isolador juntamente com ácido bórico em formato de pastilhas. Foi observado que, em comparação ao isolador do trabalho de Ferreira (2021), o isolador usado neste trabalho possui uma maior quantidade de sílica, similares quantidades de alumina e não possui K₂O. A composição do isolador elétrico de porcelana utilizado no trabalho de Ferreira (2021) foi de SiO₂ 69,4%; Al₂O₃ 22,0%; Na₂O 1,7%; Fe₂O₃ 0,7%; MgO 1,1%; CaO 0,8%; K₂O 3,2% e P₂O₅ 0,08%. A composição fornecida por um fabricante de isoladores de Canoas – RS é de SiO₂ 70%; Al₂O₃ 24%; Na₂O 1% e K₂O 5%. Essa composição é próxima a ambas as composições. O feldspato utilizado é levemente mais sódico que potássico, que, de acordo com Vincenzini (1991) levaria a um fundente menos viscoso.

Tabela 5 - Composição química das MPs obtida através da análise de FRX.

MP (% em peso)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	TiO ₂
Feldspato	73,2	21,1	3,09	0,43	< 0,05	ND	2,08	ND
Isolador	74,1	21,5	2,39	1,02	0,14	0,63	ND	0,21
Caulim	62,7	33,7	1,41	1,02	0,43	0,35	0,22	0,10

Além disso, para uma análise mais aprofundada do isolador, foi conduzida a análise de Difração de Raios X (DRX) para determinar a composição mineralógica. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS, utilizando o equipamento Philips modelo X'Pert – MPD e o software X'Pert High Score. Os resultados podem ser visualizados nas Figuras 12, 13 e 14. Pode-se observar a presença das fases mulita e quartzo no isolador elétrico reciclado, como esperado. Além disso, o feldspato possui as fases de um aluminosilicato de sódio, um aluminosilicato de potássio e um ferrosilicato de cálcio em sua composição. O caulim possui três fases: a caulinita, um silicato de alumínio hidratado, a bytownita, um aluminosilicato rico em cálcio, e a albita, um aluminosilicato rico em sódio. Os resultados do ensaio de DRX condizem com os resultados do ensaio de FRX.

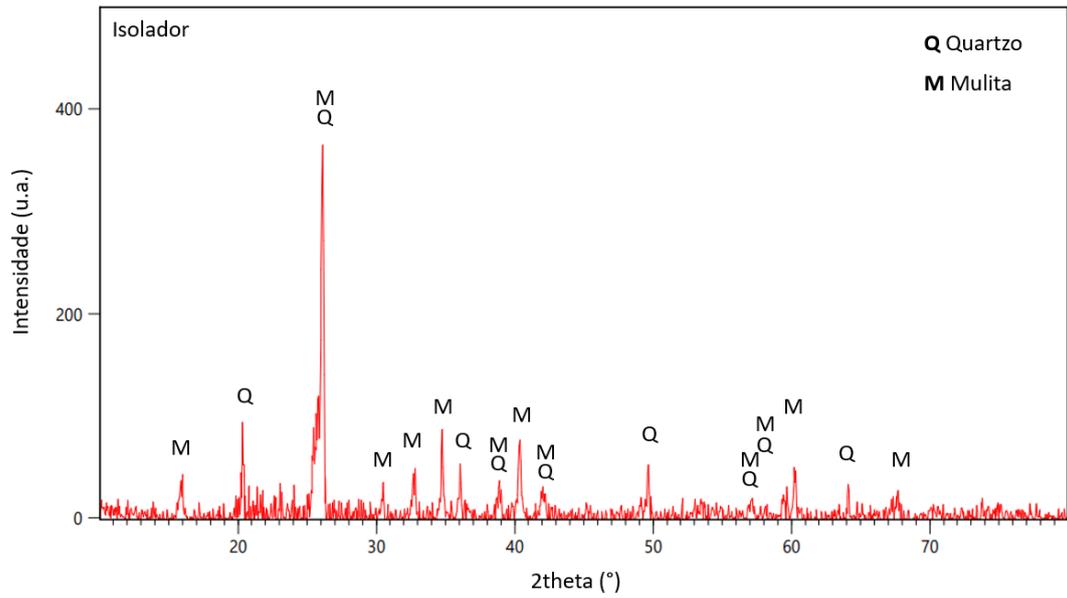


Figura 9 - Fases minerais do isolador reciclado obtidas através do Ensaio de DRX. Fonte: Autor

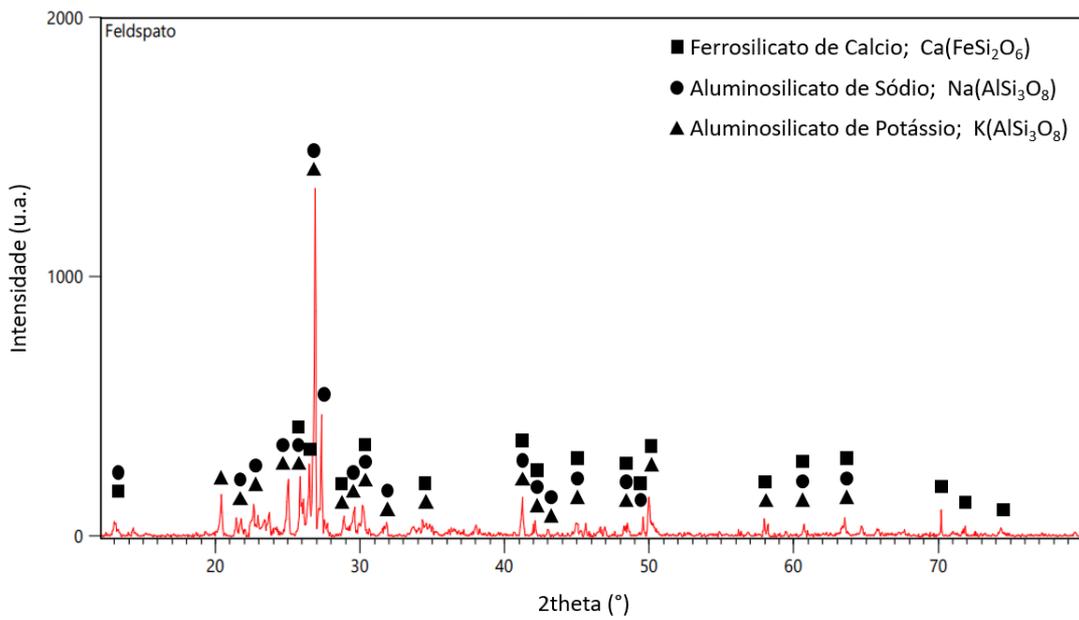


Figura 10 - Fases minerais do feldspato obtidas através do Ensaio de DRX. Fonte: Autor

