

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Jony Cesar Tomelin

**INFLUÊNCIA DO COMPOSTO GRANILHA/ESMALTE
CERÂMICO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA
DE MÉDIA E ALTA TENSÃO**

Florianópolis
2010

Jony Cesar Tomelin

**INFLUÊNCIA DO COMPOSTO GRANILHA/ESMALTE
CERÂMICO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA
DE MÉDIA E ALTA TENSÃO**

Dissertação submetida à Universidade Federal
de Santa Catarina para a obtenção do grau de
mestre em Ciência e Engenharia de Materiais
Orientador: Prof. Antonio Pedro Novaes de
Oliveira
Co-orientador: Professor Dachamir Hotza

Florianópolis
2010

Jony Cesar Tomelin

**INFLUÊNCIA DO COMPOSTO GRANILHA/ESMALTE
CERÂMICO NO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE
ISOLADORES ELÉTRICOS DE PORCELANA DE MÉDIA E
ALTA TENSÃO**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de mestre em Ciência e Engenharia de Materiais especialidade Ciência e Engenharia de Materiais e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais.

Florianópolis, 20 de outubro de 2010

ORIENTADOR - PROF. DR. ANTONIO PEDRO NOVAES DE
OLIVEIRA

CO-ORIENTADOR - PROF. DR. DACHAMIR HOTZA

COORDENADOR DO PGMAT - PROF. DR. CARLOS A. S. DE
OLIVEIRA

BANCA EXAMINADORA:

PRESIDENTE – PROF. DR. MARCIO CELSO FREDEL - UFSC

PROF. DR. ADILSON LUIZ CHINELATTO - UEPG

PROF. DR. CARLO REQUIÃO DA CUNHA - UFSC

**Com muito carinho,
aos meus pais, namorada e amigos.**

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Antonio Pedro Novaes de Oliveira e ao co-orientador Professor Dachamir Hotza, pelo auxílio e direcionamento durante o desenvolvimento deste trabalho.

À empresa Porcelanas Industriais Germer S/A pela oportunidade de desenvolvimento do trabalho de pesquisa, e por disponibilizar a estrutura necessária para análises e avaliação industrial.

Aos colaboradores da empresa Porcelanas Industriais Germer S/A, os quais estiveram envolvidos com o presente trabalho, de forma especial ao aluno de Graduação em Engenharia de Materiais Ricardo Perin, pelo auxílio durante o desenvolvimento do seu estágio curricular na empresa.

Aos meus pais, irmã, e à minha namorada Schanna Gabrielle Marquardt, pelo apoio e incentivo para a conclusão do trabalho.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades dos isoladores elétricos conforme IEC 672 [2]	29
Tabela 2. Coeficientes de expansão térmica linear de algumas fases cerâmicas [31], [32].....	44
Tabela 3. Composição de matérias-primas para produção de membranas cerâmicas de cordierita [33].....	45
Tabela 4. Formulações de granilhas preparadas para este trabalho.Percentuais (%) em massa.....	55
Tabela 5. Teor de sólidos e densidade aparente das barbotinas.	56
Tabela 6. Composição química das matérias primas. (P.F.: Perda ao Fogo).	69
Tabela 7. Características físicas e térmicas das matérias-primas (5 corpos-de-prova por amostra).	72
Tabela 8. Distribuição granulométrica das matérias-primas.	74
Tabela 9. Coeficientes de expansão térmica linear de esmaltes cerâmicos e substrato cerâmico utilizados neste trabalho.	77
Tabela 10. Caracterização física das granilhas estudadas neste trabalho (valores médios de cinco corpos-de-prova para cada formulação).	78
Tabela 11. Caracterização mineralógica das granilhas (percentual (%) em massa de fases cristalinas).	80
Tabela 12. Coeficientes de expansão térmica linear em função do intervalo de temperatura de medição para as granilhas estudadas neste trabalho.....	86
Tabela 13. Rugosidade média (Ra) e rugosidade total (Rt) em função da composição de granilha e características do substrato.	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Micrografia (MEV) referente a uma porcelana quartzosa C110. S: Mulita secundária, P: Mulita primária, Q: Quartzo. Ataque: HF 20% por 10s. [22]	34
Figura 2. Micrografia (MEV) evidenciando o efeito do quartzo na microestrutura de porcelana quartzosa. Ataque: HF 20% por 10s. [22]	35
Figura 3. Fotografia de ferragens típicas de isoladores maciços tipo Pino. [28].....	41
Figura 4. Fotografia de ferragens típicas de isoladores tipo Disco. [28]	41
Figura 5. Fotografia ilustrando isoladores tipo suspensão montado na linha. [29]	41
Figura 6. Gráfico mostrando a expansão térmica em função da temperatura de massa, esmaltes e granilha cerâmicos. Adaptado de [31].	46
Figura 7. Fotografia mostrando vista em corte da seção longitudinal de um isolador elétrico na região de acoplamento da ferragem. [31]	47
Figura 8. Fluxograma do experimento	51
Figura 9. Esquema do corpo-de-prova modelo A (comprimento: 285mm; diâmetro da base: 49mm; diâmetro central: 39mm). Dimensões obtidas após queima.	60
Figura 10. Esquema do corpo-de-prova modelo B (comprimento total: 285mm; diâmetro: 49mm). Dimensões obtidas após queima.....	61
Figura 11. Fotografia evidenciando a aplicação de cola para granilha padrão em corpo-de-prova.	63
Figura 12. Gráfico proveniente de análise por interferometria a laser de placa cerâmica com aplicação de granilha.	64
Figura 13. Esquema do aparato/rugosímetro desenvolvido para a medição da rugosidade aparente da superfície de corpos-de-prova com granilha.....	65
Figura 14. Perfil de rugosidade indicando as medidas realizadas para cálculo dos valores de Ra e Rt. (Ra: rugosidade média (mm); Rt: rugosidade total (mm); h(x): altura dos picos e vales em relação à linha de referência (mm); x: posição horizontal (mm) L: comprimento total do perfil de gráfico analisado (mm))	66
Figura 15. Fotografias mostrando corpos-de-prova para ensaio de tração dispostos em suporte de alinhamento em processo de cura do cimento.67	
Figura 16. Fotografia mostrando o conjunto corpo-de-prova e ferragem cimentada submetido à ensaio de tração.	68

Figura 17. Gráfico mostrando as distribuições granulométricas das matérias-primas argilosas.....	75
Figura 18. Difratoograma da amostra da Granilha P. (M: mulita, Q: Quartzo, C: Cristobalita).....	81
Figura 19. Difratoograma da amostra da Granilha 1. (M: mulita, Q: Quartzo, C: Cristobalita, A: Alumina).....	82
Figura 20. Difratoograma da amostra da Granilha 2. (Co: cordierita, Q: Quartzo, C: Cristobalita, S: Silicato de magnésio).....	83
Figura 21. Difratoograma da amostra da Granilha 3. (M: mulita, Q: Quartzo, C: Cristobalita, A: Alumina).....	84
Figura 22. Fotografia de placa cerâmica com aplicação de granilha P em substrato esmaltado, após processo de queima.	90
Figura 23. Resistência mecânica à tração de corpos-de-prova modelo A	93
Figura 24. Resistência mecânica à tração de corpos-de-prova modelo B, com substrato não esmaltado.	95
Figura 25. Fotografia de corpo-de-prova submetido a ensaio de tração contendo granilha P com substrato esmaltado.	97
Figura 26. Fotografia de corpo-de-prova submetido a ensaio de tração contendo granilha 3 com substrato esmaltado.	98

SUMARIO

1 – INTRODUÇÃO.....	22
2 – OBJETIVOS.....	25
2.1 - Objetivos específicos.....	25
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
3.1 - Materiais cerâmicos para isoladores elétricos	27
3.1.1 - Matérias-primas	27
3.1.2 – Expansão térmica de matérias-primas	31
3.2 – Isoladores Elétricos.....	32
3.2.1 – Porcelanas triaxiais.....	32
3.2.2 – Esmaltes cerâmicos para isoladores elétricos.....	39
3.2.3 – Ferragens	40
3.2.4 – Cimento	42
3.2.5 – Granilha.....	42
3.3 – Rugosidade	47
3.3.1 – Medidor de textura superficial (rugosímetro).....	47
3.3.2 – Técnicas sem contato	48
4 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
4.1 – Matérias-primas	52
4.2 – Caracterização das matérias-primas.....	52
4.2.1 – Análise química	52
4.2.2 – Densidade, absorção de água e retração linear	52
4.2.3 – Distribuição granulométrica	52
4.2.4 – Análise dilatométrica	54
4.3 – Processamento	54
4.3.1 – Formulações das granilhas.....	54
4.3.2 – Dosagem e moagem das composições de granilha	56
4.3.3 – Preparação e caracterização de corpos-de-prova das formulações de granilha.....	56
4.3.4 – Preparação das granilhas.....	57
4.3.5 – Caracterização dilatométrica de substrato cerâmico, esmaltes e granilhas.....	58

4.3.6 – Confeção de corpos-de-prova para aplicação das granilhas	58
4.3.7 – Aplicação das granilhas	61
4.4 – Caracterização mineralógica das granilhas.....	63
4.5 – Caracterização dos corpos-de-prova.....	64
4.5.1 - Rugosidade.....	64
4.5.2 – Ensaios mecânicos.....	66
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
5.1 – Caracterização de matérias-primas	69
5.1.1 – Caracterização química	69
5.1.2 – Caracterização física e dilatométrica.....	71
5.1.3 – Distribuição granulométrica	74
5.2 – Caracterização dos esmaltes cerâmicos	76
5.3 – Caracterização das formulações de granilha.....	78
5.3.1 – Caracterização física.....	78
5.3.2 – Caracterização mineralógica.....	80
5.3.3 – Caracterização dilatométrica	85
5.3.4 – Rugosidade e aspecto visual	88
5.3.5 – Resistência mecânica.....	92
6 – CONCLUSÕES.....	99
7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	102
8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105

RESUMO

Os isoladores elétricos são de fundamental importância para o crescimento e desenvolvimento econômico do País, na medida em que são responsáveis pelo isolamento adequado desde a geração, transmissão e distribuição da energia elétrica. Estudos demonstram que as propriedades mecânicas dos isoladores montados se relacionam à área de travamento do corpo cerâmico com o cimento, a qual é recoberta com uma camada de granilha cerâmica tradicional. Essa configuração resulta em resistência mecânica de 30% a 50% inferiores àquelas observadas nas regiões esmaltadas, compreendendo a área de maior incidência de trincas que podem levar à falha prematura do isolador. No presente trabalho foram avaliadas quatro composições de granilha cerâmica, incluindo uma composição tradicional. Foram realizadas caracterizações das propriedades físicas, químicas e dilatométricas das matérias-primas utilizadas para a fabricação das granilhas, propriedades físicas, químicas, mineralógicas e dilatométricas das granilhas queimadas, e caracterização da interação entre as granilhas e o substrato no processo de queima. Por fim, os resultados obtidos foram confrontados com o desempenho mecânico em corpos-de-prova cerâmicos de porcelana elétrica IEC 672 C-110 submetidos à ensaio de tração conforme ABNT NBR 5032. Os resultados demonstraram que as características dilatométricas das granilhas e a interação com o corpo cerâmico influenciam a resistência à tração dos corpos-de-prova cimentados, obtendo-se em alguns casos incremento de até 56% em relação aos corpos-de-prova contendo a granilha tradicional.

Palavras chave: Porcelana, granilha, isoladores elétricos.

ABSTRACT

Electrical insulators are of fundamental importance for the growing and economic development, since they are responsible for an adequate insulation from the generation, transmission and distribution of electricity. Recent studies show that the mechanical properties of the mounted electrical insulators are related to the locking area the ceramic body (cemented area), which is coated with a traditional sand layer (“granilha”). This configuration results in mechanical strength of 30% to 50% lower than those observed in the glazed surfaces, and it is the area of highest incidence of cracks that can lead to premature failures in the electrical insulators. In this study four *sands*, including a traditional one were evaluated. Physical, chemical and dilatometric characterizations were performed on the materials used to manufacture the *sands* and on the fired *sands*. Interactions between the substrates were also investigated on fired samples Mechanical performances of fired tested porcelains were evaluated according to the ABNT NBR 5032. Results demonstrated that the dilatometric characteristics of *sands* and the interaction with the ceramic body have any influence on the tensile strength of the prepared tested samples, so that in some cases tensile strength was 56% higher than samples containing traditional *sand*.

Keywords: Porcelain, grip sand, insulators.

1 – INTRODUÇÃO

Os isoladores elétricos de porcelana são utilizados em função das suas boas propriedades mecânicas e elétricas, aliadas ao baixo custo em relação a outros materiais utilizados para esse fim. A empresa de pesquisa energética (EPE) projeta que a carga de energia crescerá 5,1% ao ano no período de 2010 a 2019 [1], ao passo que o Programa Luz para todos, prorrogado até 2010, vem gerando uma grande demanda de isoladores para linhas de distribuição.

De acordo com a norma internacional IEC 672 [2], as porcelanas elétricas são divididas em três classes principais: C-110, C-120 e C-130. As principais diferenças entre as classes citadas dizem respeito principalmente à densidade aparente após queima e resistência mecânica a flexão três pontos. A classe C-110 refere-se a isoladores constituídos basicamente de quartzo, enquanto as demais classes são constituídas preponderantemente de alumina para obtenção de propriedades mecânicas melhoradas, devido à minimização de defeitos produzidos pela transformação alotrópica do quartzo.

Em função da robustez da maioria dos isoladores elétricos de média e alta tensão produzidos em porcelana, é possível delinear composições de massa e esmaltes cerâmicos (vidrados) que, quando combinados a um processo de fabricação controlado, resultam em coeficientes de expansão térmica adequados que produzem tensões compressivas no esmalte suficientemente elevadas e que acarretam em incremento de resistência mecânica do isolador em até 50% em relação a um isolador elétrico não esmaltado [3].

No entanto, a utilização de uma camada de granilha cerâmica, a qual é necessária para promover o travamento mecânico entre o corpo cerâmico e o cimento e ferragem, e usualmente de composição idêntica àquela do corpo cerâmico do isolador, resulta em perdas na resistência mecânica da ordem de 30% a 50% [3]. A região contendo granilha é responsável pela transferência de tensões mecânicas entre o corpo cerâmico e a estrutura a qual o mesmo é montado, sendo por esse motivo de fundamental importância o estudo de suas propriedades.

O presente trabalho aborda o estudo de quatro composições de granilha, incluindo uma composição tradicional (normalmente utilizada na empresa), em termos de suas propriedades cerâmicas intrínsecas, e da interação com o corpo cerâmico, verificando-se a influência das

propriedades obtidas na resistência mecânica à tração de corpos-de-prova de porcelana elétrica da classe IEC-672 C-110 cimentados.

2 – OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral a obtenção de conhecimento acerca da influência das propriedades físicas e químicas da granilha cerâmica nas propriedades mecânicas de isoladores elétricos quando cimentados a estruturas metálicas e submetidos à ensaio de tração uniaxial.

2.1 - Objetivos específicos

1. Avaliar as propriedades físicas e químicas das matérias-primas utilizadas na fabricação de massas e granilhas cerâmicas para isoladores elétricos de porcelana;
2. Preparar e caracterizar quatro formulações de granilha para isoladores elétricos, confrontando os resultados obtidos com indicações obtidas junto à literatura especializada, e com as características das matérias-primas e processamento adotados no item 1.;
3. Aplicar as granilhas preparadas em corpos-de-prova de porcelana elétrica, acoplados com cimento Portland a estruturas metálicas de fixação apropriadas, buscando avaliar o desempenho mecânico sob tração uniaxial em uma condição semelhante a aplicação industrial. A partir dos resultados obtidos, serão formuladas hipóteses a respeito da relação entre estes resultados e as características das granilhas, e sua interação com o esmalte e substrato cerâmicos.

3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - Materiais cerâmicos para isoladores elétricos

Nos materiais cerâmicos, as ligações químicas predominantes são iônicas e/ou covalentes. Essas ligações fortes conferem aos materiais cerâmicos elevado módulo de elasticidade, elevada dureza, alto ponto de fusão, baixa expansão térmica e alta resistência química. Diferentemente dos metais, os cerâmicos possuem poucos elétrons livres, possuindo assim as propriedades elétricas e térmicas requeridas para a fabricação de isoladores elétricos para uma aplicação específica. [4]

3.1.1 - Matérias-primas

As massas cerâmicas para isoladores elétricos podem ser consideradas com base em um sistema triaxial e assim triângulos de composição podem ser estabelecidos. Nos vértices do triângulo são posicionados os componentes que conferem, a um dado material, refratariedade (refratários), conformabilidade (plásticos) e densificação via formação de fase líquida viscosa (fundentes). Pode-se citar como matérias-primas refratárias o quartzo e a alumina e como matérias primas plásticas as argilas e os caulins sendo que os fundentes são caracterizados neste caso pelos feldspatos. Estas matérias-primas, a seguir relacionadas, apresentam as seguintes características específicas:

Quartzo

O quartzo é utilizado em distintas formulações de massas cerâmicas, podendo ser introduzido pelas argilas ou como matéria-prima separada. É utilizado quando se busca:

- Diminuir a plasticidade da massa;
- Aumentar a permeabilidade da peça crua;
- Aumentar o coeficiente de expansão térmica da massa queimada;
- Diminuir a retração de secagem e/ou queima;
- Diminuir a deformação pirolástica [5].