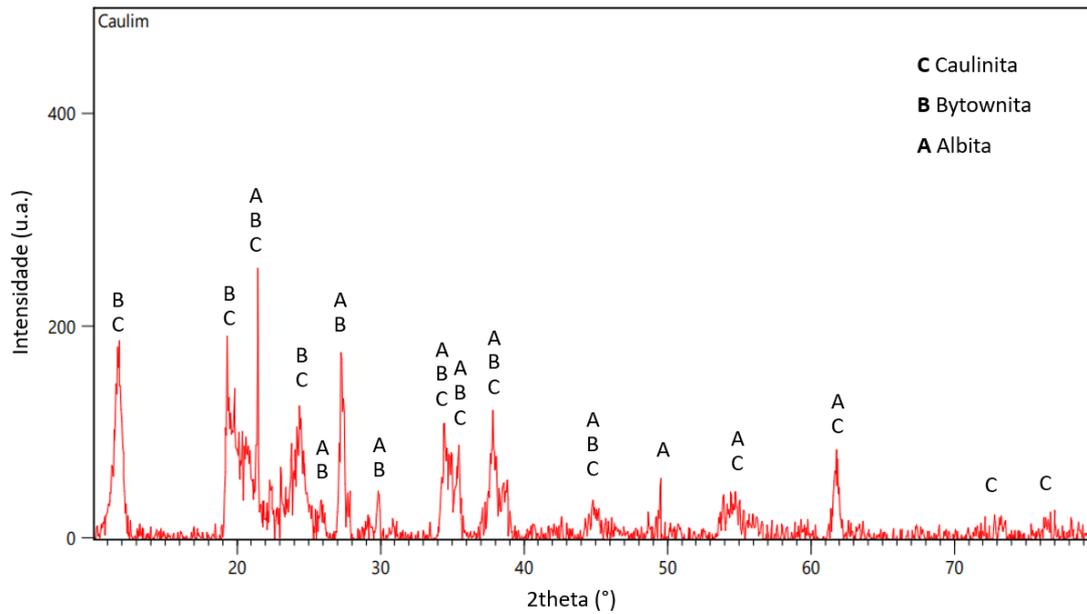


Figura 11 - Fases minerais do caulim obtidas através do Ensaio de DRX. Fonte: Autor

Após a britagem, em que ficavam partículas com e sem esmalte, optou-se por não fazer a separação do esmalte da peça, uma vez que, conforme indicado por Ferreira (2021), o esmalte pouco influencia a curva de gresificação da peça cerâmica.

4.2.Métodos

O *framework* do trabalho pode ser visto na Figura 12 anexo e mostra uma visão global da metodologia empregada neste trabalho.

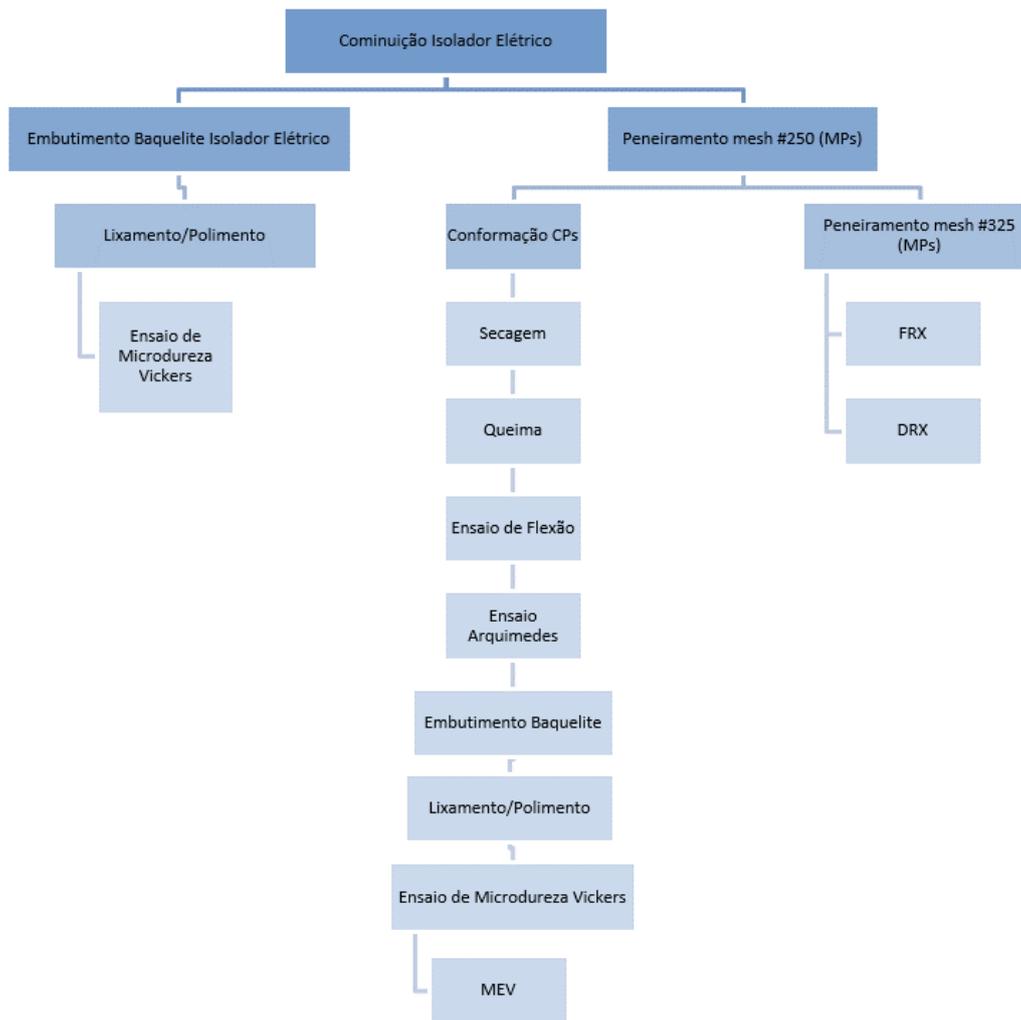


Figura 12 - Framework da metodologia adotada no trabalho. Fonte: Autor

4.2.1. Formulação

A composição inicial para este estudo foi baseada na formulação proposta por Ferreira (2021), em que se analisou o potencial de reciclagem dos mesmos isoladores elétricos de porcelana, empregando-se 40% de resíduo reciclado em um sistema ternário, como pode ser visto na Tabela 6. De acordo com a formulação proposta e com a composição das matérias-primas, as peças teriam 26,3% de Al_2O_3 . De acordo com a Norma IEC 60672-3, para serem caracterizadas como isoladores de classe C 110, deveriam apresentar teores de alumina entre 33% e 35%.

Tabela 6 - Formulação empregada no trabalho

Matérias-primas	Porcentagem (% em peso)	Composição de Al ₂ O ₃ (% em peso na MP)
Feldspato	20	21,1
Caulim	40	33,7
Isolador elétrico	40	21,5

4.2.2. Cominuição do Isolador Elétrico

A cominuição do isolador elétrico foi conduzida manualmente no Laboratório de Materiais Cerâmicos (LACER) da UFRGS, utilizando uma unidade de 1200 g com o auxílio de um martelo. Quando os fragmentos do resíduo atingiram aproximadamente 2cm de diâmetro, realizou-se o peneiramento com uma peneira de abertura de 16 mm ou mesh #5/8. Não foi feita a separação do esmalte do corpo de prova devido à baixa relevância da presença do esmalte nas propriedades finais da peça, como mostrado em estudo anterior (FERREIRA, 2021).

Após peneirar o resíduo com a malha #5/8, continuou-se o processo de britagem utilizando um moinho de bolas equipado com esferas de alumina, que é amplamente empregado na indústria cerâmica. Posteriormente, ao passar pela peneira de abertura 2 mm ou malha #10, o resíduo foi para a cominuição no moinho tipo planetário, que reduz ainda mais as dimensões do particulado. O material resultante passou pela peneira ABNT de abertura 63 µm ou malha 250. Durante o processo de cominuição e moagem, especialmente na britagem manual com martelo, ocorreu uma perda de cerca de 16% (200 g) do resíduo do isolador elétrico.