Em temperaturas inferiores a 573°C, a sílica possui uma estrutura cristalina denominada quartzo- α e acima desta temperatura quartzo- β . Em temperaturas mais altas ela possui outras formas cristalinas como a tridimita (867°C) e a cristobalita (1470°C) [6].

As transformações polimórficas da sílica podem ser de dois tipos: uma envolvendo quebra e rearranjo de ligações químicas, chamadas de reconstrutivas e outra sem quebras de ligação, envolvendo apenas o deslocamento de planos atômicos, chamadas de displasivas. A inversão de quartzo- β para α , durante o resfriamento, é um exemplo de transformação displasiva, é uma variação reversível e geralmente acarreta uma variação de volume, que pode produzir tensões residuais as quais, dependendo da intensidade e magnitude, podem levar à quebra do material. Este aumento de volume da inversão de quartzo- β para α é de aproximadamente 2 %. [4]

Alumina

A alumina é empregada em alguns tipos de massas de porcelana, substituindo parcial ou totalmente o quartzo, visando à melhoria da resistência mecânica [7]. De acordo com Liebermann [8-9], é vantajoso utilizar alumina em isoladores devido ao incremento na resistência mecânica. Esta melhoria é atribuído ao fato de que, em um sistema multifásico, a introdução de um elemento com elevado módulo elástico eleva o módulo elástico do sistema, e, por conseqüência, a resistência mecânica do sistema. O módulo de elasticidade (E) da alumina é de 380 GPa [4]. Os dois principais tipos de alumina utilizadas na fabricação de isoladores elétricos são: alumina calcinada e eletrofundida. No entanto, se tem notícia, conforme trabalhos de pesquisa de LIEBERMANN [7], do uso de bauxita como fonte de alumina, e que apresenta um menor custo. De acordo com o trabalho de pesquisa de Bonetti [10-11-12], a substituição parcial de quartzo por alumina e bauxita em composição de porcelana IEC-C110 melhora as propriedades mecânicas e, para alguns casos, é possível obter propriedades mecânicas equivalentes à classe IEC-C120. Em porcelanas contendo alumina, a resistência mecânica é dependente dos tamanhos das partículas de alumina dispersas na microestrutura e, portanto, torna-se importante avaliar a dissolução dessas partículas no processo de sinterização [13]. De acordo com trabalhos de pesquisa de CHINELATTO [14], para teores de alumina em torno de 54% a sinterização torna-se dificultada em função da percolação das partículas de alumina, o que limita o processo de rearranjo.

A Tabela 1, a seguir, apresenta as propriedades das porcelanas do tipo C110, C120 e C130.

Tabela 1. Propriedades dos isoladores elétricos conforme IEC 672 [2]

<i>Propriedades</i>	<i>Isolador IEC 672 – C110</i>	<i>Isolador IEC 672 – C120</i>	<i>Isolador IEC 672 – C130</i>
Resistência à flexão (MPa) [não esmaltado] (mínimo)	50	80	90
Resistência à flexão (MPa) [esmaltado] (mínimo)	60	100	110
Módulo de Elasticidade (GPa)	60	-	100
Resistividade elétrica ($\Omega \cdot m$)	10^{11}	10^{11}	10^{11}
Rigidez dielétrica (kV/mm)	20	20	20
Resistência à perfuração (kV) (1 minuto)	30	30	30
Coefficiente de expansão térmica linear, α ($10^{-6} K^{-1}$) 20 a 300 °C	3 a 6	3 a 6	4 a 7
Condutividade térmica ($W/m \cdot K$)	1 a 2,5	1,2 a 2,6	1,5 a 4,0
Resistência ao choque térmico ($\Delta T, K$)	150	150	150

Argilas

As argilas são silicatos de alumínio hidratados, contendo em certos tipos outros elementos como ferro, potássio, lítio e outros. A elevada área superficial da argila, combinada com a morfologia de suas partículas (folhas), proporciona, em presença de água, plasticidade à massa, a qual confere resistência mecânica a verde e a seco sendo, ainda, fonte de alumina e sílica.

O caulim é uma argila constituída principalmente por caulinita ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$) e/ou haloisita ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 4H_2O$) que, quando queimadas, produz cor branca ou tonalidades claras a 1250°C. Em geral, apresenta menor plasticidade e resistência mecânica que as argilas do tipo *ball clay*. No entanto, aumenta o índice de alvura e translucidez das peças, por ser em geral mais puro que as argilas comuns [15].

Feldspatos

Os feldspatos são um dos principais fundentes empregados em cerâmica. Os feldspatos naturais são normalmente uma mistura, em diversas proporções, de aluminossilicatos de potássio, de sódio, de cálcio, de lítio e ocasionalmente de bário e de cério.

Para a indústria cerâmica, os feldspatos de maior importância são o potássico ou ortoclásio ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$) e o sódico ou albíta ($Na_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$), por terem temperatura de fusão relativamente baixa e assim sendo empregados como formadores de fase líquida viscosa durante a sinterização (1120-1170°C). Os feldspatos apresentam elevados teores de quartzo livre o que acentua o efeito da diferença entre o coeficiente de expansão térmica da fase vítrea e da matriz. [16]

Mulita eletrofundida

A mulita eletrofundida é um material obtido pela fusão de quartzo e alumina em forno elétrico a arco. Possui baixa expansão térmica e excelente resistência ao choque térmico, sendo por esse motivo empregado, mais comumente, como material constituinte de refratários para fornos (ponto de fusão: 1850 °C) [17].

Talco

O talco é um filosilicato trioctaédrico monoclinico, de fórmula teórica $Si_4O_{10}(OH)_2$, e apresenta a seguinte composição química (percentuais em massa): SiO_2 : 63,36%; MgO : 31,89%; H_2O : 4,75%. É um mineral de aspecto macio (apresenta dureza 1 na escala Mohs).

Ele é usado em alguns casos para aumentar a fundência em massas cerâmicas de grés-porcelanato. A razão o aumento da fundência, neste caso, se relaciona com a formação de eutéticos de baixa temperatura de fusão entre o talco e os feldspatos alcalinos.

Em massas para fabricação de revestimentos porosos, a adição de talco aumenta, em geral, o coeficiente de expansão térmica, ao mesmo tempo que diminui a expansão por umidade do produto queimado [5].

É importante salientar que além das matérias-primas que constituem o corpo principal dos isoladores elétricos, outros materiais associados as matérias-primas, são parte integrantes destes componentes, como são os esmaltes que recobrem os isoladores e que têm características particulares associadas aos pigmentos e corantes (propriedades elétricas) e ao seu coeficiente de expansão térmica que pode atuar no sentido de aumentar a resistência mecânica do conjunto, e

também a granilha nas situações onde é necessária a fixação de ferragens por meio de cimento.

3.1.2 – Expansão térmica de matérias-primas

A dilatação que a maioria dos materiais experimenta por ação do calor, é uma conseqüência do aumento de sua energia interna, que implica em uma maior amplitude das vibrações moleculares e, portanto, um maior distanciamento entre seus constituintes estruturais. Este aumento dimensional é característico de cada material e é expresso por um fator que depende da temperatura, denominado coeficiente de dilatação ou coeficiente de expansão térmica. Esse coeficiente pode referir-se ao volume (coeficiente de expansão térmica volumétrica, γ), à superfície (coeficiente de expansão térmica superficial, β), ou a uma só dimensão (coeficiente de expansão térmica linear, α) [18-19]

Quando a temperatura de um corpo se eleva de um valor T até $T + \Delta T$, seu comprimento l_0 irá sofrer uma variação Δl . O coeficiente de expansão térmica linear médio (α) entre ambas as temperaturas é dado por:

$$\alpha = \frac{1}{l_0} \frac{\Delta l}{\Delta T} \quad \text{[equação 1]}$$

A variação dimensional de um material em função da temperatura ocorre de modo contínuo, caso não haja mudanças estruturais. No entanto, se durante o aquecimento ocorre transformação (polimórfica, cristalização ou vitrificação, pontos de transição, dentre outros), esta se apresenta na curva de dilatação térmica como uma descontinuidade. [18]

Os coeficientes de expansão térmica estão intimamente relacionados às espécies mineralógicas presentes nos diferentes tipos de argila. Assim, as argilas calcárias apresentam maiores coeficientes de dilatação entre 25 e 300 °C devido à presença de silicatos e/ou silicatos de alumínio cálcicos e/ou de magnésio de alto coeficiente de dilatação. As argilas caulínicas geralmente apresentam coeficientes de dilatação menores. A presença de quartzo livre em argilas aumenta consideravelmente os coeficientes de dilatação, especialmente no

intervalo correspondente à temperatura de transformação do quartzo. [19]

3.2 – Isoladores Elétricos

Os isoladores elétricos têm como função garantir o isolamento da energia elétrica conduzida nos cabos da estrutura da rede elétrica. Para tal finalidade são utilizados isoladores com dimensões normalizadas de acordo com a aplicação e o nível de tensões elétricas envolvidas, bem como características dimensionais que garantam o seu desempenho em condições de chuva e poluição [20].

De forma a garantir esse isolamento, são empregados materiais com rigidez dielétrica suficientemente elevada. Dentre os materiais usualmente utilizados pode-se mencionar o vidro temperado, materiais poliméricos e porcelanas [20].

A fixação na rede é realizada através de ferragens. Seu projeto requer cuidados especiais, pois podem gerar manifestações devido ao efeito corona ou a radio interferência [20].

3.2.1 – Porcelanas triaxiais

Porcelanas triaxiais são tipicamente compostas de 50% em massa de argilas, comumente o caulim, $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$, 25% de fundentes (normalmente o feldspato), e 25% de refratários (normalmente o quartzo). A argila promove a plasticidade, facilitando a conformação, e atua como um ligante para os outros componentes do corpo quando o mesmo se encontra no estado a verde. [21]

No processo de queima, à medida que a temperatura aumenta, ocorre, entre 500 e 600°C, perda de água de constituição culminando na formação da metacaulinita. Acima de 900°C ocorre a nucleação de um estrutura tipo espinélio ($Al_2O_3-\gamma$) e sílica livre. A exata estrutura da fase espinélio ainda não está bem definida e apresenta controvérsias na literatura. A aproximadamente 1000°C ocorre a decomposição da argila remanescente, formando finos cristais de mulita primária com dimensões menores que 0,5 μm . [21]

O feldspato funde a aproximadamente 1000°C na zona de contato entre o feldspato e a argila remanescente e com a sílica amorfa proveniente da argila durante a formação da metacaulinita, auxiliando a formação de líquido viscoso com formação de eutético ternário ($9,5K_2O.10,9Al_2O_3.79,8SiO_2$) na temperatura de aproximadamente 985°C. [21]

O quartzo é um material de elevado ponto de fusão e quimicamente estável a temperaturas de queima comerciais ($<1300^{\circ}\text{C}$), reduzindo a tendência do corpo cerâmico a deformação quando o mesmo é queimado a temperaturas propícias à formação de grande quantidade de fase líquida viscosa. [21]

A microestrutura final de porcelanas triaxiais é composta de 10 a 25% de mulita, cuja composição química pode variar de $2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 1\text{SiO}_2$ a $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, 5 a 25% de quartzo- α (SiO_2), e 0 a 8% de porosidade dispersa em uma fase vítrea residual (aluminossilicato de potássio). Corpos cerâmicos com elevado teor de quartzo podem conter cristobalita, que é uma fase cristalina indesejável já que apresenta um elevado coeficiente de expansão térmica linear ($50,0 \times 10^{-6}\text{K}^{-1}$) entre 20 e 300°C . [21]

Microestrutura

A microestrutura de porcelanas é caracterizada pela presença de fases cristalinas, onde é possível distinguir contornos de partículas refratárias às quais são envolvidas por uma matriz vítrea. As fases cristalinas, seus tamanhos, forma e distribuição incluindo-se a porosidade, são parâmetros importantes da microestrutura do material que afetam suas propriedades. [7]

A micrografia da Figura 1 mostra a microestrutura típica de uma porcelana C110, onde pode-se observar as fases presentes: quartzo, mulita e a fase vítrea. As partículas de quartzo (Q) conferem reforço estrutural. A mulita formada a partir dos componentes plásticos é denominada mulita primária (P) enquanto que a formada a partir de feldspato é denominada mulita secundária (S) ou acicular [22].

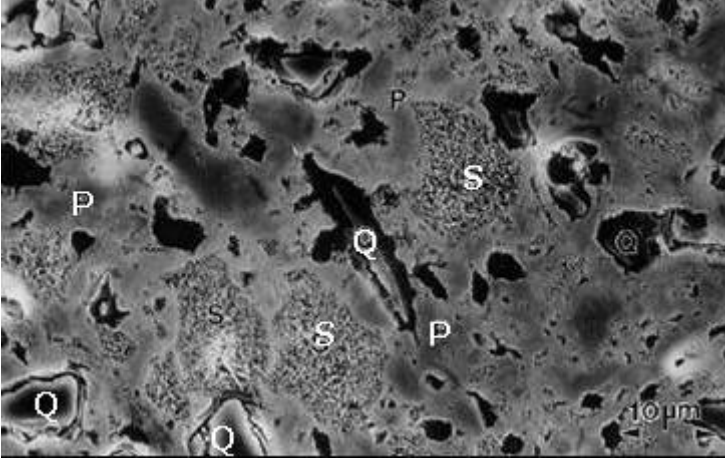


Figura 1. Micrografia (MEV) referente a uma porcelana quartzosa C110. S: Mulita secundária, P: Mulita primária, Q: Quartzo. Ataque: HF 20% por 10s. [22]

Outro aspecto importante, característico da microestrutura de porcelanas para isoladores elétricos, é a presença de trincas geradas por efeito de tensões causadas pela diferença entre os coeficientes de expansão térmica do cristal de quartzo ($23 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) e da fase vítrea ($3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) no intervalo de temperatura entre 20 e 700 °C. Essas trincas são evitadas com a substituição do quartzo por alumina, cujo coeficiente de expansão térmica é de $8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ no mesmo intervalo de temperatura[22].

O tamanho da partícula de quartzo (Figura 2) é crucial no comportamento mecânico das porcelanas já que partículas muito grandes podem gerar trincas, por efeito de concentração de tensões, levando à fratura do material. Este efeito pode ser minimizado pela utilização de partículas com tamanhos inferiores a 25 μm. Tamanhos de partículas inferiores a 25 μm tendem a se dissolver na fase vítrea. [22]

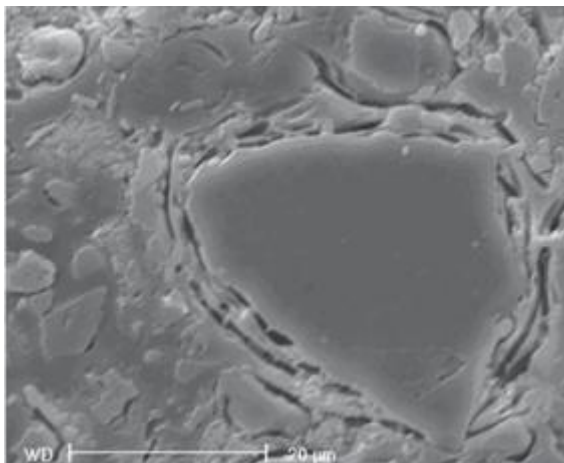


Figura 2. Micrografia (MEV) evidenciando o efeito do quartzo na microestrutura de porcelana quartzosa. Ataque: HF 20% por 10s.

[22]

Comportamento mecânico

Cada material possui uma resistência mecânica (intrínseca) à tração ($\sigma_{\text{crítica}}$) e certa resistência (interna) ao cisalhamento ($\tau_{\text{crítica}}$). O comportamento dúctil ou frágil do material irá depender de qual dessas tensões é atingida primeiro. Supondo, por exemplo, um corpo cilíndrico com área de seção transversal A , confeccionado em um determinado material, e sob força F trativa uniaxial: caso se aumente progressivamente a força aplicada, tanto a máxima tensão normal (F/A) quanto a máxima tensão interna cisalhante (que ocorre nos planos inclinados a um ângulo de 45°) irão aumentar, podendo resultar em duas situações:

- Se a tensão máxima trativa, resultante da força externa aplicada, atingir a tensão de resistência à tração do material ($\sigma_{\text{crítica}}$), ocorre o mecanismo de falha por quebra de ligações químicas. Nesse caso não haverá deformação plástica, resultando em uma fratura frágil;
- Se a tensão máxima cisalhante, igualmente resultante da força externa aplicada, atingir a resistência ao cisalhamento do material em questão ($\tau_{\text{crítica}}$), opera o

mecanismo de deformação por cisalhamento dos planos interatômicos, resultando em deformação plástica aparente, ou seja, a deformação atingida após ultrapassar a tensão crítica de cisalhamento permanece após a remoção da carga aplicada. [4]

Nas porcelanas, a tensão de resistência ao cisalhamento é muito elevada e próxima ao valor de resistência à ruptura (quebra de ligações químicas), resultando na inexistência de deformação plástica aparente, o que culmina em ruptura por clivagem. No entanto, as ferragens utilizadas para acoplamento do isolador à rede elétrica, são normalmente confeccionadas com metais que apresentam ductilidade aparente, como é o caso do ferro fundido nodular.

Quando da aplicação de uma força trativa ao corpo do isolador, esse irá se deformar elasticamente na direção de aplicação da força e, dependendo da magnitude da tensão resultante na ferragem, a mesma pode se deformar de forma permanente (deformação plástica), desde que a tensão de cisalhamento resultante supere a tensão crítica de cisalhamento do material da ferragem.

Nos materiais cerâmicos, as fortes ligações iônicas e/ou covalentes e a deficiência de sistemas de escorregamento, inibem a deformação plástica do material. Portanto, a resistência máxima à ruptura atingida com esses materiais, em relação a um material que apresenta deformação plástica (considerando o escoamento como o critério de falha), como por exemplo, nos metais ferrosos, deveria ser mais elevada, visto que o módulo de elasticidade, propriedade intimamente ligada as forças de ligação do material, é mais elevado nos materiais cerâmicos como a porcelana [4].

No entanto, em situações práticas, a presença de concentradores de tensões (incluindo os defeitos inerentes ao processo de fabricação, tais como trincas), degradam as propriedades do material. Neste caso, é de extrema importância considerar a sensibilidade do material a esses defeitos. De fato, a tenacidade a fratura (K_{Ic}), determinada experimentalmente, é um indicativo da sensibilidade do material à fratura na presença de defeitos, e está relacionada com a tensão máxima que o material irá suportar em função da geometria e tamanho do(s) defeito(s).

Na Figura 2 é mostrado um defeito típico de porcelanas elétricas quartzosas. As trincas radiais na matriz vítrea são resultado da diferença de coeficiente de dilatação térmica entre a matriz e as partículas

remanescentes de quartzo, as quais atuam como concentradores de tensão, o que limita a resistência mecânica desse tipo de porcelana.

Neste caso, de acordo com Inglis [23], a tensão σ_m na ponta de uma trinca é descrita pela equação a seguir:

$$\sigma_m = \sigma_0 \left[1 + 2 \left(\frac{\lambda}{\rho_e} \right)^{1/2} \right] \quad \text{[equação 2]}$$

onde:

σ_0 = tensão aplicada (MPa);

λ = comprimento da trinca (mm);

ρ_e = raio de curvatura na ponta da trinca (mm).

Conforme a equação 2, o aumento da tensão na ponta da trinca é proporcional a tensão aplicada e cresce com o aumento do comprimento da trinca, diminuindo com o aumento do raio de curvatura do defeito.

Assim, os materiais cerâmicos mais frágeis irão apresentar uma relativamente alta sensibilidade a presença de defeitos, pois diferentemente dos materiais dúcteis, não existe plastificação na ponta da trinca. Isso implica que, a fratura irá se propagar rapidamente sob tensões aplicadas muito abaixo do limite teórico de resistência do material, em virtude das concentrações de tensão induzidas pelos defeitos presentes. Esse nível de concentração de tensão é proporcional ao tamanho das trincas no material.

Semelhantemente a tensão de escoamento em materiais dúcteis, que deflagra a deformação permanente do material, o nível de tensão que um material frágil irá suportar está relacionado ao valor de K (fator de intensidade de tensão, equação 3), ou seja, quando $K=K_c$ têm-se o início da propagação instável da trinca [4].

$$K = \sigma_0 Y \sqrt{\pi c} \quad \text{[equação 3]}$$

onde:

K = Fator de intensidade de tensão (MPa.m^{-1/2});

σ_0 = tensão aplicada (MPa);

Y = Fator geométrico relacionado a trinca (-);

$C = \frac{1}{2}$ do comprimento da trinca (mm).

Propriedades

As solicitações mecânicas, as quais os isoladores elétricos estão sujeitos, são caracterizadas por forças de três tipos:

- Forças verticais devido ao peso dos próprios elementos condutores;
- Forças horizontais axiais, oriundas da suspensão dos elementos condutores, no sentido horizontal da linha;
- Forças horizontais transversais, no sentido perpendicular aos eixos longitudinais das linhas, devido à ação do vento sobre os elementos condutores (cabos elétricos).

Por outro lado, as solicitações de natureza elétrica a que um isolador deve resistir são aquelas oriundas das tensões mais elevadas que podem ocorrer nas linhas:

- Tensão normal e sobre-tensões à frequência industrial;
- Surto de sobre-tensões de manobra, de curta duração, atingindo níveis de duas a cinco vezes a tensão normal entre fase e terra;
- Sobre-tensões de origem atmosférica.

Um isolador deve ainda ser resistente às variações de temperatura e poluições ambientais, suportar bem os choques térmicos, minimizar número de reposições ao longo do tempo e assegurar, pelo seu projeto e fabricação, uma distribuição balanceada de potenciais e, em consequência, tensões de descarga adequadas. [20]

Uma característica importante quanto ao desempenho de isoladores elétricos sob poluição diz respeito ao caráter hidrofílico ou hidrofóbico da superfície. Os isoladores com esmalte tradicional apresentam caráter hidrofílico, o que facilita a formação de eletrólito na presença de névoa salina, permitindo a condução de corrente elétrica sobre a superfície do isolador. Para prover um nível de hidrofobicidade adequado, podem ser utilizados recobrimentos poliméricos formados por acrílico, poliéster, poliuretano e silicone, sendo o silicone 35% mais eficiente do que os demais recobrimentos citados [24-25].

A Tabela 1 apresenta as principais propriedades das classes de porcelanas elétricas conforme classificação da norma internacional IEC 672 [2].

3.2.2 – Esmaltes cerâmicos para isoladores elétricos

Os isoladores elétricos recebem, normalmente, uma camada de esmalte cerâmico que visa conferir uma superfície lisa para evitar o acúmulo de poluição, bem como inferir ao isolador um incremento de resistência mecânica pela indução de tensões compressivas na superfície. Os esmaltes para isoladores elétricos são produzidos a partir de matérias-primas cruas (naturais e/ou sintéticas), e são denominados esmaltes crus. Devido as elevadas temperatura de queima (~ 1260 °C) e ciclos de queima longos, a utilização de esmaltes a base de fritas não se justifica do ponto de vista técnico e econômico na maioria dos casos.

Nos esmaltes crus, inicialmente, os componentes da mistura com menor ponto de fusão são dissolvidos originando uma microestrutura caracterizada por uma massa vítrea viscosa e por partículas pertencentes às matérias-primas mais refratárias, que, em uma etapa sucessiva reagem com a massa vítrea em estado viscoso. À medida que se aumenta a temperatura, são produzidas reações eutéicas nos pontos de contato das partículas, e a fusão parcial desenvolvida dissolve lentamente as partículas mais grosseiras e as substâncias que fundem com maior dificuldade (mais refratárias). [26]

A velocidade do processo depende principalmente da viscosidade dos líquidos formados, da taxa de difusão e da tensão superficial entre as partículas e a massa vítrea viscosa. Nesse tipo de esmalte, as partículas de quartzo são as mais resistentes à ação de dissolução provocada pela massa vítrea fundida. Quando a dissolução é incompleta, o esmalte se caracteriza pela falta de homogeneidade que resulta em opacificação. [26]

O resultado da interação entre o esmalte e o substrato cerâmico durante o processo de queima é a formação de uma camada intermediária, que tem com vantagem adequar as propriedades de ambas, especialmente aquelas que estão relacionadas com as diferenças dilatométricas. [26]

Durante a primeira etapa do resfriamento o esmalte se mantém no estado viscoplástico, mantendo as mesmas dimensões do suporte. Com o resfriamento da peça, o esmalte vai perdendo a sua viscoplasticidade até

se transformar em um corpo rígido, aderindo fortemente ao suporte. A temperatura na qual isto ocorre é chamada de temperatura de acoplamento efetivo (T_e). Na prática, essa temperatura corresponde à razão $(T_g + T_s)/2$ onde T_g é a temperatura de transição vítrea e T_s a temperatura de amolecimento dilatométrico. Com o resfriamento a temperaturas abaixo da temperatura de acoplamento efetivo, o esmalte e o suporte podem ter dilatações diferenciadas, que podem dar origem a tensões mecânicas. [26]

Um elevado teor de quartzo na massa cerâmica (suporte) proporciona um elevado coeficiente de dilatação térmica. No entanto, um elevado teor de sílica dissolvida na fase vítrea diminui o coeficiente de dilatação térmica. Um ciclo de queima mais longo favorece a dissolução do quartzo na fase vítrea, e provoca a diminuição do coeficiente de expansão térmica do suporte. Além disso, quanto maior a fração volumétrica de cristais de mulita no suporte, menor será a dilatação térmica do mesmo. [26]

As massas e esmaltes se dilatam quando aquecidas e retraem ao se resfriarem. No entanto, devido a sua composição química e microestrutura distintas (presença ou ausência de fases cristalinas e/ou vítreas, proporção e características químicas e estruturais dessas fases), as massa e esmaltes apresentam propriedades dilatométricas distintas, as quais podem gerar tensões entre ambos. [26]

O esmalte no processo de queima pode reagir quimicamente com o suporte, formando uma camada intermediária que poderá modificar as tensões que se formam entre ambos. Além disso, uma eventual variação na microestrutura do suporte (tamanho de poros, dissolução do quartzo, desenvolvimento de novas fases cristalinas, etc.) podem modificar as propriedades mecânicas e térmicas do mesmo, e, portanto, pode afetar as tensões entre esmalte e suporte. [26]

Se as tensões de compressão que se produzem devido às diferenças dilatométricas não superarem o limite de resistência do esmalte, um aumento da resistência mecânica do componente, em consequência da indução de tensões compressivas sobre o esmalte é esperado. [27]

3.2.3 – Ferragens

Usualmente os isoladores são compostos, além do corpo cerâmico, por ferragens. Essa estrutura metálica é normalmente necessária, tendo em vista que os isoladores são montados sobre

estruturas comuns a rede elétrica como cruzetas, ou ainda conectados uns aos outros em série, e finalmente presos à estrutura da rede e a cabos energizados (Figuras 3, 4 e 5). Podem apresentar formas diferenciadas, de acordo com o tipo de isolador e sua forma de fixação.



Figura 3. Fotografia de ferragens típicas de isoladores maciços tipo Pino. [28]



Figura 4. Fotografia de ferragens típicas de isoladores tipo Disco. [28]



Figura 5. Fotografia ilustrando isoladores tipo suspensão montado na linha. [29]

As ferragens podem ser construídas em metais como latão, alumínio, ferro fundido nodular e ferro fundido maleável, sendo as duas últimas mais frequentes. A ferragem representa um grande percentual do custo agregado ao isolador, e deve ser dimensionada de acordo com as

normas e exigências do cliente para montagem (tolerância dimensional, exigência mecânica, resistência a intempéries). Para incremento da resistência à corrosão, as partes metálicas passam, normalmente, por um processo de zincagem por galvanização.

3.2.4 – Cimento

Para unir as partes de isoladores multi-corpo e estruturas metálicas à porcelana, é utilizado o cimento Portland. Este cimento apresenta excelentes propriedades que o tornam recomendados para este uso. É quimicamente estável, permanente, e não é afetado por reagentes encontrados em aplicações em alta tensão. [3].

O cimento Portland é o cimento mais utilizado frente a outros tipos de cimento disponíveis, o que o torna economicamente importante em função da elevada quantidade produzida. O mesmo é produzido em um processo que consiste no aquecimento de uma mistura de calcário e argilas a temperatura suficiente elevada para que ocorra a fusão parcial, resultando em um produto chamado “clinker”. O “clinker” é então moído e mistura a uma certa quantidade de gesso.

O “clinker” apresenta quatro fases distintas: silicato-tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), silicato-dicálcico- β ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$), aluminato-tricálcico ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, em composições que podem variar entre $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ e $6\text{CaO} \cdot 2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ aproximadamente, frequentemente se aproximando de $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$. Quantitativamente, as fases cristalinas e outras substâncias em menores teores presentes no cimento Portland podem variar dentro dos seguintes intervalos: 28% a 53% de $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, 19% a 49% de $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, 4% a 11% de $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, 8% a 13% de $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, 2% a 9% de MgO , 0,2% a 0,7% de CaO livre, 2,7% a 4% de CaSO_4 , 1% a 2% de umidade, sais insolúveis e óxidos de metais alcalinos combinados de várias formas. [30]

3.2.5 – Granilha

As áreas cobertas com granilha constituem em um meio e travamento para prover a transmissão de tensões mecânicas da superfície da porcelana para o cimento. [3]. A granilha consiste em grânulos cerâmicos, os quais podem ser obtidos por um processo de peneiramento a verde em peneiras com abertura definida, e posterior queima dos grânulos obtidos a temperaturas da ordem das utilizadas no processo de queima do isolador. A granilha queimada apresenta-se na forma de grânulos de formato irregular, os quais, depois de aplicados em superfícies específicas do isolador (superfícies em contato com o

cimento Portland), irão atuar como pontos de ancoramento do cimento, provendo a rigidez mecânica necessária ao isolador.

Como uma tensão mecânica aplicada a um isolador montado é transmitida ao isolador através da estrutura e junções com o cimento, é óbvio que a resistência das regiões adjacentes ao cimento (ou outro material utilizado) é de grande importância. Experiências com milhões de isoladores indicam muito claramente que esta é a zona onde trincas incipientes, eventualmente levando a fratura mecânica, são de ocorrência preferencial [3].

Com a utilização de superfície granilhada usual (de composição idêntica a da massa cerâmica do isolador), a resistência mecânica nessa região é de 30% a 50% menor que a resistência mecânica de superfícies cobertas com esmalte sob tensão de compressão. Existem duas razões para isto:

1. As depressões angulares entre as partículas da granilha constituem pontos para início da fratura, portanto, aumentando o fator de concentração de tensões;
2. A granilha está sob tensão de tração e anula o efeito de compressão do esmalte. [3]

A região que compreende a aplicação da granilha deve ser desenvolvida de forma a manter o isolador sob tensão de compressão. A resistência mecânica final do isolador será tão maior quanto melhor desenvolvido esse efeito.

Bons resultados foram obtidos através do ajuste dos coeficientes de expansão térmica do corpo cerâmico, esmalte e granilha, cujos valores devem ser sucessivamente decrescentes. Adicionalmente, uma segunda camada de esmalte de espessura adequada sobre a granilha aplicada mostrou-se de particular importância [31].

Um baixo coeficiente de expansão térmica da granilha pode ser obtido se as condições requeridas para a formação de cordierita ($2\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$) forem alcançadas. A cordierita apresenta um coeficiente de expansão térmica relativamente baixo, aproximadamente $1,2 \times 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$. O MgO requerido para a formação de cordierita pode ser introduzido por meio da matéria-prima conhecida como pedra sabão ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) [31].

Durante a sinterização, processos de dissolução, que são causados pela mudança de posição e pela alta mobilidade dos átomos, ocorrem na

região de transição. Com a condição indicada anteriormente, dois objetivos são atingidos no isolador:

- Forma-se um composto granilha/esmalte quimicamente estável;
- O processo de dissolução permite influenciar de forma proposital o coeficiente de expansão térmica do conjunto granilha/esmalte. Obtém-se um aumento considerável de resistência mecânica em áreas de fixação de ferragens se o conjunto granilha/esmalte, quando do resfriamento do isolador até temperatura ambiente, se comportar como uma camada externa sob elevada tensão de compressão [31].

A Tabela 2, a seguir, apresenta coeficientes de expansão térmica das fases constituintes da microestrutura de porcelanas elétricas quartzosas e aluminosas em comparação a cordierita. A Tabela 3 apresenta uma composição típica para obtenção de cordierita.

Tabela 2. Coeficientes de expansão térmica linear de algumas fases cerâmicas [31], [32].

	Al_2O_3 (<i>Coríndon</i>)	SiO_2 (<i>Quartzo</i>)	<i>Mulita</i>
Coeficiente de expansão térmica linear, α ($10^{-6} K^{-1}$)	8,0	12,3	4,5

	<i>Fase vítrea</i>	<i>Cristobalita</i>	Cordierita
Coeficiente de expansão térmica linear, α ($10^{-6} K^{-1}$)	3,0	10,3	1,2

Tabela 3. Composição de matérias-primas para produção de membranas cerâmicas de cordierita [33]

	<i>Argila Ball Clay</i>	<i>Bentonita</i>	<i>Talco</i>	<i>Argila calcificada (chamote)</i>
% em massa	45,0	3,0	17,0	35,0

A Figura 6 apresenta de forma comparativa os coeficientes de expansão térmica linear em função da temperatura de uma porcelana elétrica C130 (aluminosa), de esmalte cinza, de esmalte marrom, e de granilha cerâmica. Pode-se observar que os esmaltes cerâmicos apresentam coeficientes de expansão térmica inferiores ao do corpo cerâmico, de forma a gerar um efeito de compressão superficial, que é importante no sentido de melhorar a resistência mecânica do conjunto. Além disso, pode-se observar a partir da análise da Figura 6 que o coeficiente de expansão térmica da granilha cerâmica é consideravelmente inferior ao do corpo cerâmico e também inferior ao dos esmaltes, o que propicia, de acordo com o autor [31], um aumento esperado da magnitude das tensões de compressão induzidas na região da aplicação da granilha, em função da diminuição do coeficiente de expansão térmica global do conjunto esmalte/granilha.