Figura 13 -Moinho tipo planetário utilizado para cominuição do isolador elétrico (LACER – UFRGS).
Fonte: Autor

A preparação dos corpos de prova foi realizada com base nessa dimensão de partícula. Para os ensaios de FRX e DRX, foi necessário reduzir o tamanho das partículas, continuando o processo de cominuição até o pó passar pela peneira de abertura 44 μm ou mesh #325.

4.2.3. Conformação dos Corpos de Prova

Para realizar a prensagem, a mistura foi homogeneizada em um moinho do tipo planetário por cinco minutos e posteriormente homogeneizada com água a uma taxa de 10%, usando mistura manual. A homogeneização envolveu a colocação da mistura umidificada em um saco fechado por 30 minutos, seguida por peneiramento em uma malha com abertura de 0,84 mm ou mesh #20. Foram fabricados 20 CPs retangulares para os testes de flexão e caracterização tecnológica. Apenas 16 desse foram caracterizados. Segue na Tabela 7 as dimensões médias dos CPs.

Tabela 7 - Medidas dos CPs à seco. Fonte: Autor

Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)	Peso (g)
60,64 \pm 0,01	20,34 \pm 0,01	5,31 \pm 0,05	11,16 \pm 0,17

A conformação dos CPs retangulares para o ensaio de resistência mecânica à flexão foi realizada com uma prensa hidráulica de capacidade 100 kgf/cm² ou 1500 psi localizada no LACER – UFRGS (Figura 14). As massas foram compactadas em prensagem uniaxial a 35 MPa durante 10 segundos. Em seguida, os CPs foram transferidos para uma estufa a uma temperatura de 110°C por mais 24 horas. As dimensões de cada peça após a prensagem e secagem foram medidas utilizando um paquímetro, e suas respectivas massas foram registradas em gramas por meio de uma balança analítica.



Figura 14 - Prensa hidráulica (à esquerda) utilizada na conformação dos corpos de prova (à direita) (LACER – UFRGS). Fonte: Autor.

4.2.4. Queima dos Corpos de Prova

Inicialmente, duas temperaturas de queima foram escolhidas: 1350°C e 1400°C. Foi utilizado o forno industrial do tipo mufla do fornecedor Sanchis localizado no LACER - UFRGS em condições de queima com uma taxa de 2,5°C/min e um patamar de 30min. O forno possui atmosfera aberta e natural e não controla o resfriamento após a queima. Em seguida, optou-se por realizar a queima à 1300°C no forno do tipo Carbolite localizado no LABIOMAT – UFRGS a uma taxa de 10°C/min até 1200°C e 5°C/min até 1300°C com patamar de 30min (Figura 15). As densidades das peças pré-queima foram pesadas e medidas com paquímetro, os valores de densidade podem ser vistos na Tabela 8.



Figura 15 - Forno industrial do tipo mufla utilizado para queima à 1350°C e 1400°C (à esquerda) (LACER – UFRGS) e forno industrial Carbolite utilizado para queima à 1300°C (à direita) (LABIOMAT – UFRGS). Fonte: Autor

As peças possuíam densidades pré-queima segundo a Tabela abaixo.

Tabela 8 - Densidade pré-queima dos CPs. Fonte: Autor

Temperatura	Densidade pré-queima (g/cm ³)	Quantidade de CPs
1300°C	1,66 ± 0,2	5
1350°C	1,66 ± 0,2	5
1400°C	1,64 ± 0,3	6

4.2.5. Ensaio de Flexão

Após a queima, realizou-se o teste de resistência à flexão à quatro pontos, o qual foi realizado no aparelho Shimadzu AG-X 50 kN localizado no LACER. Como pode ser visto na Figura 16.

A resistência mecânica foi determinada segundo a equação 3:

$$\sigma = \frac{3Pa}{bh^2} \quad (3)$$

Onde P é a carga aplicada em N, a é a distância entre o suporte inferior e o suporte superior, b é a largura da peça e h a altura. Os valores utilizados foram 10 mm para a , e as larguras e alturas dos CPs pós queima para os valores de b e h respectivamente.



Figura 16 - Ensaio de Flexão de 4 pontos utilizado no trabalho (LACER - UFRGS). Fonte: Autor

4.2.6. Teste de Porosidade e Ensaio de Arquimedes

Para o cálculo da porosidade aparente (PA), absorção de água (AA) e densidade Arquimedes após a queima foram medidas a massa seca, a massa úmida (24h submersos em água) e a massa submersa. O cálculo foi feito a partir das equações 4, 5 e 6:

$$AA (\%) = \frac{(m_{úmido} - m_{seco})}{m_{seco}} \times 100 \quad (4)$$

$$PA (\%) = \frac{(m_{úmido} - m_{seco})}{(m_{úmido} - m_{imerso})} \times 100 \quad (5)$$

$$DA = \frac{(m_{seco})}{(m_{úmido} - m_{imerso})} \times d_{água} \quad (6)$$

4.2.7. Ensaio de Microdureza Vickers

O ensaio de microdureza Vickers foi conduzido no Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS. Foi utilizado o aparelho Tukon 2100B da marca Wilson Instruments conforme a Figura 17. A microdureza Vickers (HV) foi calculada a partir da equação 7, onde P é a carga aplicada e a é a metade do tamanho da diagonal média da indentação. A carga P aplicada foi de 1kgf durante 10 s. O tamanho da diagonal foi observado com o auxílio de um microscópio eletrônico.

$$HV = 1,854 \frac{P}{2a^2} \quad (7)$$



Figura 17 - Ensaio de Microdureza Vickers (LAMEF - UFRGS). Fonte: Autor

No estudo feito por Bragança e Bergmann (2006), a tenacidade de uma porcelana com baixo teor de alumina foi investigada, com foco na dureza e resistência mecânica do material, usando o teste de indentação como uma abordagem ágil para avaliação de resistência.

O método utiliza do resultado de dureza Vickers (HV) para calcular a tenacidade K_{IC} segundo a equação 8, onde E é o módulo de elasticidade, P a carga do teste de dureza, e c o tamanho da fissura.

$$K_{IC} = \frac{0,016(E/HV)^{1/2} \cdot P}{c^{3/2}} \quad (8)$$

O módulo de tenacidade (E) pode ser calculado de acordo com a equação 9 e 10. Onde p é a porosidade, E_n o módulo de elasticidade das fases presentes, e f_n a fração de cada fase.

$$E = E_0(1 - 1,9p + 0,9p^2) \quad (9)$$

$$E_0 = E_1f_1 + E_2f_2 + \dots + E_nf_n \quad (10)$$

4.2.8. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para estudar a microscopia da cerâmica foi utilizada a análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com o auxílio do equipamento CARL ZEISS EVO MA10 localizado no LACER – UFRGS. O equipamento pode ser visto na Figura 18.



Figura 18 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (LACER - UFRGS). Fonte: Autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Curva de Gresificação, Porosidade e Densidade Aparente

Analisando todos os indicadores, é possível aferir a temperatura de sinterização ideal para as formulações apresentadas neste trabalho. A temperatura de sinterização ideal é considerada aquela em que a absorção de água atinge valores menores que 0,5% (Ferreira, 2021). Os resultados podem ser vistos na Tabela 9.