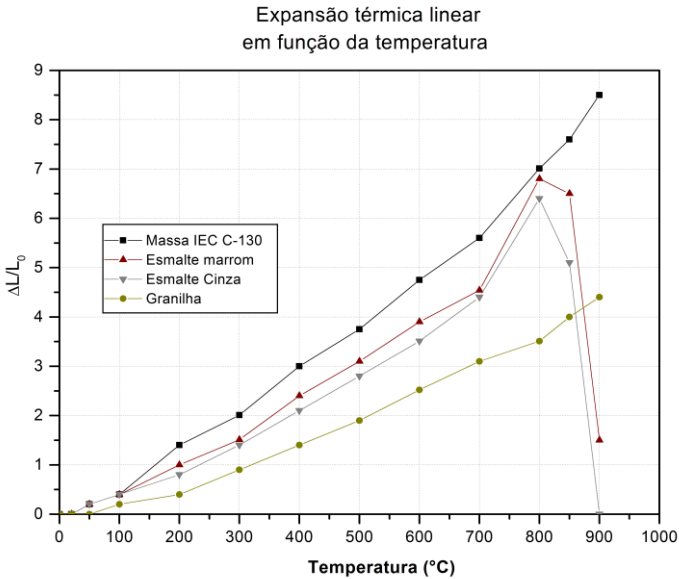


Figura 6. Gráfico mostrando a expansão térmica em função da temperatura de massa, esmaltes e granilha cerâmicos. Adaptado de [31].

A Figura 7 apresenta uma vista em corte da seção longitudinal de um isolador tipo bucha, com destaque para a região de acoplamento da ferragem ao corpo cerâmico do isolador. Pode-se visualizar a região coberta com granilha cerâmica, a qual apresenta-se coberta por uma camada de cimento, o qual, por sua vez, tem a função de promover o travamento mecânico da estrutura metálica ao conjunto.

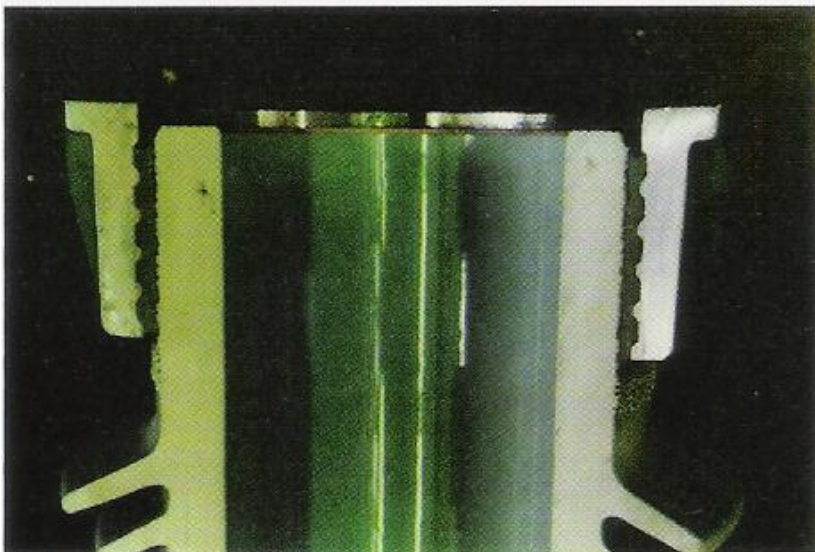


Figura 7. Fotografia mostrando vista em corte da seção longitudinal de um isolador elétrico na região de acoplamento da ferragem. [31]

3.3 – Rugosidade

A aplicação da granilha em isoladores visa produzir uma região localizada de rugosidade mais elevada, de forma a promover o travamento da estrutura montada.

Em geral, quando os aspectos de controle do projeto do componente relacionado à topografia da superfície são necessários (características de atrito, fricção, refletividade, resistência mecânica ou propriedades de lubrificação), a rugosidade é analisada.

3.3.1 – Medidor de textura superficial (rugosímetro).

O tipo mais comum de medição de topografia superficial por contato é o medidor de textura superficial. A ponta do instrumento é movimentada através da superfície por um mecanismo guia de forma a produzir um traçado, que é definido pela interação entre a ponta e a superfície. Um transdutor produz um sinal que consiste na diferença entre o traçado e uma referência. O sinal do transdutor é então convertido em um sinal digital através de um conversor [34].

3.3.2 – Técnicas sem contato

Esta técnica é utilizada em superfícies de corpos-de-prova que não podem ser danificadas, o que normalmente ocorre nas técnicas com contato. O resultado do ensaio é semelhante ao obtido pelo método com contato, e utiliza os mesmos parâmetros de resposta. Algumas técnicas sem contato apresentam algumas limitações quanto a características da peça a ser medida:

- Em superfícies com depressões elevadas, a quantidade de luz refletida para o detector e as lentes é insuficiente, resultando em medidas imprecisas;
- Em casos de contaminação superficial, estas são também medidas, pois não há força para removê-las, como ocorre nas técnicas com contato. Este fato distorce os resultados.
- A presença de camadas também dificulta a análise, pois as lentes podem oscilar o foco entre a camada superior e inferior, dando a falsa impressão de uma superfície altamente rugosa [34].

Método por ajuste de foco

Este método envolve o uso de lentes móveis de forma a manter um feixe de luz focado na superfície. O movimento das lentes é correlacionado com a topografia da superfície e é controlado por um motor elétrico. O sinal analógico gerado para movimentar o motor é digitalizado e processado de maneira semelhante ao obtido por ponteira de contato. Uma variação desse método consiste na utilização de um transdutor separadamente para monitorar a posição das lentes. O sinal elétrico desse transdutor é utilizado da mesma maneira que o obtido com a ponteira de contato [34].

Interferômetros

Na análise por interferometria, um feixe de luz de uma única fonte é dividido em duas ou mais ondas. Isto é feito colocando um espelho parcialmente transmissor e parcialmente refletor de referência próximo a superfície da amostra.

Os múltiplos feixes são superpostos após percorrerem diferentes comprimentos. Isto acaba produzindo padrões de interferência, que são ampliados por um microscópio. As interferências obtidas em superfícies planas aparecem como retas paralelas de mesma espessura e espaçamento. Variações de altura fazem com que estas linhas apareçam

curvas. Diferenças de altura menores do que $\lambda/200$ podem ser medidas, onde λ corresponde ao comprimento de onda da fonte de luz [34].

4 – MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma dos experimentos é apresentado a seguir e descrito nas seções subseqüentes.

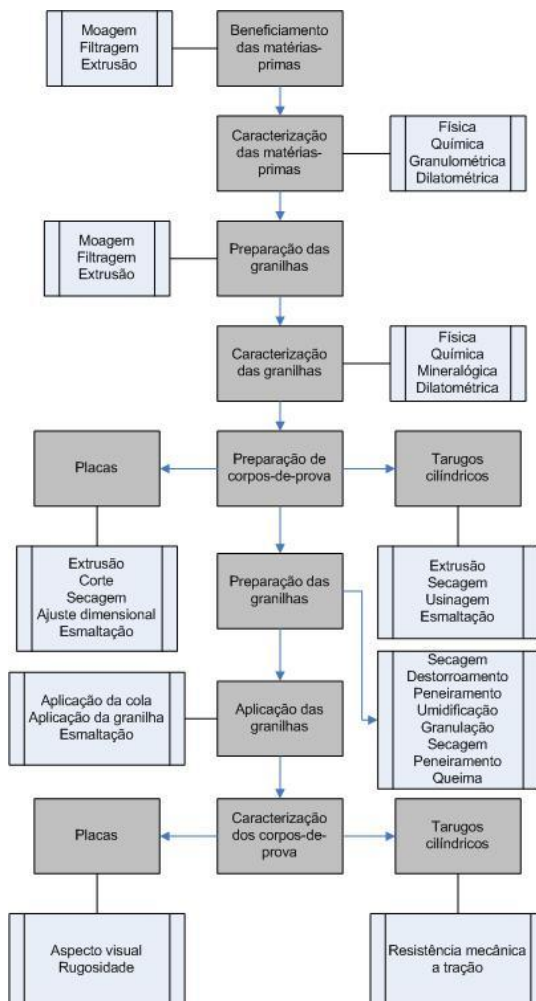


Figura 8. Fluxograma do experimento

4.1 – Matérias-primas

As matérias-primas (caulins, argilas, areia quartzosa e feldspato) utilizadas para a produção de granilhas comuns em processos de fabricação de isoladores elétricos foram fornecidas pela empresa Porcelanas Industriais Germer S/A localizada em Timbó, SC. As demais matérias-primas (talco e mulita eletrofundida) foram obtidas junto a outros fornecedores na forma de amostras.

4.2 – Caracterização das matérias-primas

4.2.1 – Análise química

As análises químicas das matérias-primas utilizados no trabalho foram determinadas por fluorescência de raios-X em um equipamento Panalytical, modelo minipal4. Para a análise foram fornecidos 1kg de cada matéria-prima *in natura*, as quais foram secas e destorroadas, e posteriormente prensadas.

A perda ao fogo (perda percentual em massa em relação ao valor inicial) foi determinada a partir da queima (calcinação) de amostras em forno mufla a 1000°C por 30 minutos.

4.2.2 – Densidade, absorção de água e retração linear

A absorção de água aparente foi obtida pelo método da fervura (NBR 13818/97) – Anexo B. [35]. A densidade aparente de amostras, após queima em ciclo de queima padrão (1260°C por 3 horas), foi determinada utilizando-se o princípio de Arquimedes.

A retração linear foi determinada conforme NBR 13818/97 – Anexo S [36].

A perda ao fogo foi determinada através da diferença percentual entre a massa de corpos-de-prova secos e após o processo de queima, em relação ao peso seco.

4.2.3 – Distribuição granulométrica

A distribuição granulométrica foi obtida através do método do densímetro (NBR 7181) [37]. A metodologia consiste na preparação de uma suspensão defloculada de um litro e de concentração de sólidos de 70 g/L do material a ser analisado, disposta em uma proveta. Obtém-se durante o ensaio leituras da densidade da suspensão com um densímetro previamente calibrado, bem como registro da temperatura da solução, em tempos especificados entre dois minutos e 24 horas.

Para calcular o diâmetro da maior partícula em suspensão, no momento da leitura utiliza-se a equação 4, baseada na lei de Stokes:

$$\phi = \sqrt{\frac{1800 \cdot \eta \cdot a}{t \cdot (\delta - \delta_d)}}$$

[equação 4]

Onde:

ϕ = diâmetro máximo das partículas, em mm;

η = coeficiente de viscosidade do meio dispersor, à temperatura de ensaio, em g.s/cm²;

a = altura de queda das partículas (mm);

t = tempo de sedimentação (s);

δ = massa específica dos grãos do solo (g/cm³), determinada de acordo com a NBR 6508 [38];

δ_d = massa específica do meio dispersor (g/cm³).

A quantidade de material em suspensão é determinada de acordo com a equação 5:

$$Q_s = \frac{N \cdot \delta \cdot V \cdot \delta_c \cdot L_c}{(\delta - \delta_d) \cdot M_h F_c}$$

[equação 5]

Onde:

Q_s = porcentagem (%) da amostra em suspensão no momento de leitura do densímetro;

N = porcentagem (%) do material que passa na peneira com abertura de 2,0mm;

δ = massa específica dos grãos do solo (g/cm³);

δ_d = massa específica do meio dispersor, à temperatura de ensaio (g/cm³);

δ_c = massa específica da água, à temperatura de ensaio (g/cm³);

V = volume da suspensão (cm³);

L_c = leitura corrigida = $L - L_d$ (g/cm³);

L = leitura do densímetro na suspensão (g/cm³);

L_d = leitura do densímetro no meio dispersor (g/cm³);

M_h = massa do material seco submetido à sedimentação (g);

F_c = fator de correção da umidade $100/(100+h)$;
h = umidade higroscópica (%).

Como resultado obtém-se o percentual cumulativo em massa de partículas menores que determinado diâmetro. Através do ensaio é possível determinar o percentual em massa de partículas com dimensões de até 2 μm .

4.2.4 – Análise dilatométrica

A análise dilatométrica das matérias-primas foi realizada em corpos-de-prova obtidos por processo de extrusão em laboratório, secados em estufa laboratorial a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, e posteriormente queimados em ciclo industrial (1260°C , 36 horas, forno túnel a gás). Os coeficientes de expansão térmica linear foram calculados no intervalo entre 25 e 325°C a partir de medidas realizadas em um equipamento de marca NETZSCH, modelo DIL 402 C. A taxa de aquecimento utilizada foi de $7,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

4.3 – Processamento

4.3.1 – Formulações das granilhas

Para a realização do trabalho foram estudadas quatro composições de granilha (Tabela 4), dentre as quais considerou-se a formulação padrão, a qual consiste em uma formulação idêntica a do substrato. As demais formulações foram desenhadas à partir de indicações da literatura e conhecimento adquirido pela empresa Germer em visitas técnicas a outros fabricantes.

Tabela 4. Formulações de granilhas preparadas para este trabalho. Percentuais (%) em massa.

Matérias-primas	Granilha P	Granilha 1	Granilha 2	Granilha 3
Feldspato	28%	-	-	-
Areia Quartzosa	22%	-	-	-
Argila 1	12%	-	2%	-
Argila 2	6%	80,8%	63%	30%
Argila 3	-	14,3%	-	-
Bentonita	-	-	1%	-
Caulim 1	26%	-	-	-
Caulim 2	6%	-	-	-
Talco	-	-	34%	-
Calcita	-	5%	-	-
Mulita eletrof.	-	-	-	40%
Esmalte	-	-	-	30%

A granilha P (padrão) consiste em uma composição típica de porcelana elétrica quartzosa. Dessa forma, as características dessa composição são equivalentes à do substrato, incluindo o coeficiente de expansão térmica.

A granilha 1 consiste em uma adaptação a uma composição obtida pela empresa Germer em visita técnica a empresa do setor de isoladores elétricos, a qual foi adaptada às matérias-primas disponíveis. O ajuste foi realizado com base na tipologia da matérias-primas da composição original e a composição química das mesmas.

A granilha 2 foi desenvolvida visando uma aproximação, em termos de composição química, à composição da cordierita, bem como em indicativo da literatura a respeito das matérias-primas usuais para a obtenção dessa composição. A cordierita é uma fase cerâmica que se caracteriza por menor coeficiente de expansão térmica com relação a outras fases normalmente encontradas em granilhas, característica que é interessante em se tratando de composições de granilha, de acordo com as indicações da literatura [31].

A granilha 3 é uma adaptação de uma formulação da empresa Germer, obtida a partir de visitas técnicas à empresas do ramos de

isoladores elétricos. A referida formulação apresenta baixo coeficiente de expansão térmica, o qual é resultado da mistura de mulita eletrofundida e argila (70%) e esmalte (30%). Em função dos materiais empregados, a microestrutura é constituída de uma fase vítrea, formada a partir da fusão das matérias-primas provenientes do esmalte, contendo elevado percentual de mulita, fase de baixo coeficiente de expansão térmica.

4.3.2 – Dosagem e moagem das composições de granilha

As matérias-primas para a fabricação das granilhas foram inicialmente avaliadas quanto à umidade aparente em base úmida, realizando-se o ajuste da massa de forma a garantir a proporção correta das matérias-primas na composição. A massa seca total das composições foi de 15 kg.

As composições foram moídas em moinho de bolas de 60 litros com revestimento de alumina, tendo com elementos moedores seixos de ágata. O teor de sólidos na moagem variou de acordo com a composição estudada, visto que as características reológicas das suspensões divergem entre si, devido principalmente a diferença de teor e de tipo de matéria-prima argilosa utilizada. A Tabela 5, a seguir, mostra a concentração de partículas sólidas e a densidade das barbotinas obtidas.

A moagem foi conduzida até a obtenção de resíduo entre 1 e 2% em peneira 325 mesh (44 μ m), exceto para a formulação da granilha padrão, para a qual o resíduo de moagem foi controlado de forma a se obter entre 1 e 2% em peneira 200 mesh (74 μ m).

Tabela 5. Teor de sólidos e densidade aparente das barbotinas.

Composição	Concentração de partículas sólidas (%)	Densidade (g/mL)
Granilha P	45	1,36
Granilha 1	32	1,18
Granilha 2	42	1,25
Granilha 3	45	1,52

4.3.3 – Preparação e caracterização de corpos-de-prova das formulações de granilha

Para cada composição foram preparados corpos-de-prova em forma de placas e pinos, de forma a se avaliar as propriedades físicas após secagem e queima das mesmas.

Após o processo de beneficiamento, as composições foram dispostas em moldes de gesso por um período de 24 a 48 horas, obtendo-se ao final do processo uma massa plástica. Após a remoção do material do molde de gesso, separou-se cerca de 2kg de material. Procedeu-se com a homogeneização manual da massa e secagem ao ambiente de forma a se obter consistência adequada para a confecção de corpos-de-prova. A consistência foi avaliada em intervalos de cerca de uma hora, utilizando-se um equipamento “Pfeferkorn”. As massas plásticas foram consideradas adequadas para a etapa subsequente quando a altura final dos corpos-de-prova situava-se entre 28 e 30 mm.

Após o ajuste da altura dos corpos-de-prova, conforme descrito anteriormente, procedeu-se com a conformação de corpos-de-prova por extrusão em forma de placas e tarugos para avaliação das propriedades físicas (conforme item 4.2.2). Os corpos-de-prova foram secos a temperatura ambiente por 24 horas, seguido de secagem em estufa elétrica a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ até massa constante.

4.3.4 – Preparação das granilhas

Para a preparação das granilhas, o material restante do processo de beneficiamento (conforme item 4.3.2) foi colocado em estufa elétrica a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ até obtenção de massa constante. Após a secagem, as composições foram trituradas manualmente em almofariz e passadas em peneira 50 mesh (0,297mm), de forma se obter 10kg de material. Posteriormente, o material obtido foi adicionado a um moinho tipo Z, juntamente com 18% de umidade e 2% de solução desmoldante padrão (75% querosene, 25% oleína), em base seca. Procedeu-se com a homogeneização da mistura por 30 minutos. Em seguida, as amostras foram colocadas em recipientes plásticos fechados por 24 horas, de forma a se obter um material com umidade homogênea. Após esse processo, as granilhas foram passadas em peneira 6 mesh (3,36mm), e posteriormente dispostas em formas metálicas, seguindo ao processo de secagem em estufa elétrica a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ até massa constante.

Os grânulos anteriormente peneirados em peneira 6 mesh (3,36mm), foram então peneirados a seco em peneira 10 mesh (2,0mm), forçando a passagem do material com o auxílio de uma espátula, e coletadas em peneiras 14 mesh (1,41mm) e 16 mesh (1,19mm), dispostas em série. Os grânulos secos coletados em cada peneira foram dispostos em caixas de carbetto de silício, seguindo ao processo de queima (temperatura de patamar de 1260°C , patamar de 3 horas, ciclo

total de 36 horas, forno túnel a gás natural). Após o processo de queima, as granilhas foram peneiradas nas respectivas peneiras com auxílio de uma espátula.

4.3.5 – Caracterização dilatométrica de substrato cerâmico, esmaltes e granilhas.

A análise dilatométrica do substrato cerâmico (porcelana elétrica) e das granilhas foi realizada em corpos-de-prova obtidos por processo de extrusão em laboratório, secados em estufa elétrica laboratorial a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, e posteriormente queimados em ciclo industrial (1260°C , 36 horas, forno túnel a gás). Os coeficientes de expansão térmica linear foram calculados no intervalo entre 25 e 325°C , em um equipamento de marca NETZSCH, modelo DIL 402 C. A taxa de aquecimento utilizada foi de $7,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Para a análise dilatométrica dos esmaltes cerâmicos (vidrados), as amostras foram secas, a partir de suspensões com densidade de 1,60 g/mL, em estufa elétrica a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ até massa constante. Após esse processo, o material seco foi peneirado em peneira 50 mesh (297 μm). Ao material peneirado, foi adicionado 6% de água, procedendo com novo peneiramento em peneira 50 mesh (297 μm). Foram prensados, em prensa hidráulica, corpos-de-prova de perfil retangular com dimensões nominais de 100 x 20 x 5 mm (comprimento, largura, espessura). Os corpos-de-prova prensados foram secos em estufa elétrica a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ até massa constante, seguindo para a queima (1260°C , patamar de 3 horas, ciclo total de 36 horas, forno túnel a gás). Os coeficientes de expansão térmica linear foram calculados no intervalo entre 30 e 100°C , 30 e 300°C e 30 e 600°C , em um equipamento de marca BHR, modelo DIL 802 L. A taxa de aquecimento utilizada foi de $5,0^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

4.3.6 – Confecção de corpos-de-prova para aplicação das granilhas

Para avaliação das características técnicas das granilhas e interação com o substrato, foram preparados corpos-de-prova em forma de placa e tarugos cilíndricos. As dimensões dos corpos-de-prova serão apresentadas a seguir.

Os corpos-de-prova em forma de placas foram produzidos com os seguintes objetivos: visualização da interação entre o substrato e esmalte; obtenção de indicadores quanto a rugosidade de cada composição e sua relação com as variáveis do processo de aplicação. De posse desses dados, buscou-se, posteriormente, verificar a relação dessas variáveis com o desempenho mecânico do isolador elétrico montado.

A preparação consistiu no corte a úmido de tarugos de massa padrão (lote de produção), secagem a temperatura ambiente por 24 horas, seguido de secagem em estufa elétrica a $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ até massa constante. Após esse processo foi realizado o lixamento a seco utilizando lixa 100 mesh, de forma a obter placas com dimensões nominais de $100 \pm 10 \times 100 \pm 10 \times 10 \text{mm} \pm 0,1$ (largura, profundidade, espessura). Após esse processo, parte das placas foram esmaltadas por imersão em esmalte marrom padrão, com densidade de $1,60 \text{ g/mL}$ e viscosidade aparente 800 mPa.s (Spindle 2, 10 RPM, viscosímetro rotacional Brookfield RVT), com tempo de imersão de 5 segundos.

Os corpos-de-prova cilíndricos foram obtidos a partir de tarugos da massa padrão extrudados em extrusora de fusos industrial marca Netzsch, modelo 250.88, com vácuo de 76 mm/Hg . Os tarugos extrudados seguiram para o processo de secagem a temperatura ambiente por 36 horas e, em seguida, foram destinados ao processo de secagem industrial (ciclo total de 36 horas, com temperatura final de 90°C por 2 horas). Dessa forma obteve-se um material com umidade de 2% (base úmida).

Os tarugos secos foram faceados (ajuste do comprimento e alinhamento das faces, por usinagem a seco). Após essa etapa, os tarugos foram usinados em torno CNC (Allen-Bradley, modelo 9/Series), com ferramentas de metal duro, tal que dois perfis distintos (modelos A e B), conforme Figuras 9 e 10, a seguir, foram obtidos. Após esse processo, as faces superior e inferior foram impermeabilizadas com parafina aquecida (estado líquido) com auxílio de uma esponja, a qual se solidifica ao contato com o material cerâmico em temperatura ambiente. Em seguida, os corpos-de-prova seguiram para o processo de esmaltação por imersão com esmalte marrom padrão. A condição de esmaltação utilizada foi análoga àquela utilizada para a obtenção dos corpos-de-prova em forma de placas.

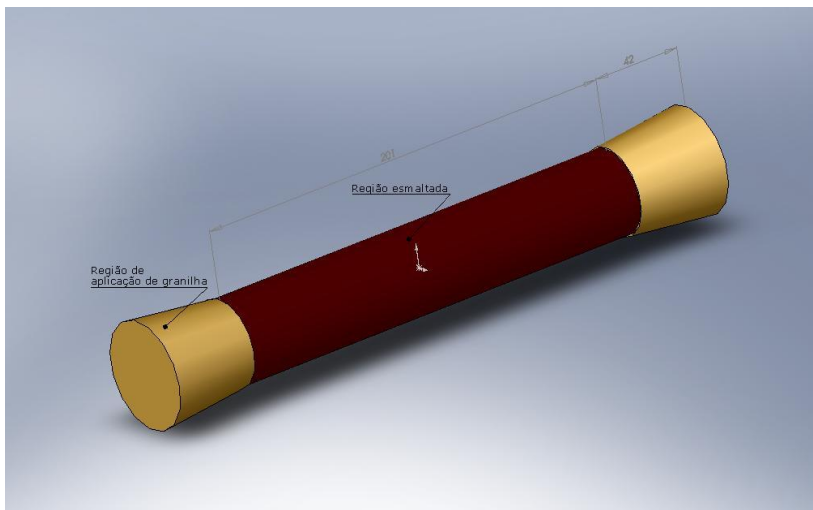


Figura 9. Esquema do corpo-de-prova modelo A (comprimento: 285mm; diâmetro da base: 49mm; diâmetro central: 39mm). Dimensões obtidas após queima.

Foram produzidos corpos-de-prova esmaltados em duas condições distintas: vinte e oito corpos-de-prova contendo esmalte na região de aplicação da granilha, e vinte e oito sem aplicação de esmalte nessa região, de forma a se obter 7 corpos-de-prova (de cada modelo) para as composições de granilha estudadas (quatro). Para os corpos-de-prova sem esmalte abaixo da granilha, logo após a esmaltação a camada de esmalte foi removida com auxílio de uma esponja umedificada. Essas condições foram aplicadas aos dois modelos de corpos-de-prova desenvolvidos.

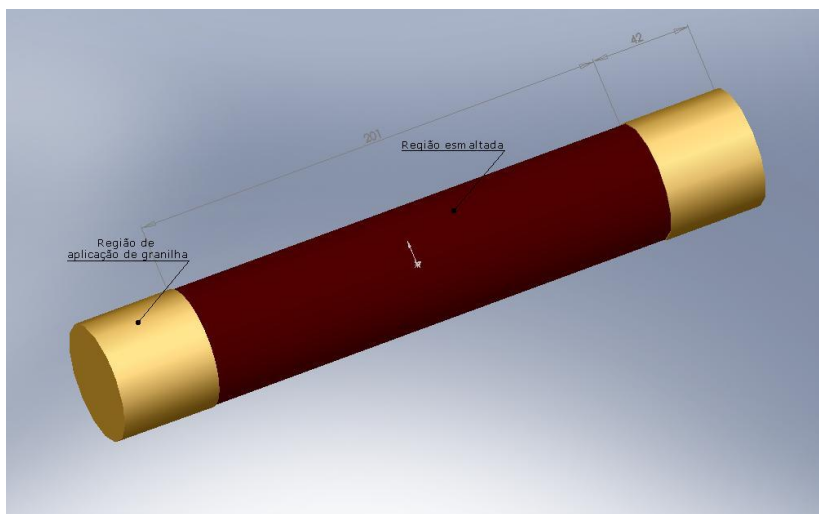


Figura 10. Esquema do corpo-de-prova modelo B (comprimento total: 285mm; diâmetro: 49mm). Dimensões obtidas após queima.

4.3.7 – Aplicação das granilhas

Para aplicação das granilhas, os corpos-de-prova em placas e tarugos, após preparação e esmaltação, receberam, em local específico, uma camada de cola para granilha padrão.

A cola para granilha padrão consiste em uma mistura de 60% em massa de esmalte cinza padrão, o qual deve apresentar 20% de umidade (base úmida), com 40% em massa de adesivo PVA. Para a preparação de um lote de cola, adicionou-se 4 kg de adesivo PVA (marca Cascorez, tipo Extra) a um recipiente sendo os materiais misturados em um agitador de hélice. Neste caso, o esmalte foi adicionado lentamente para facilitar a mistura. Após a adição de todo o esmalte, o material permaneceu sob agitação por 30 minutos. Após a homogeneização, verificou-se a viscosidade aparente, a qual deve estar entre 3000 e 5000 mPa.s (spindle 3, 10 PRM, Brookfield RVT). O ajuste da viscosidade, quando necessário, é conseguido com a adição de água, mistura por 10 minutos, seguida de nova medição de viscosidade. Procede-se dessa forma até se obter a viscosidade adequada para aplicação.

As placas receberam uma quantidade de cola para granilha. O processo de aplicação consiste na cobertura da superfície desejada com uma camada de cola para granilha, utilizando-se de um pincel. As

camadas aplicadas (média e desvio padrão) nas amostras foram de $0,25 \pm 0,015 \text{ g/cm}^2$. Logo após a aplicação da cola, a granilha foi despejada sobre a superfície com o auxílio de um recipiente plástico. A placa é então girada de 90° tal que o excesso de granilha não aderido a cola fosse removido. A quantidade de granilha aplicada por esse método foi de $0,80 \pm 0,05 \text{ g/cm}^2$.

Após a aplicação da granilha, as placas foram mantidas em temperatura ambiente por 30 minutos para a secagem completa da cola. Em seguida procedeu-se com a aplicação de uma fina camada de esmalte marrom padrão por aspersão, utilizando-se uma pistola de ar comprimido (Arprex, modelo 25A, $\text{Ø}=0,9\text{mm}$). A camada de esmalte depositada foi de $0,05 \pm 0,01 \text{ g/cm}^2$. Para essa etapa, o esmalte padrão utilizado apresentou densidade de $1,53 \text{ g/mL}$, e viscosidade de 400 m.Pa.s (spindle 2, 10 RPM, Brookfield RVT). Após secagem da camada de esmalte por 30 minutos em temperatura ambiente, as placas foram queimadas com a face granilhada para cima. (1260°C , patamar de 3 horas, ciclo total de 36 horas, forno túnel a gás).

Para a aplicação das granilhas em tarugos, os mesmos foram inicialmente delimitados quanto à região a ser aplicada a granilha conforme mostram as Figuras 11(a) e (b). Os tarugos foram dispostos em um torno mecânico semi-automático, no qual o mecanismo de apoio da peça consiste na aplicação de pressão nas faces do tarugo por dois discos (ver Figura 11). Após fechamento, o mecanismo do torno é acionado e os discos inferem uma rotação baixa ao tarugo. A cola é adicionada a região desejada com o auxílio de um pincel, despejando-se em seguida a granilha sobre a cola. Após conclusão da aplicação nas duas extremidades, o mecanismo de rotação é desligado e o tarugo é retirado, aguardando a secagem da cola por, no mínimo, 30 minutos.

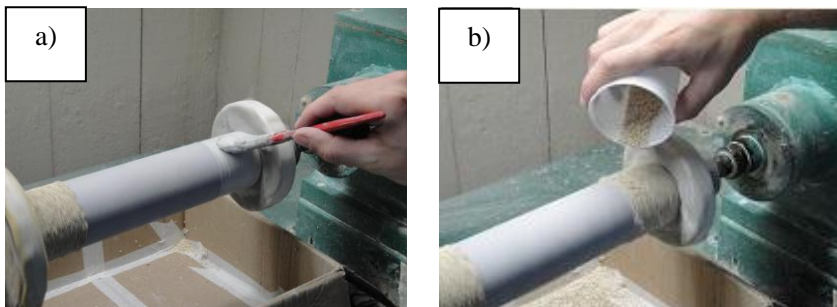


Figura 11(a). Fotografia evidenciando a aplicação de cola para granilha padrão em corpo-de-prova.

Figura 11(b). Fotografia evidenciando a aplicação de granilha em corpos-de-prova.

Após aplicação da granilha e secagem da cola, os tarugos receberam uma camada de esmalte marrom padrão por aspersão, de forma análoga ao método utilizado para esmaltação das placas. Após a secagem do esmalte, os tarugos foram queimados em queima padrão (1260°C , patamar de 3 horas, ciclo total de 36 horas, forno túnel a gás).

4.4 – Caracterização mineralógica das granilhas

As granilhas, após processo de queima em ciclo padrão (1260°C , patamar de 3 horas, ciclo total de 36 horas, forno túnel a gás), foram moídas em moinho de micro-esferas por 30 minutos. Após o processo, o material foi peneirado a seco em peneira 325 mesh ($45\mu\text{m}$), obtendo-se cerca de 25 gramas de material.

As amostras foram analisadas em um difratômetro de Raios-X, marca Phillips, modelo X'Pert, utilizando radiação $\text{Cu K}\alpha$, $\lambda=1,54056 \text{ \AA}$, gerada a 40kV , 30mA . A varredura foi realizada com tamanho de passo (step size) de $0,02^{\circ}$ e tempo de passo (step time) de um segundo.

Os dados foram analisados em software próprio do equipamento, utilizando o banco de dados JCPDS (Joint Comitee of Powder Diffraction Standards) para identificação, e o banco de dados ICSD (Inorganic Crystal Structure Database) para quantificação das fases cristalinas.

4.5 – Caracterização dos corpos-de-prova

4.5.1 - Rugosidade

As medidas de rugosidade em corpos-de-prova, em forma de placa, foram realizadas em dois equipamentos distintos: rugosímetro de contato e sem contato a laser (UFSC) e interferômetro (Embraco S/A). No entanto, devido à rugosidade muito elevada das amostras analisadas, não foi possível obter um resultado coerente, já que o intervalo de medição dos equipamentos disponibilizados é inferior ao necessário.