Tabela 9 - Absorção de água, retração linear, porosidade e densidade aparente após a queima. Fonte: Autor

Temperatura (°C)	AA (%)	RL (%)	PA (%)	DA (g/cm ³)
1350	0,32 ± 0,05	11,30 ± 0,32	0,71 ± 0,03	2,27 ± 0,03
1400	0,51 ± 0,10	10,99 ± 0,62	1,08 ± 0,22	2,14 ± 0,62

Pode-se inferir que a peça inicia um processo de super-queima a partir de 1400°C. A super-queima é um processo caracterizado pelo inchamento ou *bloating* do corpo cerâmico com o aumento do volume de poros, esse fenômeno pode ser observado pelo pequeno aumento da AA a partir de um mínimo e diminuição da RL a partir de um máximo. A PA mostra comportamento similar à AA, atingindo menores valores à 1350°C e aumentando à 1400°C (Figura 20).

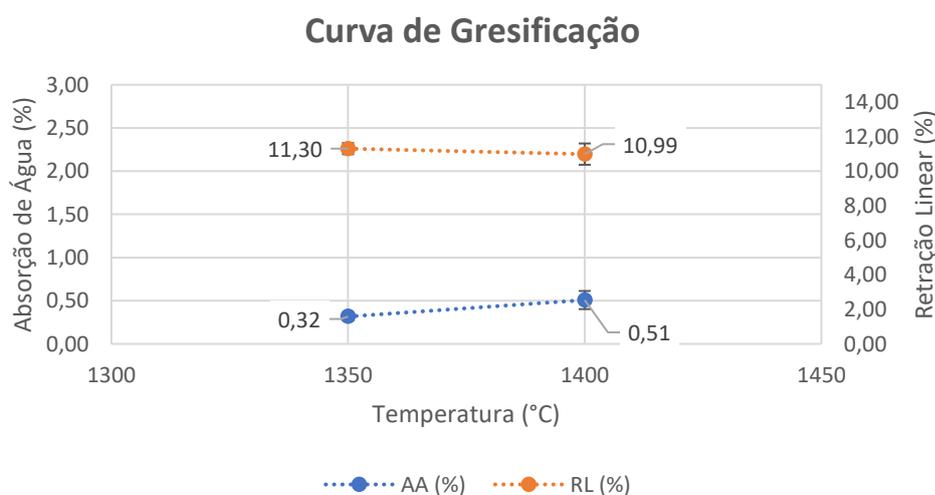


Figura 19 - Curva de Gresificação da peça à 1350°C e 1400°C. Fonte: Autor

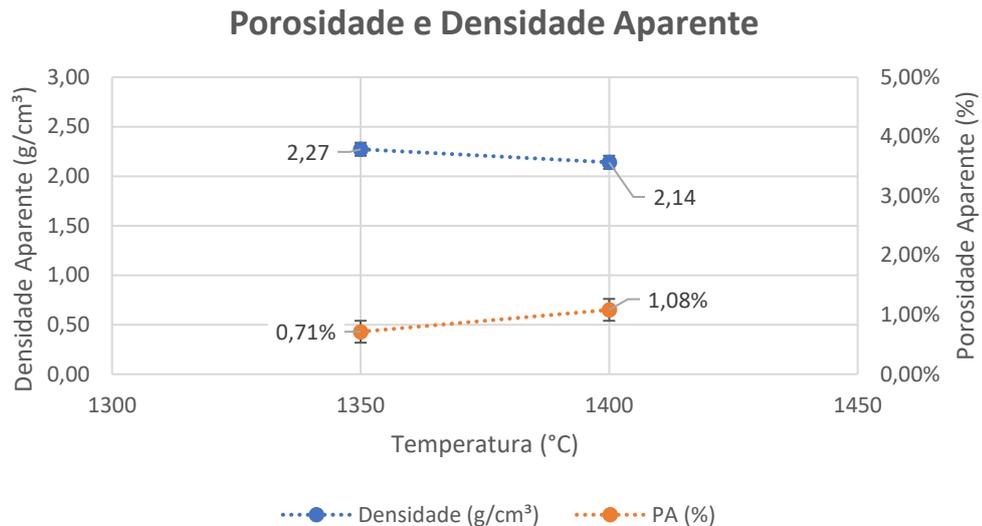


Figura 20 - Porosidade e densidade aparente da peça queimada à 1350°C e 1400°C. Fonte: Autor

Normalmente, almeja-se a densificação máxima na queima de um material, já que as maiores resistências mecânicas são obtidas nas maiores densidades. A queima a temperatura de 1350°C produziu uma peça com densidade maior que a queimada a 1400°C, fenômeno que acompanha o aumento de PA com o aumento de temperatura. Esse comportamento também pode ser associado analisando a RL, as peças à 1350°C tiveram ligeira maior retração. Quanto maior a RL e menor a PA, maior tende a ser a densidade. A partir das análises da porosidade aparente, densidade aparente e curva de gresificação, podemos inferir que a melhor temperatura de sinterização foi a de 1350°C, pois nela, observamos a menor AA e abaixo de 0,5% como desejado, e menor PA.

5.2. Resistência Mecânica

Geralmente, uma maior densidade e uma menor porosidade aparente produzem melhores resistências mecânicas, como encontrado no trabalho anterior (FERREIRA, 2021). Os trabalhos de Chinelatto et al. (2004) também apresentaram este comportamento. Os resultados de resistência mecânica podem ser vistos na Figura 21. Observa-se uma maior resistência (40,36 MPa; Tabela 10) na peça queimada à 1300°C, por consequência da maior densidade em relação às peças de 1350°C e 1400°C. Sabe-se que uma menor porosidade tende a elevar a resistência máxima, já que poros funcionam como concentradores de tensão no material, assim, uma menor porosidade aparente produziria peças mais resistentes.

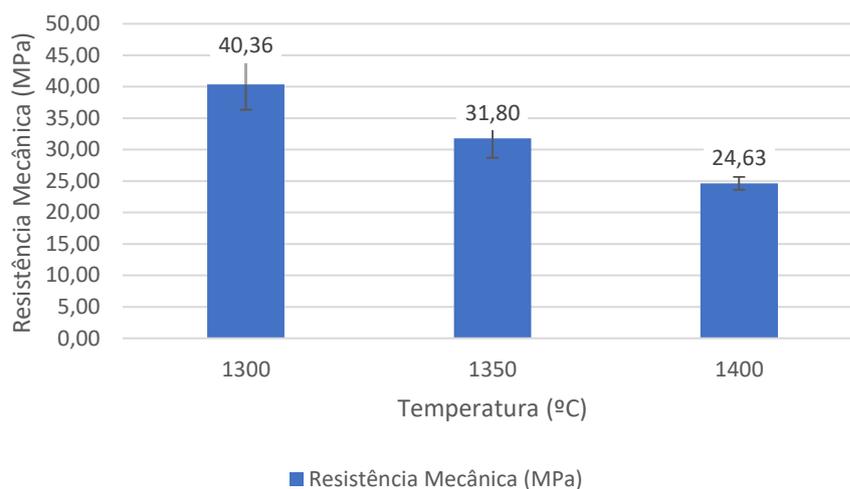


Figura 21 - Resistência Mecânica das peças queimadas à 1350°C e 1400°C. Fonte: Autor

Comparando com os resultados obtidos por L. Ferreira, L. Ribas, V. C. de Souza, S. R. Bragança (2018) em que ambos os trabalhos analisaram a mesma composição com matérias-primas muito parecidas, obtiveram-se neste presente trabalho, valores consideravelmente menores de resistência mecânica em ambas as temperaturas. Este fato poderia ser explicado pela utilização de um forno diferente.