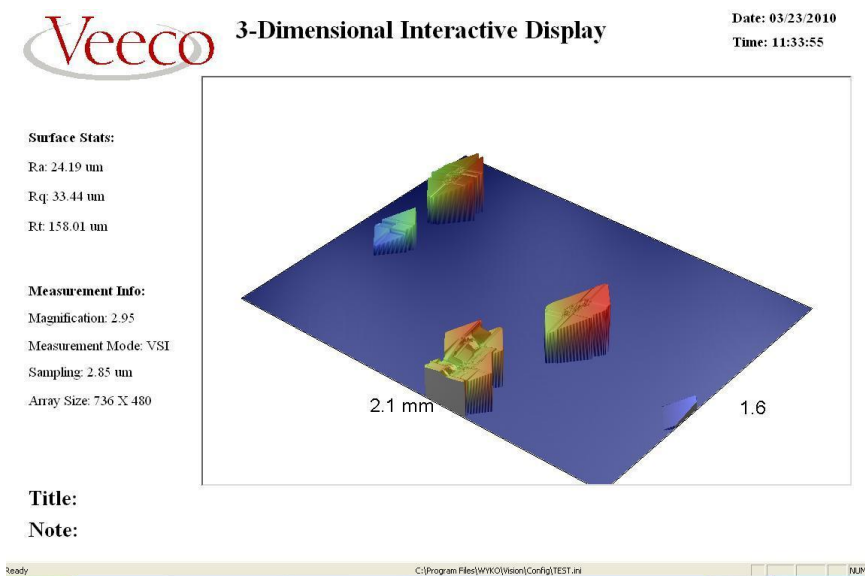


Figura 12. Gráfico proveniente de análise por interferometria a laser de placa cerâmica com aplicação de granilha.

Assim, com o objetivo de se obter medidas relativas de rugosidade, foi desenvolvido um rugosímetro de contato para medidas em intervalos maiores de rugosidade. Apesar da simplicidade do aparato (rugosímetro), observa-se, neste caso, que as medidas obtidas são compatíveis com os indicadores aparentes (percepção visual). Dessa

forma, foi possível quantificar a rugosidade, tornando a análise mais objetiva e confiável.

O aparato desenvolvido (Figura 13) é constituído de um apalpador metálico (raio da ponta do apalpador: 0,1 mm) o qual é disposto perpendicularmente sobre a superfície da amostra. O movimento horizontal do apalpador é realizado manualmente através do deslocamento de uma haste fixada e ajustada em mancal de seção quadrada. O movimento horizontal e vertical do apalpador, ao percorrer a amostra, é registrado em uma folha de papel pelo contato de uma caneta hidrográfica, fixada ortogonalmente ao apalpador.

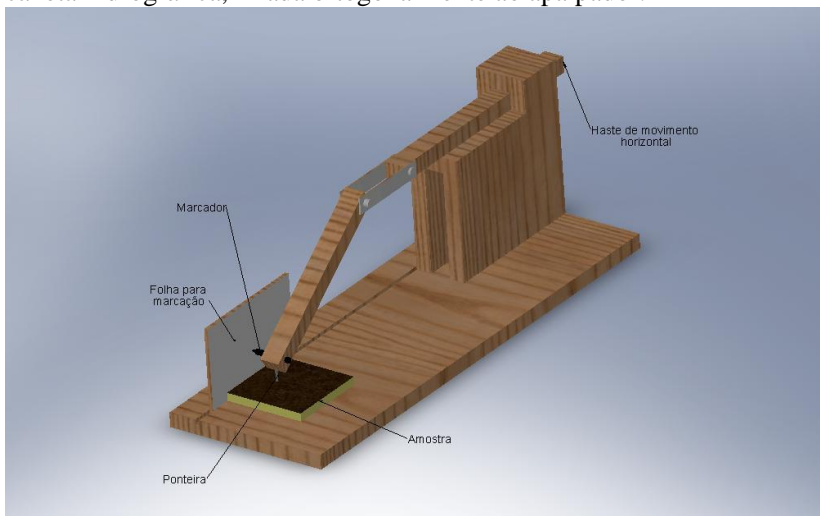


Figura 13. Esquema do aparato/rugosímetro desenvolvido para a medição da rugosidade aparente da superfície de corpos-de-prova com granilha.

Foram realizadas cinco medidas para cada amostra em posições distintas dos corpos-de-prova. Após obtenção dos gráficos, uma região correspondente a 80 milímetros foi delimitada com o auxílio de um paquímetro digital (fixa de medição: de $150 \pm 0,01\text{mm}$), marca Mitutoyu. Os gráficos de rugosidade foram digitalizados com resolução de 1700×2338 pixel.

Para a análise dos gráficos, foi utilizado o software *Image Tool 3.0*. Inicialmente foi calculado o fator de conversão de escalas entre

milímetro e pixel (unidade de medida no software). Para tal, foi medido o comprimento correspondente as linhas verticais de delimitação para análise (80 milímetros), obtendo-se o respectivo valor em pixel. Após esse procedimento, foram obtidas as áreas dos picos e vales do gráfico em relação a uma linha de referência. O valor de Ra (rugosidade) pode ser calculado a partir da expressão:

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |h(x)| dx \quad [\text{equação 6}]$$

O parâmetro de rugosidade Rt foi determinado por meio da identificação e medida do maior pico ou vale em relação a linha de referência, em vermelho (Figura 14).

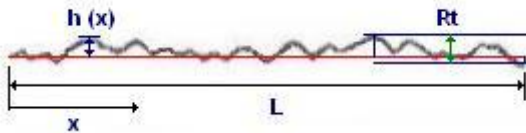


Figura 14. Perfil de rugosidade indicando as medidas realizadas para cálculo dos valores de Ra e Rt. (Ra: rugosidade média (mm); Rt: rugosidade total (mm); h(x): altura dos picos e vales em relação à linha de referência (mm); x: posição horizontal (mm) L: comprimento total do perfil de gráfico analisado (mm))

Após cálculo dos parâmetros de rugosidade, os valores obtidos foram convertidos para milímetros através do fator de conversão de escala previamente calculado.

4.5.2 – Ensaios mecânicos

Os tarugos, após o processo de queima, foram encaminhados para a etapa de cimentação das ferragens. O processo consiste inicialmente na preparação de uma argamassa de cimento Portland contendo 40% de água. Após a homogeneização da massa, é colocada uma quantidade de cimento dentro da ferragem (campânula), inserindo em seguida a peça cerâmica. O conjunto é posicionado sobre uma mesa vibratória de forma a acomodar o cimento no interior da ferragem e eliminação de bolhas de ar. O excesso de cimento é retirado com o auxílio de uma esponja, e a

peça é disposta em um suporte, que tem por objetivo manter a centralização do tarugo dentro da ferragem, garantindo que a porcelana e a ferragem estejam alinhadas.



Figura 15. Fotografias mostrando corpos-de-prova para ensaio de tração dispostos em suporte de alinhamento em processo de cura do cimento.

As peças permanecem montadas ao suporte por, no mínimo, 12 horas. Ao final deste período, a consistência do cimento é adequada para manuseio. Dessa forma, procede-se de forma análoga ao procedimento supracitado, cimentando a ferragem na extremidade oposta dos corpos cerâmicos. Após, no mínimo, 12 horas, as peças podem ser retiradas do suporte, sendo dispostas em caixas, e aguardando-se o tempo de cura (mínimo de 72 horas, NBR 5032 [39]).

Após o processo de cura do cimento, as peças foram encaminhadas para o setor de ensaios de produto acabado da empresa Porcelanas Industriais Germer S/A para a realização do ensaio de tração. Nesse ensaio a peça é fixada a um dispositivo através de uma barra metálica (Figura 16), que é posicionada entre os olhais da ferragem e das garras de fixação da máquina de ensaios. O equipamento infere um taxa de carregamento de forma que a carga de ruptura seja atingida entre 15 e 45 segundos.

Quando da ocorrência de movimento relativo entre o corpo cerâmico e os demais componentes da peça, verifica-se no painel da máquina uma modificação na taxa de carregamento, seguida de uma breve estabilização e queda lenta da tensão até o destacamento total do

corpo cerâmico. Nesse caso, o valor registrado corresponde a carga máxima obtida no ensaio. Após o ensaio de todas as peças, procedeu-se com a análise estatística dos dados obtidos.



Figura 16. Fotografia mostrando o conjunto corpo-de-prova e ferragem cimentada submetido à ensaio de tração.

5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 – Caracterização de matérias-primas

A caracterização das matérias-primas teve como objetivo o conhecimento das propriedades tecnológicas dos materiais disponíveis, de forma a possibilitar seleção destes para a formulação de novas composições de granilha de acordo com as indicações da literatura. Com este propósito, a caracterizações química, físico-química e granulométrica foram realizadas e os resultados são apresentadas a seguir.

5.1.1 – Caracterização química

A Tabela 6, a seguir, mostra os resultados das análises químicas obtidos por fluorescência de Raios-X de amostras das matérias-primas disponíveis para a fabricação de isoladores elétricos e granilhas cerâmicas para isoladores elétricos.

Tabela 6. Composição química das matérias primas. (P.F.: Perda ao Fogo).

Matérias-primas	Óxidos constituintes (% massa)							P. F.
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	
Caulim 1	74,22	18,01	0,57	0,02	0,02	1,59	0,29	6,25
Caulim 2	53,74	31,89	0,77	0,09	0,02	2,02	0,32	11,62
Argila 1	73,31	17,00	1,34	0,01	0,05	1,00	0,23	6,23
Argila 2	54,83	29,51	1,79	0,07	0,06	0,63	0,28	12,80
Argila 3	63,94	21,00	1,86	0,06	0,13	3,07	1,09	6,76
Bentonita	65,87	16,93	1,30	1,26	3,25	0,49	3,74	6,63
Feldspato	67,67	17,96	0,07	0,13	3,58	9,13	0,17	0,55
Areia	96,31	2,36	0,01	0,01	0,16	0,08	0,04	1,10
Calcita	2,35	0	0,06	51,01	0	0,02	5,14	40,12
Mulita eletrofundida	73,87	25,08	0,36	0,39	0,44	0	0	0,2
Talco	68,18	0,78	0,34	0,03	0,01	0,01	26,05	4,52

Os *caulim 1* e o *caulim 2* são utilizados na fabricação da massa cerâmica quartzosa padrão, a qual por sua vez serve de matéria-prima para a confecção da granilha padrão. Na massa de porcelanas triaxiais os caulins, juntamente com as argilas, correspondem a 50% em massa [21].

O objetivo da sua utilização é de regular a plasticidade e facilitar o processo de filtroprensagem e secagem, bem como adequar a resistência a seco da massa de forma a facilitar o processo de torneamento a seco. Pode-se constatar que o *caulim 1* apresenta maior teor de quartzo livre, tendo em vista o maior aporte de SiO_2 . De fato, o *caulim 1* apresenta uma baixa perda ao fogo (P.F.), mais baixa que o *caulim 2*, visto que, em virtude da menor teor de materiais argilosos, a perda de água de constituição é proporcionalmente menor.

A *argila 1* apresenta composição química semelhante a do *caulim 1*, ou seja, elevado teor de SiO_2 , podendo conter, assim, certa quantidade de quartzo livre. A *argila 2*, apresenta um teor mais elevado de Al_2O_3 , sugerindo menor teor de quartzo e maior teor de minerais argilosos, tendo em vista que nas argilas a Al_2O_3 normalmente se encontra na forma de alumino-silicatos hidratados (minerais argilosos). A perda ao fogo (P.F.) mais elevada indica a maior presença de minerais argilosos, em função da perda de água de constituição. No entanto, esse fato pode estar parcialmente relacionado a um maior teor de matéria orgânica, já que se trata de uma argila de coloração escura. A *argila 3* apresenta como diferencial o teor mais elevada do K_2O , o que pode indicar a presença de *ilita*, bem como um teor representativo de MgO , indicando a possível presença de *esmectitas*.

A *bentonita* estudada apresentou elevado teor de Na_2O e MgO , e pode ser considerada de elevada fundência quando comparada as demais argilas estudadas, as quais apresentam baixo teor de álcalis.

O *feldspato*, o qual é normalmente utilizado na composição de massas para fabricação de massas para isoladores elétricos, é, neste caso, do tipo sódico-potássico, com teor de potássio aproximadamente três vezes maior que o de sódio e com relativamente baixa perda ao fogo.

A *areia quartzosa* utilizada apresentou teor de SiO_2 de 96,31%, sendo fonte de quartzo. O teor de Al_2O_3 encontrado pode indicar a presença de material argiloso residual.

A *calcita* apresentou cerca de 50% de CaO e 5% de MgO , indicando certa quantidade de *dolomita* ($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$). A elevada perda ao fogo é esperada e é característica da decomposição de carbonatos.

A *mulita eletrofundida*, por ser um produto de eletrofundição de quartzo e alumina, apresenta SiO_2 e Al_2O_3 como elementos majoritários. A baixa perda ao fogo é característica deste material, o qual é largamente utilizado no setor de refratários, e, sendo produzido

sinteticamente, apresenta baixo teor de contaminantes, tais como o Fe_2O_3 .

O *talco* ($3\text{MgO}\cdot 4\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$) apresentou características químicas típicas deste mineral do grupo dos filossilicatos, bem como baixo teor de impurezas, tais como Fe_2O_3 .

5.1.2 – Caracterização física e dilatométrica

A Tabela 7, a seguir, mostra os resultados da caracterização física e dilatométrica das matérias-primas.

Tabela 7. Características físicas e térmicas das matérias-primas (5 corpos-de-prova por amostra).

	Alfa 35-325 (°C⁻¹ x 10⁻⁷)	Retração de secagem (%)	Retração de queima (%)	Resistência mecânica a seco (MPa)
<i>Caulim 1</i>	90,05	7,99 ±0,52	9,43 ±0,24	0,94 ±0,02
<i>Caulim 2</i>	92,60	7,01 ±0,01	10,95 ±0,27	1,58 ±0,33
<i>Argila 1</i>	181,90	6,43 ±0,57	13,97 ±0,22	3,40 ±0,82
<i>Argila 2</i>	92,10	8,57 ±0,65	11,14 ±0,59	3,97 ±0,36
<i>Argila 3</i>	55,80	4,90 ±0,01	6,59 ±0,05	10,98 ±0,37
<i>Bentonita</i>	-	-	-	-
<i>Feldspato</i>	85,20	-	-	-
<i>Areia</i>	131,80	-	-	-
<i>Calcita</i>	-	-	-	-
<i>Mulita eletro- fundida</i>	-	-	-	-
<i>Talco</i>	-	-	-	-

	Resistência mecânica queimado (MPa)	Absorção de água aparente (%)	Densidade aparente após queima (g/cm³)	Perda ao fogo (%)
<i>Caulim 1</i>	42,77 ±11,29	11,13 ±0,16	1,94	7,85 ±0,25
<i>Caulim 2</i>	40,83 ±8,14	40,83 ±8,14	2,01 ±0,01	13,82 ±0,31
<i>Argila 1</i>	48,93 ±2,75	12,17 ±0,19	1,86	8,30 ±0,13
<i>Argila 2</i>	82,59 ±7,81	6,79 ±0,15	2,20 ±0,01	13,64 ±0,22
<i>Argila 3</i>	42,08 ±0,37	1,14 ±0,03	2,22 ±0,02	8,16 ±0,21
<i>Bentonita</i>	-	-	-	6,53
<i>Feldspato</i>	-	-	-	0,32
<i>Areia</i>	-	-	-	1,2
<i>Calcita</i>	-	-	-	39,5
<i>Mulita eletro-fundida</i>	-	-	-	0,2
<i>Talco</i>	-	-	-	1,7

Da análise dos resultados, pode-se constatar que o *caulim 2* apresenta perda ao fogo e absorção de água aparente mais elevados em comparação ao *caulim 1*, o que é coerente tendo em vista o maior teor de Al₂O₃ e menores teores de SiO₂, o que sugere presença mais significativa de material argiloso.

A *argila 3* apresentou um caráter de maior densificação, indicado pela menor absorção de água. Esse comportamento deve-se à presença significativa de K₂O e MgO, que acabam por auxiliar na densificação do material no processo de queima. Ainda, deve-se destacar a elevada

resistência a seco desse material, o que sugere um elevado empacotamento das partículas, possibilitando atingir a baixa porosidade após queima observada. É importante observar que a *argila 3* apresentou o menor valor de coeficiente de expansão térmica, o qual, no caso das argilas estudadas, se mostrou inversamente proporcional a densidade aparente. Contudo, uma análise quantitativa das fases formadas no processo de queima, para cada caso, faz-se necessária para se verificar o teor de quartzo livre e outras fases formadas.

A *argila 1* apresentou um coeficiente de expansão térmica excessivamente alto, superando o valor apresentado pela *areia quartzosa* no intervalo de temperatura estudado. Uma análise por DRX seria necessária para verificar as fases formadas e formulação de hipóteses a respeito do resultado obtido.

Em função do caráter de elevada fundência da *bentonita* para temperatura de queima, não foi possível a confecção corpos-de-prova para dilatométrica.

5.1.3 – Distribuição granulométrica

As características físicas das matérias-primas plásticas são altamente dependentes de sua distribuição granulométrica e das espécies mineralógicas presentes no material. Sendo assim, é importante a determinação da distribuição granulométrica das matérias-primas estudadas ou consideradas na formulação dos materiais.

A Tabela 8 e Figura 17, a seguir, mostram a distribuição granulométrica por sedimentação das matérias-primas plásticas.

Tabela 8. Distribuição granulométrica das matérias-primas.