Tabela 10 - Comparação com as resistências mecânicas obtidas no trabalho de Ferreira, L., Ribas, L., De Souza, V. C., Bragança, S. R., (2018). Fonte: (FERREIRA, RIBAS, DE SOUZA, BRAGANÇA, 2018)

Condição de Queima	Temperatura (°C)	Resistência Mecânica (MPa)	
		RIBAS (2024)	(FERREIRA, RIBAS, DE SOUZA, BRAGANÇA, 2018)
Labiomat	1300	40,36 ± 4,03	45,75 ± 7,78
LACER	1350	31,80 ± 3,10	54,35 ± 5,15
LACER	1400	24,36 ± 0,84	42,10 ± 8,47

Assim foi conduzido uma nova queima à 1300°C em um forno tipo Carbolite localizado no LABIOMAT – UFRGS, com diferentes condições de queima. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 11. Verifica-se um aumento considerável na resistência mecânica (40,36 MPa) mesmo com uma peça ainda não tão bem sinterizada (AA em 0,7% e PA em 1,66%), mostrando a grande influência que as condições de queima e o tipo de forno podem fazer na performance da porcelana. O resultado se aproximou ao encontrado por Ferreira (2021) de 45,75 MPa na mesma temperatura. Ainda assim, os resultados obtidos não alcançaram os requisitos da Norma IEC – 60672 (1995) para porcelanas silicosas não esmaltadas, que estabelece uma resistência mecânica mínima de 50 MPa. Este valor é sujeito a aumento caso se

queimasse a uma temperatura mais elevada para melhor sinterização (menor AA e maior RL). De acordo com Ferreira (2021) a temperatura de queima seria entre 1350° e 1375°C. Além disso, sabendo que a adição de alumina aumenta a resistência em porcelanas, conforme documentado na literatura (LIEBERMANN, 2001) (CHINELATTO 2004), e que o material, contém apenas 26,3% de alumina, abaixo dos 33% exigidos pela norma para a classificação como C110, ainda há margem para se adicionar alumina e aumentar a resistência mecânica, o que pode ser feito em uma etapa posterior a este trabalho.

Tabela 11 - Propriedade mecânicas e físicas da peça queimada à 1300°C. Fonte: Autor

Condição de Queima	Temperatura	AA (%)	PA (%)	DA (g/cm³)
Labiomat	1300°C	0,70 ± 0,14	1,66 ± 0,33	2,38 ± 0,01
LACER	1350°C	0,32 ± 0,05	0,71 ± 0,03	2,27 ± 0,03
LACER	1400°C	0,51 ± 0,10	1,08 ± 0,22	2,14 ± 0,62

5.3. Microdureza Vickers

Para o ensaio de microdureza, optou-se por escolher apenas a peça com melhor sinterização, ou seja, a queimada à 1350°C, e compará-la com a dureza do isolador elétrico descartado. Como podemos observar na Tabela 12, a peça queimada à 1350°C teve uma dureza ligeiramente maior que a do isolador, com maior média e desvios padrões muito similares.

Tabela 12 - Valores de microdureza HV do isolador descartado e peça queimada à 1350°C. Fonte: Autor

	Isolador	CP 1350°C
Média	660,2	674,0
Desvio Padrão	49,9	48,8
Quantidade de amostras	5	6

Para verificar se duas amostras são significativamente parecidas estatisticamente, podemos utilizar um teste de comparação de médias. O teste *t-Student* para amostras independentes é usualmente utilizado para essa finalidade. Partindo da hipótese nula (H_0) de que

as duas populações têm a mesma média e com nível de significância $\alpha = 0,05$. Seguindo a equação 11, onde x são as médias populacionais, s_p os desvios padrões e n os tamanho amostral. Obtém-se um valor de $t_0 = 0,46$, que seria menor que o valor de $t^* = 2,262$ para confiança de 95% e 9 graus de liberdade. Assim, há 95% de probabilidade de as duas populações serem a mesma amostra.

$$t_0 = \frac{(x_1 - x_2)}{\sqrt{s_p^2 (n_1^{-1} + n_2^{-1})}} \quad (11)$$

Os valores encontrados estão maiores que os valores de dureza de porcelanas silicosas (na faixa de 600 HV) encontrados por Cho et al.. (2019), porém ligeiramente menores que de porcelanas aluminosas (na faixa de 700 HV). Bragança e Bergmann (2006) mediram uma microdureza na faixa de 719 HV e 685 HV para porcelanas com 25% de alumina. Nos trabalhos de Belhouchet et al. (2019) a adição de vidro reciclado aumentou a dureza de 5 GPa (em torno de 500 HV) para valores de 7 GPa (em torno de 700 HV) em porcelanas silicosas. Os resultados mostram que a dureza do CP produzido está de acordo com a bibliografia.

5.4. Tenacidade à Fratura

As indentações produzidas pelo ensaio de microdureza no CP queimado à 1350°C podem ser vistas na Figura 22. Escolheu-se uma das indentações se medir a tenacidade (K_{IC}) de acordo com as equações 8, 9 e 10. Conforme Norton (1970), a composição de porcelana silicosa seria 65% de fase vítrea, 30% de mulita e 5% de quartzo, e os valores do módulo de elasticidade (E) seriam 70 GPa, 150 GPa e 76 GPa, respectivamente. A partir destes valores se encontrou uma tenacidade de 1,35 MPa/m^{1/2}. Valores de tenacidade à fratura um pouco abaixo aos encontrados por Bragança e Bergmann (2006) para porcelanas aluminosas.

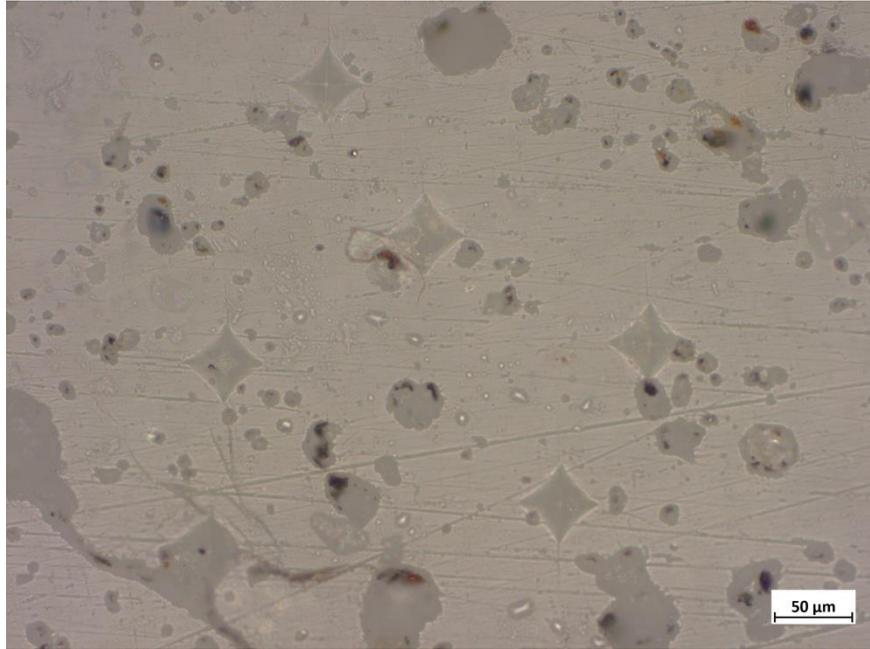


Figura 22 - Microestrutura do CP à 1350°C mostrando as indentações. Fonte : Autor.

5.5. Microestrutura

As microestruturas da peça e do isolador foram observadas através da técnica de MEV. Pela Figura 23 e Figura 24 é possível observar a distribuição e o tamanho de poros na superfície. A peça queimada à 1350°C, mesmo com uma baixa AA e PA ainda apresentou poros maiores que os encontrados no isolador, chegando a dimensões de ordem de 50 μm ou mais. Sabemos que o controle de porosidade é importante para se melhorar as propriedades dielétricas da peça (FERREIRA, 2021). Observa-se um controle melhor da porosidade no isolador descartado, como levantado por Bragança e Bergmann (2004), poros menores e mais arredondados influenciam positivamente na resistência mecânica e conseqüentemente na tenacidade à fratura. Após feitas as análises da microestrutura com fase vítrea, foram submetidas as amostras a um ataque químico com HF durante 10s. Nas Figuras 25 e 26, pode-se observar a microestrutura da peça queimada à 1350°C e do isolador descartado sem a presença da fase vítrea e mostrando a presença das fases mulita primária e secundária, atuando como agentes de tenacificação. Foi observado que o isolador atuava como fase refratária na formulação, já que permaneceu com dimensões relativamente grandes após a queima. No isolador descartado foi observado a presença de quartzo como fase refratária.

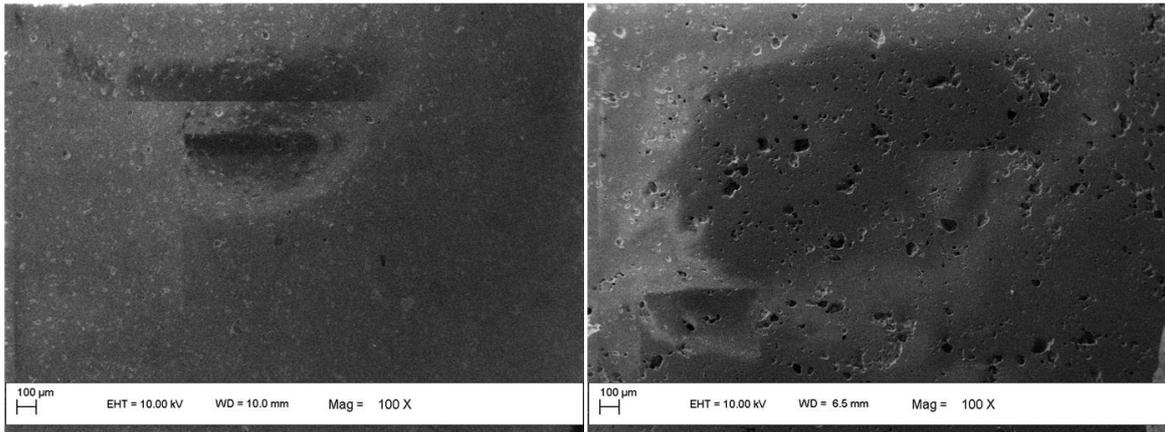


Figura 23 - Microestrutura do isolador descartado (à esquerda) e CP queimado à 1350°C (à direita) com 100x de aumento. Fonte: Autor

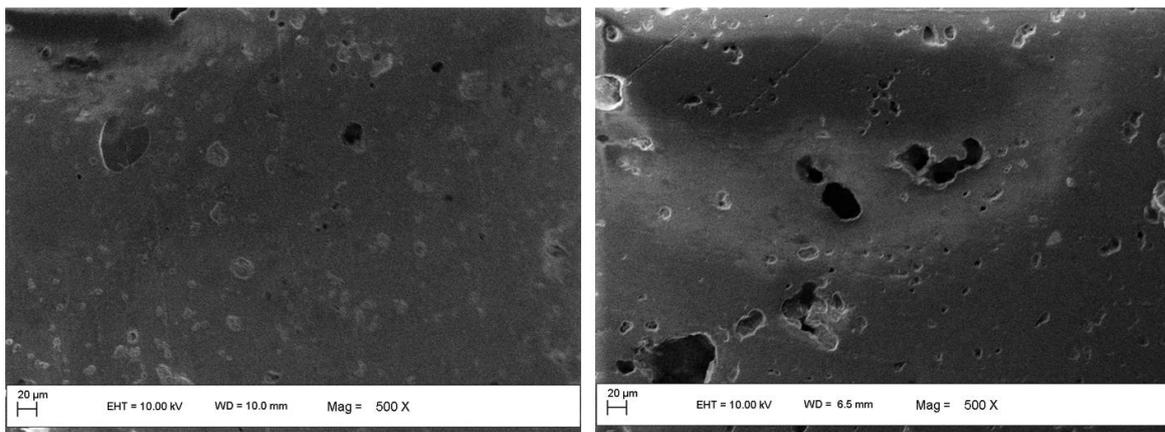


Figura 24 - Microestrutura do isolador descartado (à esquerda) e CP queimado à 1350°C (à direita) com 500x de aumento. Fonte: Autor

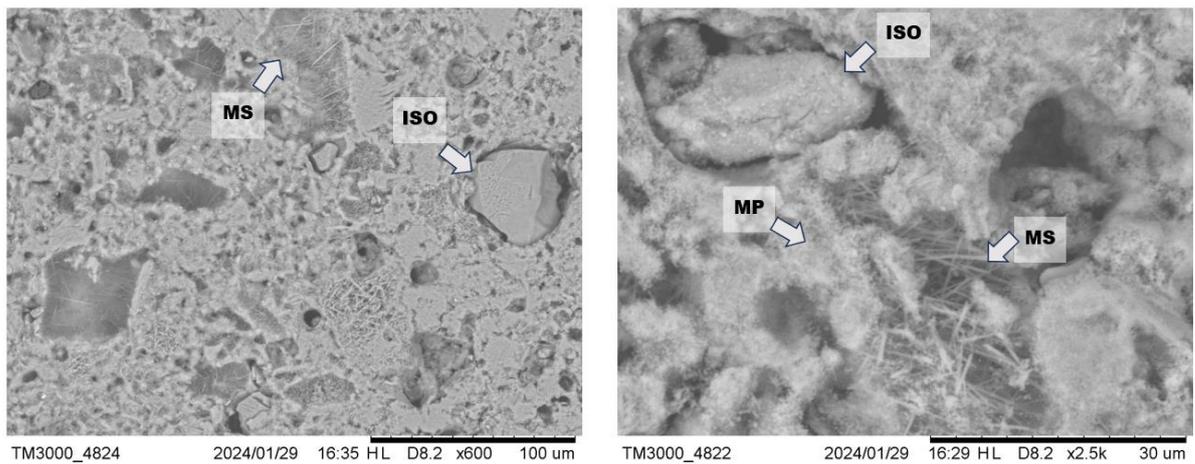


Figura 25 - Microestrutura sem fase vítrea da peça queimada à 1350°C em diferentes magnitudes. Fonte: Autor