Matérias-primas	%	%	%	%
	abaixo de 60 μm	abaixo de 43 μm	abaixo de 31 μm	abaixo de 21 μm
<i>Caulim 1</i>	78,3	75,9	73,6	71,3
<i>Caulim 2</i>	86,9	84,5	82,2	75,1
<i>Argila 1</i>	80,9	78,6	73,9	71,6
<i>Argila 2</i>	77,7	75,3	75,3	75,3
<i>Argila 3</i>	90,1	87,6	85,2	82,7
<i>Bentonita</i>	89,1	89,1	89,1	89,1

Matérias-primas	% abaixo de 15 μm	% abaixo de 11 μm	% abaixo de 08 μm	% abaixo de 06 μm	% abaixo de 02 μm
<i>Caulim 1</i>	67,2	66,6	61,9	50,1	29,4
<i>Caulim 2</i>	70,4	63,3	56,3	49,2	26,3
<i>Argila 1</i>	69,3	67,0	62,4	50,7	36,9
<i>Argila 2</i>	75,3	75,3	72,9	68,1	53,5
<i>Argila 3</i>	80,3	75,4	70,6	60,8	45,2
<i>Bentonita</i>	89,1	78,5	76,1	73,7	72,9

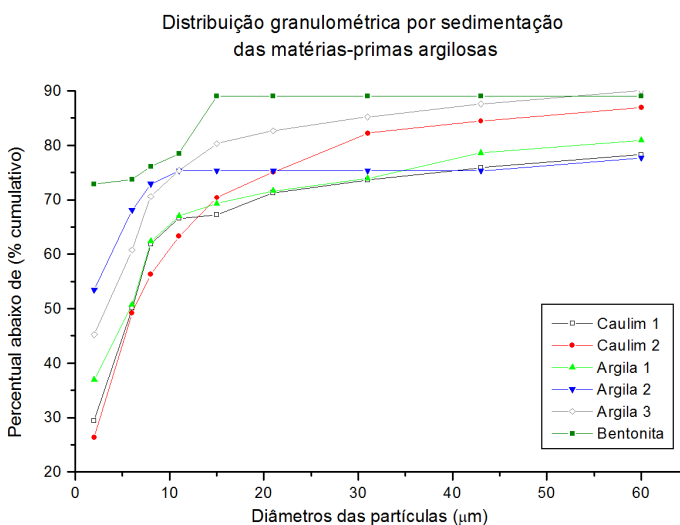


Figura 17. Gráfico mostrando as distribuições granulométricas das matérias-primas argilosas.

As matérias-primas não-plásticas utilizadas nas formulações dos materiais (feldspato, areia, calcita, mulita eletrofundida e talco) não foram analisadas quanto à distribuição granulométrica.

Os caulins estudados apresentaram tamanhos de partícula maiores que as argilas estudadas, sendo essa diferença mais acentuada nos percentuais de partículas abaixo de 15 µm de diâmetro. Este resultado está de acordo com as características físicas obtidas na caracterização desses materiais, sobretudo tendo-se em vista os valores obtidos em ensaio de resistência mecânica à flexão a seco. A presença de menores percentuais de partículas argilosas implica em menor área específica, com menor nível de interação entre essas partículas, resultando em menor nível de coesão.

As argilas apresentaram correlação entre percentual de partículas com diâmetro abaixo de 2 µm e resistência mecânica à flexão a seco, ou seja, ao que indica, ocorre um incremento na resistência à flexão a seco com o aumento do teor de partículas finas das argilas estudadas. Este fato se relaciona com as características de elevado empacotamento e forças ligação das partículas argilosas [15]. No entanto a argila 3 apresentou elevada resistência mecânica a seco e distribuição granulométrica, aparentemente, pouco diferente a ponto de explicar os resultados obtidos. As características mineralógicas, neste caso, provavelmente tem uma influência mais relevante, visto que a mesma apresenta um percentual comparativamente maior de K₂O, indicando a presença de *ilita*. Esse mineral quando presente nas argilas induz uma maior resistência mecânica a seco ao material.

A *bentonita* apresentou um elevado percentual de partículas com diâmetro inferior a 2 µm, o que indica um material de elevada área de superfície específica, atribuído a argilas *montmorilonitas* , o que confere a essas argilas alta plasticidade e resistência mecânica a seco, sendo normalmente utilizada como aditivo em massas cerâmicas. Esta argila melhora a plasticidade e resistência mecânica dos materiais processados, o que possibilita a sua otimização e adequação em termos das quantidades adicionadas às massas formuladas e preparadas.

5.2 – Caracterização dos esmaltes cerâmicos

Os esmaltes cerâmicos são aplicados ao isolador com a finalidade de promover uma superfície lisa, de forma a minimizar o acúmulo de poluição e facilitar a lavagem pela água da chuva, bem como conferir a coloração característica de acordo com a solicitação normativa ou solicitação de clientes. As cores usuais são: marrom e cinza, podendo em alguns casos serem produzidos com esmaltes incolores ou brancos, azuis, ou pretos, de acordo com a exigência do cliente.

Para a produção desses esmaltes, parte-se de matérias-primas cruas, tais como feldspatos, quartzos, argilas, e também óxidos sintéticos, sendo estes últimos os que irão conferir a coloração característica dos esmaltes. Em virtude da necessidade de diferentes silicatos e óxidos para gerar efeitos de opacificação ou cor, um ajuste na composição química faz-se necessário para o ajuste do coeficiente de expansão térmica linear, introduzindo-se maior quantidade de matérias-primas contendo óxidos que atuam como fundentes na composição do esmalte.

O coeficiente de expansão térmica do esmalte cerâmico é uma propriedade de grande importância no que se refere à aplicação em isoladores elétricos, já que as características de acoplamento com a massa e desenvolvimento das tensões entre esmalte e substrato adequados é um critério normativo e de projeto.

A Tabela 9 mostra os coeficientes de expansão térmica linear de esmaltes cerâmicos formulados e preparados neste trabalho. Os dados foram obtidos a partir de corpos-de-prova produzidos e queimados conforme descrito no item 4.3.5 deste trabalho.

Tabela 9. Coeficientes de expansão térmica linear de esmaltes cerâmicos e substrato cerâmico utilizados neste trabalho.

Alfa	Esmalte Marrom	Esmalte Cinza	Substrato (porcelana)
30-100 ($^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$)	5,03	5,17	5,51
30-300 ($^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$)	4,97	5,19	5,62
30-600 ($^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-6}$)	5,13	5,35	6,67

Os esmaltes cerâmicos apresentaram coeficiente de expansão térmica linear inferiores ao substrato, o que confere as características desejáveis de tensões compressivas na superfície, permitindo obter incremento na resistência mecânica do isolador.

Pode-se observar que o esmalte cinza apresenta um coeficiente de expansão térmica linear mais elevado em relação ao esmalte marrom. Essa diferença é explicada pela composição diferenciada em termos dos óxidos constituintes, de forma a satisfazer as exigências de tonalidade e aspecto superficial. A necessidade de utilização de opacificante no esmalte cinza implica em aumento do teor de fundentes de forma a obter fusibilidade adequada, à custa de um acréscimo no coeficiente de expansão térmica.

5.3 – Caracterização das formulações de granilha

5.3.1 – Caracterização física

A Tabela 10, a seguir, mostra os resultados da caracterização física de corpos-de-prova conformados a partir das composições de granilha estudadas.

Tabela 10. Caracterização física das granilhas estudadas neste trabalho (valores médios de cinco corpos-de-prova para cada formulação).

Granilhas	Retração de secagem (%)	Retração de queima (%)	Resistência mecânica a seco (MPa)	Resistência mecânica queimado (MPa)
<i>Granilha P</i>	5,30 ± 0,20	15,10 ± 0,40	2,40 ± 0,10	70,7 ± 1,2
<i>Granilha 1</i>	8,57 ± 1,07	15,02 ± 1,12	5,83 ± 0,40	74,62 ± 10,60
<i>Granilha 2</i>	4,80 ± 1,06	7,90 ± 0,36	3,57 ± 0,41	35,77 ± 8,49
<i>Granilha 3</i>	2,40 ± 0,30	13,31 ± 0,36	1,23 ± 0,14	41,34 ± 9,36

Granilhas	Absorção de água aparente (%)	Densidade aparente após queima (g/cm³)	Perda ao fogo (%)
<i>Granilha P</i>	0,05 ± 0,01	2,36 ± 0,01	4,51 ± 0,01
<i>Granilha 1</i>	0,26 ± 0,06	2,15	14,22 ± 0,06
<i>Granilha 2</i>	17,31 ± 0,27	1,75 ± 0,02	17,47 ± 1,23
<i>Granilha 3</i>	0,13 ± 0,07	2,49 ± 111	11,04 ± 0,47

A partir da análise dos dados da Tabela 10, pode-se observar que a granilha 2 apresentou valor de retração de secagem substancialmente maior que a granilha 1, e também substancialmente mais elevado que as demais formulações estudadas. Esse resultado, ao que indica, se relaciona com o elevado percentual de argilas na referida composição em relação às demais composições (ver Tabela 4). Por outro lado, a granilha 3 apresentou o menor valor de retração de secagem, em função dos menores percentuais de material argiloso.

Em relação aos resultados de retração de queima, é importante observar que a granilha 2 apresentou os menores valores, o que é esperado, levando-se em consideração a probabilidade de formação de quantidades consideráveis de cordierita para essa formulação, fase cerâmica de elevada refratariedade.

As granilhas 1 e 3 apresentaram os maiores e menores valores de resistência mecânica a flexão à seco, respectivamente, o que é justificável pelos diferentes percentuais de material argiloso nas composições. Observa-se que essa propriedade, nesse caso, é inversamente proporcional à retração de secagem. Esse comportamento está intimamente relacionado às propriedades intrínsecas dos minerais argilosos, presentes nessas composições.

Os resultados de resistência mecânica à flexão dos corpos-de-prova queimados, ao que indica, são inversamente proporcionais à absorção de água aparente, sendo esta última um indicativo da porosidade aberta das amostras. No entanto, a granilha 3 apresentou um resultado divergente, estando muito provavelmente relacionado às características da fase vítrea formada, resultante da adição de esmalte. Outra hipótese a ser considerada é a ausência de quartzo na referida composição, sendo que esta fase gera um efeito de compressão da fase vítrea pela diferença de coeficiente de expansão térmica, culminando no aumento da resistência mecânica.

A densidade aparente da granilha 2 apresentou-se bastante inferior às demais formulações. Este resultado é compatível com o nível de absorção de água mais elevado, devido a refratariedade da composição. A granilha 3 apresentou os maiores valores de densidade aparente, estando relacionada a presença de elevada quantidade de mulita, que tem maior densidade.

A perda ao fogo está relacionada a fração de material argiloso presente em cada caso, que por sua vez está relacionada à perda de água

de constituição e a queima de material orgânico, bem como à decomposição de carbonatos.

5.3.2 – Caracterização mineralógica

A Tabela 11, a seguir, mostra os resultados obtidos por difratometria de raios-X (DRX) das amostras de granilha após processo de queima. As amostras foram obtidas através da moagem e peneiramento das granilhas queimadas no ciclo de queima padrão (forno túnel, 1260°C, ciclo total de 36 horas, com 3 horas de patamar), posteriormente analisadas em um equipamento marca Phillips, modelo X'Pert. Os percentuais obtidos referem-se à quantidade relativa das fases cristalinas presentes nas amostras.

Tabela 11. Caracterização mineralógica das granilhas (percentual (%) em massa de fases cristalinas).

Fase cristalina	Granilhas	
	Granilha P	Granilha 1
Mulita	35,7%	35,2%
Quartzo	58,4%	13,4%
Cristobalita	5,5%	43,4%
Corundum	-	-
Cordierita	-	-
Silicato de Magnésio	-	-
Anortita	-	7,9%

Fase cristalina	Granilhas	
	Granilha 2	Granilha 3
Mulita	-	89,0%
Quartzo	5,0%	8,0%
Cristobalita	11,8%	-
Corundum	-	2,9%
Cordierita	71,1%	-
Silicato de Magnésio	12,0%	-
Anortita	-	-

As Figuras 18, 19, 20 e 21, a seguir, mostram os difratogramas obtidos.

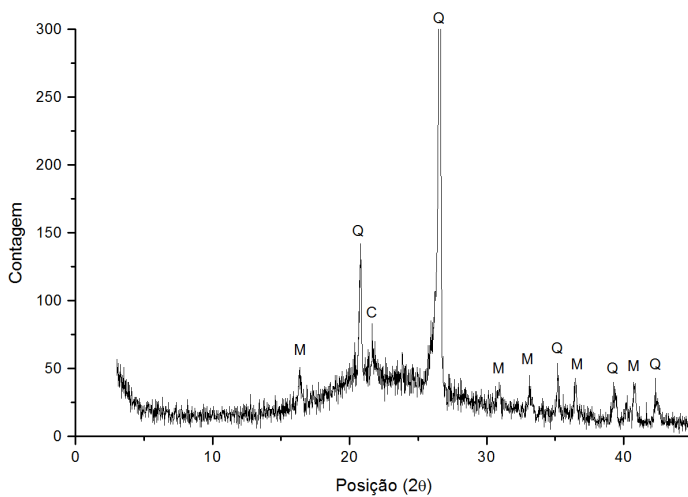


Figura 18. Difratoograma da amostra da Granilha P. (M: mulita, Q: Quartzo, C: Cristobalita).

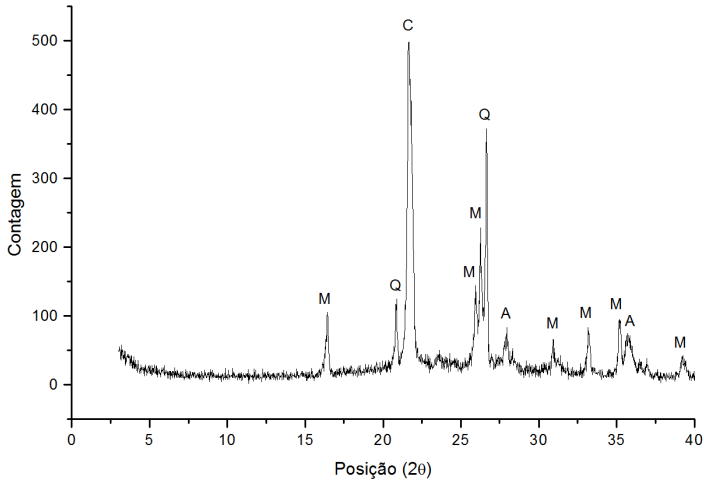


Figura 19. Difratoograma da amostra da Granilha 1. (M: mulita, Q: Quartzo, C: Cristobalita, A: Alumina).

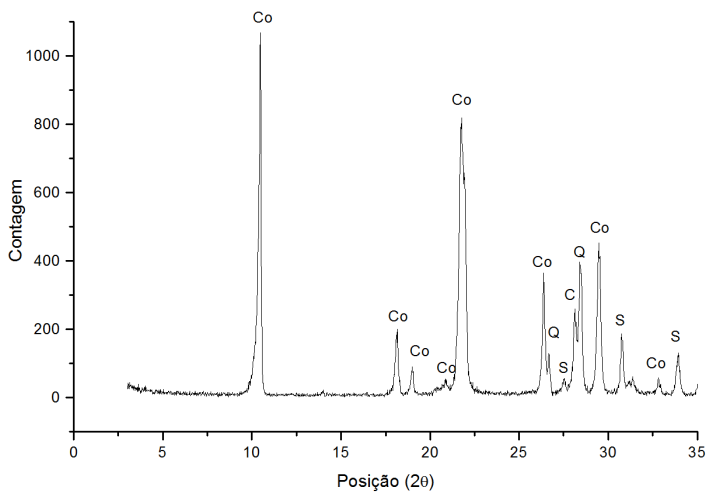


Figura 20. Difratoograma da amostra da Granilha 2. (Co: cordierita, Q: Quartzo, C: Cristobalita, S: Silicato de magnésio).

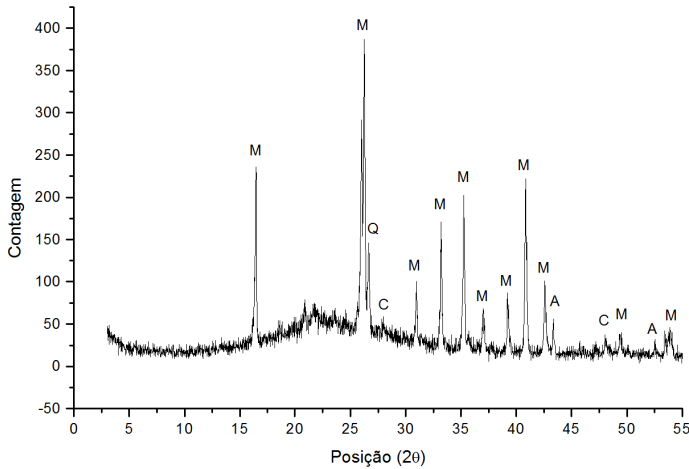


Figura 21. Difratograma da amostra da Granilha 3. (M: mulita, Q: Quartzo, C: Cristobalita, A: Alumina).