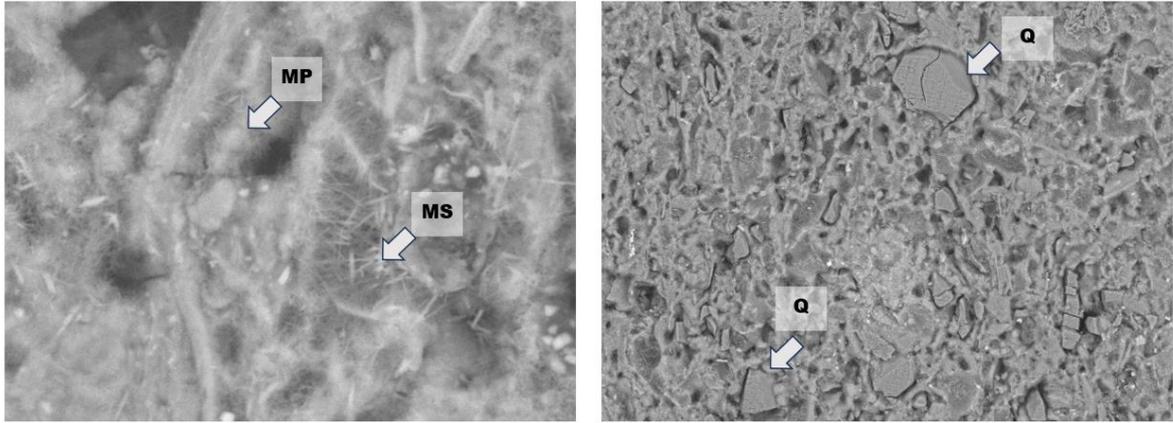


Figura 26 - Microestrutura sem fase vítrea do isolador descartado em diferentes magnitudes. Fonte: Autor

6. CONCLUSÕES

Diante das análises realizadas sobre a porcelana composta por 40% de resíduo de isolador elétrico, 40% de argila caulinitica e 20% de feldspato, examinamos detalhadamente o processo de queima por meio de parâmetros como porosidade, densidade aparente, curva de gresificação e microestrutura. Ao avaliar a absorção de água das peças queimadas a 1350°C e 1400°C, constatamos valores significativamente baixos (0,32% e 0,51% respectivamente), abaixo e próximo a 0,5%, indicando uma boa sinterização do material.

A pesquisa destacou a influência significativa da condição de queima e do tipo de forno na performance final da porcelana. Notavelmente, verificou-se que, ao utilizar um tipo específico de forno, mesmo com uma sinterização inferior, foi possível alcançar valores superiores de resistência mecânica a 1300°C, em comparação com a resistência mecânica obtida a 1350°C sob outra condição de queima e em um diferente tipo de forno. Contrariando as expectativas, não alcançamos os valores esperados de resistência mecânica para porcelanas silicosas com essa composição, ao compararmos com estudos anteriores que obtiveram valores consideravelmente mais elevados. Os resultados ficaram abaixo da Norma IEC – 60672 (1995) que estabelece um mínimo de 50 MPa. No entanto, pode-se concluir da importância do tipo de forno e na otimização da queima para o aumento da resistência mecânica. Além disso, pode-se aumentar o teor de alumina na formulação do isolador.

A dureza do isolador descartado e da peça queimada à 1350°C apresentaram valores muito próximos, nas médias de 660 HV e 674 HV, respectivamente. O teste *t-Student* provou, com 95% de probabilidade, de ambas as populações têm a mesma média. Comprovando, assim, que a dureza da peça produzida se assemelha aos dos isoladores comercializados. A tenacidade à fratura da peça queimada à 1350°C apresentou valores abaixo as de porcelanas aluminosas. A comparação da microestrutura do isolador descartado e da peça queimada à 1350°C mostrou um melhor controle de porosidade, pois, foi possível observar poros menores, mais arredondados e mais bem distribuídos no isolador descartado.

Em conclusão, os resultados obtidos destacam que, apesar das variações nos resultados, a reciclagem do isolador elétrico permanece promissora e com um grande potencial. A análise das propriedades mecânicas em relação às normativas vigentes revela áreas específicas que podem ser ajustadas para atender aos requisitos estabelecidos. O fato de a resistência mecânica não ter alcançado os valores da norma não desmerece a significativa contribuição da reciclagem do isolador elétrico na composição cerâmica, indicando a continuidade de oportunidades para uma utilização mais sustentável de materiais descartados na indústria da energia elétrica.

7. SUGESTÃO PARA FUTUROS TRABALHOS

Aprofundar o estudo das propriedades dielétricas da formulação empregada para averiguar a possibilidade de se produzir um isolador de média tensão.

Desenvolver uma microestrutura diferente para se alcançar o valor de resistência mecânica de 50 MPa estabelecidos pela Norma IEC – 60672.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABU-JDAYIL, Basim et al.. Traditional, state-of-the-art and renewable thermal building insulation materials An overview. *Construction and Building Materials*, v. 214, p. 709-735, 2019.

BELHOUCHE, K., BAYADI, A., BELHOUCHE, H., & ROMERO, M. (2019). Improvement of mechanical and dielectric properties of porcelain insulators using economic raw materials. *boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*, 58(1), 28-37.

BIESEN, R.; GEYER, G. A.; SCHULLER, K. Investigations concerning the workability and properties of a high-alumina porcelain body. In: CERAM. FORUM INT./BER. DKG Ceram. Forum Int./Ber. DKG. 1987. p. 376.

BISHAI, A. M.; AL-KHAYAT, BH F.; AWNI, F. A. Dielectric and physicomechanical properties of electrical porcelain bodies. *American Ceramic Society bulletin*, v. 64, n. 4, p. 598-601, 1985.

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.

BRAGANÇA, S. R.; BERGMANN, C. P. Hardness and toughness of aluminum porcelains measured by the indentation test. In: *Materials science forum*. Trans Tech Publications Ltd, 2006. p. 562-567.

BRAGANCA, Saulo Roca; BERGMANN, Carlos Perez. Aspectos teóricos e práticos sobre a resistência mecânica de porcelanas. *Cerâmica*, v. 50, p. 145-155, 2004.

BRAUNGER, M. L. et al.. Electrical conductivity of silicate glasses with tetravalent cations substituting Si. *Journal of non-crystalline solids*, v. 358, n. 21, p. 2855-2861, 2012.

BUCHANAN, R. C. *Ceramic materials for electronics: processing, properties, and applications*. 2nd edition New York, 1986.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. *Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução*. LTC, v. 8ª Edição, 2012

CARBAJAL, Leticia et al.. Properties related phase evolution in porcelain ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 27, n. 13-15, p. 4065-4069, 2007.

CARTER, C. Barry; NORTON, M. Grant. Ceramic materials: science and engineering. New York: springer, 2º edition, 2013.

CARTY, William M.; SENAPATI, Udayan. Porcelain—raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 81, n. 1, p. 3-20, 1998.

CHATTERJEE, A. et al.. Efeito da razão entre feldspatos sódico e potássico no desenvolvimento de fases e microestrutura de porcelanatos queimados. *Cerâmica Industrial*, v. 6, n. 5, p. 23-26, 2001.