A granilha P, a qual consiste na formulação de porcelana elétrica idêntica a do corpo cerâmico do isolador, apresentou como fases cristalinas: mulita, quartzo e cristobalita. A mulita nesse caso é proveniente dos materiais argilosos (chamada de mulita primária) e eventualmente da cristalização e crescimento na fase líquida durante o processo de sinterização, nos pontos onde a proporção entre Al_2O_3 e SiO_2 é adequada (mulita secundária). O quartzo e a cristobalita são formas alotrópicas de SiO_2 , e são provenientes das matérias-primas, tais como a areia quartzosa que é fonte de quartzo, e também das argilas e feldspato. Ambas as fases se caracterizam por um elevado coeficiente de expansão térmica, quando comparados com as demais fases presentes na porcelana elétrica.

A Granilha 1 apresentou um elevado percentual de quartzo e cristobalita, fases cristalinas de elevado coeficiente de expansão térmica. No entanto, a não utilização de areia quartzosa na formulação indica que essas fases de sílica são provenientes das demais matérias-primas

utilizadas. Um estudo mais aprofundado da microestrutura em diferentes temperaturas de queima é necessário para identificar a origem das demais fases presentes. A mulita primária, assim como na porcelana, provém da transformação da caulinita no processo de queima. Um percentual representativo de anortita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{CaO}$) foi identificado (feldspato de cálcio), sendo esse gerado a partir da decomposição da calcita, mineral que fornece CaO. Acredita-se que o CaO durante o processo de queima promova o surgimento de uma fase líquida, a qual por conseguinte dá origem a anortita no processo de resfriamento. É interessante observar que, das fases presentes na granilha 1, apenas a mulita caracteriza-se por um menor coeficiente de expansão térmica. De fato, a granilha 1 apresenta 35% de mulita. Tendo em vista a provável formação de pequena quantidade de fase vítrea, e o elevado percentual de quartzo e cristobalita observados, é esperado que se obtenha um coeficiente de expansão térmica linear mais elevado para a Granilha 1.

A Granilha 2, que consiste em uma aproximação da composição química da cordierita, em termos de proporção entre as matérias-primas empregadas na sua formulação, apresentou um elevado percentual da referida fase cerâmica. As demais fases presentes (quartzo, cristobalita e silicato de magnésio) indicam que, para a referida composição química e temperatura de queima, a reação entre os materiais empregados não gerou um material cerâmico composto de cordierita em sua totalidade. No entanto, é possível que a referida granilha apresente um desempenho adequado, tendo em vista o percentual representativo de cordierita, fase de baixo coeficiente de expansão térmica.

A granilha 3 apresentou um elevado percentual de mulita, proveniente da decomposição da caulinita das argilas, e da mulita eletrofundida, sendo esta caracterizada pelo baixo coeficiente de expansão térmica. Acredita-se que as demais fases presentes (quartzo e corundum) são provenientes da mulita eletrofundida. Parte do quartzo detectado é proveniente dos materiais argilosos. O esmalte adicionado na formulação é responsável pela formação de uma fase líquida, que após o processo de resfriamento se torna uma fase vítrea, a qual não foi quantificada pelo DRX.

5.3.3 – Caracterização dilatométrica

A Tabela 12, a seguir, mostra os coeficientes de expansão térmica linear de cada composição de granilha avaliada neste trabalho. Os

intervalos de temperatura utilizados foram os mesmo apresentados na norma IEC-672 [2], para fins de padronização.

Tabela 12. Coeficientes de expansão térmica linear em função do intervalo de temperatura de medição para as granilhas estudadas neste trabalho.

Alfa	Granilha P	Granilha 1	Granilha 2	Granilha 3
30-100°C (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	5,51	7,61	4,15	4,17
30-300°C (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	5,62	8,61	4,38	4,31
30-600°C (10 ⁻⁶ K ⁻¹)	6,67	7,36	3,37	4,76

A análise dos resultados permite observar que as composições de granilha estudadas apresentaram diferenças significativas entre os coeficientes de expansão térmica linear. O coeficiente de expansão térmica, nesse caso, está intimamente relacionado às fases formadas no processo de queima para cada composição, bem como à fração volumétrica de cada uma dessas fases presentes na microestrutura. Dessa maneira, é importante avaliar os resultados obtidos com base nos resultados de DRX apresentados no item anterior.

A granilha P apresentou um coeficiente de expansão térmica linear superior ao obtido com corpos-de-prova de esmalte (ver Tabela 9), e idêntico ao do substrato, tendo em vista que se trata de uma mesma composição (porcelana elétrica C110 padrão). A granilha P apresenta elevados percentuais de quartzo e cristobalita, sendo que essas fases apresentam elevado coeficiente de expansão térmica linear. De fato, a presença de quartzo nas massas de porcelana elétrica está relacionada a resistência mecânica do corpo cerâmico, tendo em vista o efeito de compressão interna da matriz vítrea causada pela diferença entre os coeficientes de expansão térmica. No entanto, no caso da granilha a presença dessa fase gera um coeficiente de expansão térmica superior ao do esmalte, o que acaba por anular as tensões de compressão no esmalte [3].

Da observação dos resultados do DRX, nota-se que a granilha 1 apresentou elevados percentuais de quartzo e cristobalita, apesar da composição dessa granilha não contemplar a adição de fontes de

quartzo, como areia quartzosa. Dessa forma, acredita-se que o elevado percentual dessas fases esteja relacionado ao quartzo proveniente das argilas utilizadas, indicando que as partículas de quartzo não foram solubilizadas no processo de queima devido a formação de pouca fase líquida, ao contrário da granilha P, onde a adição de 28% de feldspato garante a formação de um elevado percentual de fase líquida, a qual reage e solubiliza parcialmente as partículas de quartzo, gerando um percentual mais elevado de fase vítrea, a qual não é quantificada pela DRX. O coeficiente de expansão térmica linear observado foi consideravelmente superior ao obtido com a granilha P, o que de fato é coerente, tendo em vista as fases cristalinas obtidas nas mesmas após o processo de queima e o percentual relativo dessas fases.

A granilha 2, a qual apresentou um percentual majoritário de cordierita, gerou coeficientes de expansão térmica linear bastante menores, quando comparados com a granilha P. Esse resultado é coerente, já que a fase cristalina cordierita apresenta coeficiente de expansão térmica bastante reduzido. O menor teor de quartzo livre verificado na granilha 2 contribui para o resultado obtido.

A granilha 3, apresentando um percentual elevado de mulita, conforme resultados de DRX apresentados anteriormente, gerou coeficientes de expansão térmica linear bastante menores, comparáveis aos resultados obtidos com a granilha 2, e substancialmente inferiores aos da granilha P. O baixo percentual de quartzo e cristobalita contribuem para os valores obtidos.

Em termos de propriedades das granilhas quando da aplicação em isoladores, é importante observar que os melhores resultados esperados, com base nos indicativos da literatura [3-31], em termos de acoplamento da camada de granilha com o substrato, são os com aplicação das granilhas 2 e 3. No entanto, a interação entre a camada de granilha e o substrato relaciona-se com a interação entre o esmalte e a granilha, ou seja, a formação de uma camada intermediária (interface) entre a partícula de granilha e o esmalte durante o processo de queima. Essa característica deve definir, a priori, o nível de adesão das partículas de granilha ao corpo cerâmico, bem como a interação entre a camada intermediária formada e o substrato cerâmico, além da rugosidade da superfície e travamento da estrutura do isolador.

5.3.4 – Rugosidade e aspecto visual

A Tabela 13, a seguir, mostra os valores dos parâmetros de rugosidade estudados em função da composição da granilha, obtidos após aplicação em substratos cerâmicos em forma de placa e queimados em ciclo de queima padrão, e análise subsequente em rugosímetro mecânico desenvolvido neste trabalho.

Tabela 13. Rugosidade média (Ra) e rugosidade total (Rt) em função da composição de granilha e características do substrato.

Granilha	Substrato esmaltado	Ra (μm)	Rt (μm)
P	Sim	630 ± 130	2700 ± 470
P	Não	710 ± 120	3090 ± 350
1	Sim	850 ± 130	2460 ± 300
1	Não	780 ± 120	2580 ± 540
2	Sim	480 ± 110	2400 ± 410
2	Não	590 ± 150	2790 ± 310
3	Sim	750 ± 170	3380 ± 590
3	Não	970 ± 170	3220 ± 520

Como as composições de granilha foram obtidas por peneiramento do material seco (a verde), utilizando-se as mesmas aberturas das peneiras, pode-se afirmar que existem dois fatores importantes no que se refere ao nível de rugosidade obtido: a retração de queima e a taxa de dissolução da granilha no esmalte no processo de queima.

Em análise dos dados obtidos nas placas com aplicação da granilha P, fica evidente que a presença de uma camada de esmalte cerâmico entre o substrato e a camada de granilha gerou uma superfície cuja rugosidade média apresentou um valor inferior, quando comparado ao corpo-de-prova não esmaltado. Esse resultado possivelmente está

relacionado fundamentalmente à dissolução ou imersão parcial da granilha no esmalte no processo de queima.

Levando-se em consideração a relação entre a taxa de dissolução da granilha no esmalte durante o processo de queima e a rugosidade final obtida, e a utilização de corpos-de-prova e ciclo de queima padrão iguais para todas as amostras, é possível afirmar que as diferenças observadas entre as formulações de granilha para corpos-de-prova esmaltados e não esmaltados é indicativo dessa propriedade, para o caso específico. Sendo assim, algumas considerações podem ser feitas a respeito dos resultados obtidos:

- Nos corpos-de-prova com aplicação de esmalte, as granilhas apresentaram uma diminuição dos valores de rugosidade, com exceção da granilha 1. De fato, a composição em questão apresentou uma fraca adesão ao substrato (Ver Figura 22(d)) quando da ausência de esmalte, o que pode indicar baixa taxa de dissolução no esmalte no processo de queima. A falta de adesão resultou em queda de parte das partículas da amostra após queima, o que por consequência gerou um valor de rugosidade média inferior, em relação às amostras com substrato esmaltado. No entanto, quando da presença de esmalte no substrato, obteve-se uma melhor adesão das partículas (Figura 22(c)), culminando em valores mais elevados de rugosidade média.
- A granilha 2 apresentou os menores valores de rugosidade média, tanto nos corpos-de-prova com esmaltes como nos sem esmaltes. Os baixos valores de rugosidade obtidos nos corpos-de-prova sem esmaltes relaciona-se com a falta de aderência obtida (ver Figura 22(f)), semelhantemente aos resultados obtido com a granilha 1. No entanto, diferentemente do resultado obtido com a granilha 1 e corpos-de-prova esmaltados, a presença de esmalte gerou um decréscimo representativo na rugosidade média (18,64%), indicando uma elevada taxa de dissolução das partículas no processo de queima (Figura 22(e)).

- A granilha P (Figuras 22(a) e 22(b)) e granilha 3 (Figuras 22(g) e 22(h)) apresentaram boa adesão das partículas mesmo na ausência de esmalte nos corpos-de-prova. O decréscimo percentual na rugosidade média quando da presença de esmalte para a granilha P foi de 11,27%, enquanto que para a granilha 3 o decréscimo foi de 22,08%, que pode ser considerado elevado.

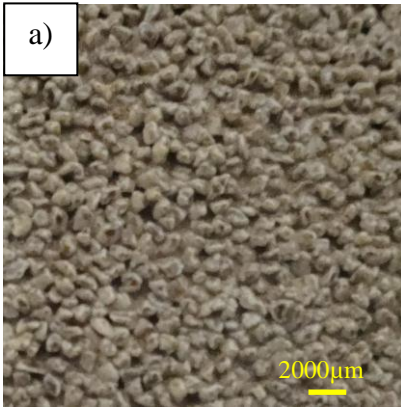


Figura 22(a) Fotografia de placa cerâmica com aplicação de granilha P em substrato esmaltado, após processo de queima.

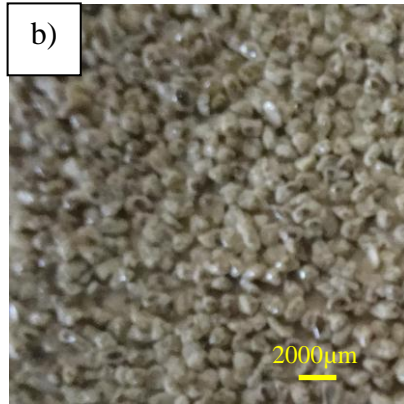


Figura 22(b) Fotografia de placa cerâmica com aplicação de granilha P em substrato não esmaltado, após processo de queima.

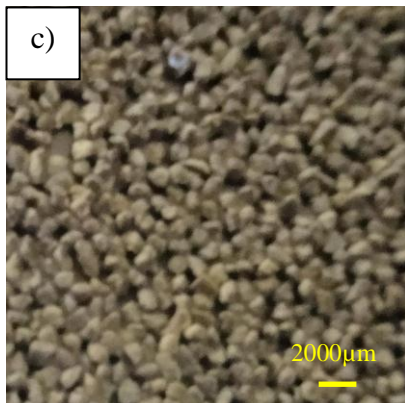


Figura 22(c) Fotografia de placa cerâmica com aplicação de granilha 1 em substrato esmaltado, após processo de queima.

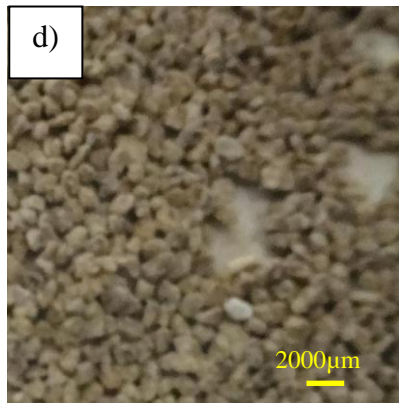


Figura 22(d) Fotografia de placa cerâmica com aplicação de granilha 1 em substrato não esmaltado, após processo de queima.

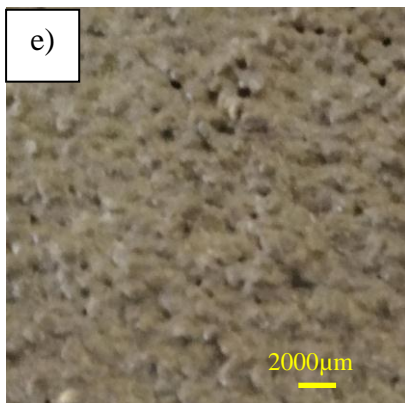


Figura 22(e) Fotografia de placa cerâmica com aplicação de granilha 2 em substrato esmaltado, após processo de queima.

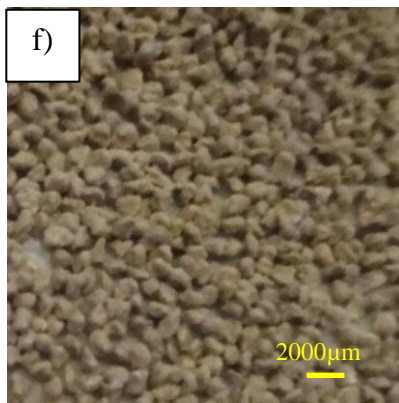


Figura 22(f) Fotografia de placa cerâmica com aplicação de granilha 2 em substrato não esmaltado, após processo de queima.

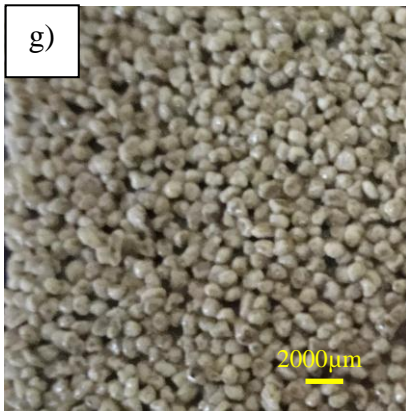


Figura 22(g) Fotografia de placa cerâmica com aplicação de granilha 3 em substrato esmaltado, após processo de queima.

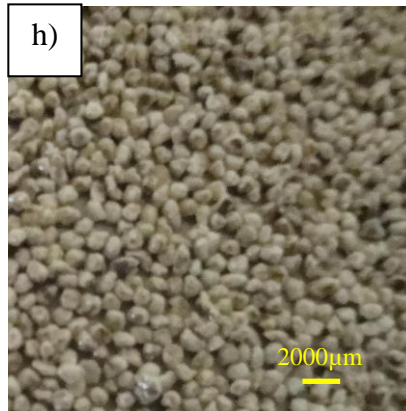


Figura 22(h) Fotografia de placa cerâmica com aplicação de granilha 3 em substrato não esmaltado, após processo de queima.

Em termos de desempenho do isolador montado, ao que indica, existem duas propriedades fundamentais relacionadas à presença da granilha na superfície do corpo-cerâmico: a capacidade de travamento mecânico da granilha com o cimento para a transferência de tensões mecânicas impostas, e a resistência mecânica do corpo cerâmico, onde se incluem as tensões residuais obtidas pela indução de tensões compressivas no esmalte. Dessa forma, a taxa de dissolução e as características dilatométricas das granilhas apresentam relação direta com as propriedades citadas.

5.3.5 – Resistência mecânica

Para a avaliação da influência do tipo de granilha e características da camada formada após o processo de queima, os corpos-de-prova foram preparados conforme item 4.3.7, sendo ensaiados em uma máquina de ensaios mecânicos.

A Figura 23, a seguir, mostram os resultados correspondentes a metodologia utilizada, considerando-se média e o desvio padrão das medidas para sete corpos-de-prova para cada condição ensaiada.