CHAUDHURI, S. P.; SARKAR, P. Dielectric behaviour of porcelain in relation to constitution. *Ceramics international*, v. 26, n. 8, p. 865-875, 2000.

CHAUDHURI, S. P.; SARKAR, P.; CHAKRABORTY, A. K. Electrical resistivity of porcelain in relation to constitution. *Ceramics international*, v. 25, n. 1, p. 91-99, 1999.

CHINELATTO, A. L.; DE SOUZA, D. P. F. Porcelanas elétricas aluminosas: Parte I- Revisão da literatura. *Cerâmica*, v. 50, p. 62-68, 2004.

CHINELATTO, A. L.; DE SOUZA, D. P. F. Porcelanas elétricas aluminosas: Parte II- desenvolvimento da microestrutura e sua influência no módulo de ruptura. *Cerâmica*, v. 50, p. 172-184, 2004.

CHO, Jun-Young et al.. Evaluation of Microstructure, Phases, and Mechanical Properties of Aged Porcelain Insulator. *Korean Journal of Materials Research*, v. 29, n. 3, p. 137-142, 2019.

CRUZ, Ricardo Thomé da; PEDRASSANI, Jaime; BRAGANÇA, Saulo Roca. Faianças, grês e porcelanas: matérias-primas, moagem, conformação, secagem, queima, esmaltação, decoração, defeitos e propriedades gerais. 2022..

CST ISOLADORES. Disponível em: <https://www.cst-isoladores.com.br/isoladores-eletricos>. Acessado em 18 jan 2024.

DEER, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., Introduction to the Rock-Forming Minerals, 3a edição, Berforts Information Press, Stevenage, Hertfordshire, UK, 2013.

DESHMUKH, Kalim et al.. Dielectric spectroscopy. In: *Spectroscopic Methods for Nanomaterials Characterization*. Elsevier, 2017. p. 237-299.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ENERGIA ELÉTRICA 2022 - Ano base 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico->

168/Fact%20Sheet%20-%20Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202022.pdf >. Acessado em 02 nov 2023.

ENERGISA - Especificação Técnica Unificada - Ano 2019. Disponível em: <https://www.energisa.com.br/Documents/Normas%20t%C3%A9cnicas/ETU-126.1%20-%20Isolador%20tipo%20pilar%20distribuicao%20porcelan1.pdf>>. Acessado em 07 fev 2024.

FERREIRA, L., RIBAS, L., De SOUZA, V. C., BRAGANÇA, S. R., & de Materiais Cerâmicos, L. L. (2018, November). Avaliação da reutilização de isoladores elétricos de porcelana em cerâmicas triaxiais. In Proceedings of the 23º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, Brazil (pp. 4-8).

FERREIRA, Leandro Vieira. Reciclagem de isoladores cerâmicos em substituição ao quartzo e à alumina em massas de porcelanas elétricas. 2021.

FONTANELLA, CAi; DE OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D. Recobrimentos poliméricos hidrofóbicos sobre isoladores elétricos de porcelana. Matéria (Rio de Janeiro), v. 13, p. 624-635, 2008.

FREEPIK. Copyright © 2010-2024 Freepik Company S.L. Disponível em: https://br.freepik.com/fotos-premium/polo-eletrico-e-o-ceu-com-a-luz-do-sol-no-verao_2756535.htm#from_view=detail_alsolike > Acessado em 18 jan 2024.

GENÇOĞLU, Muhsin Tunay; CEBECI, Mehmet. The pollution flashover on high voltage insulators. Electric Power Systems Research, v. 78, n. 11, p. 1914-1921, 2008.)

GLOBAL MARKET INSIGHTS (GMI). High Voltage Electric Insulators Market - By Voltage. Disponível em: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/high-voltage-electric-insulators-market> > Acessado em 02 nov 2023.

GOULART, Evaristo Pereira et al.. Correlação entre o comportamento mecânico e a microestrutura de porcelanas com teores crescentes de alumina. 1989.

HOSSAIN, Sk S.; ROY, P. K. Sustainable ceramics derived from solid wastes A review. Journal of Asian Ceramic Societies, v. 8, n. 4, p. 984-1009, 2020.

KOBAYASHI, Y. et al.. Compositions for strengthening porcelain bodies in alumina-feldspar-kaolin system. British ceramic transactions, v. 93, n. 2, p. 49-52, 1994.

LERDPROM, W. et al.. Temperature dependence of electrical conductivity of a green porcelain mixture. Journal of the European Ceramic Society, v. 37, n. 1, p. 343-349, 2017.

LIEBERMANN, J. Avoiding quartz in alumina porcelain for high-voltage insulators, part 2. American Ceramic Society Bulletin, v. 80, n. 7, p. 43-48, 2001.

LIEBERMANN, J. New effective ways toward solving the problem of contamination of porcelain insulators. Refractories and industrial ceramics, v. 43, n. 1-2, p. 55-64, 2002.

MANCINI, S.D., GIANELLI, B.F., BATISTA, V.X., et al., “Oportunidades de Melhoria na Gestão de Resíduos em Empresas Distribuidoras de Eletricidade: o Caso da AES Eletropaulo”, Revista Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL 2011, n. 4, pp. 101-103, 2011.

MANTOVANI, Vanessa Alves et al.. Comparison of polymers and ceramics in new and discarded electrical insulators: reuse and recycling possibilities. Matéria (Rio de Janeiro), v. 18, p. 1549-1562, 2013.

MASLENNIKOVA, G. N. et al.. Influence of feldspar on the properties of mullite electrical porcelain. Glass and Ceramics, v. 41, p. 450-452, 1984.

MENG, Yong et al.. Fabrication and microstructure investigation of ultra-high-strength porcelain insulator. Journal of the European Ceramic Society, v. 32, n. 12, p. 3043-3049, 2012.

MERGA, Andualem et al.. Fabrication of electrical porcelain insulator from ceramic raw materials of Oromia region, Ethiopia. Heliyon, v. 5, n. 8, 2019.

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, Frederick Harwood. Fine ceramics: technology and applications. (No Title), 1970.

OCAMPO, Mayra Alejandra Arias; GONZÁLEZ, Andrés Felipe Rojas. Ceramic waste reuse and valorization alternatives: A review. Revista EIA, v. 20, n. 40, p. 4018 pp. 1-19, 2023.

PEREIRA, Valdir M. et al.. Porcelain waste from electrical insulators in self-leveling mortar: Materials characterization and properties. Journal of Building Engineering, v. 61, p. 105297, 2022.

PIVA, Diógenes Honorato. Influência da atmosfera de sinterização sobre as propriedades elétricas de porcelanas aluminosas contendo diferentes concentrações de Fe₂O₃. 2014.

SOUZA SANTOS, Pécisio. Ciência e tecnologia de argilas. São Paulo, EDUSP, 1989.

SUGIYAMA, N.; HARADA, R.; ISHIDA, H. Effect of alumina addition on the feldspathic porcelain bodies. JOURNAL-CERAMIC SOCIETY OF JAPAN INTERNATIONAL EDITION, v. 105, p. 134-139, 1997.

VINCENZINI, P. Fundamentals of Ceramic Engineering, Elsevier Applied Science Ltd., New York, (1991) p. 27-50.

WARSHAW, S. I.; SEIDER, R. Comparison of strength of triaxial porcelains containing alumina and silica. Journal of the American Ceramic Society, v. 50, n. 7, p. 337-343, 1967.

Anexo 1:

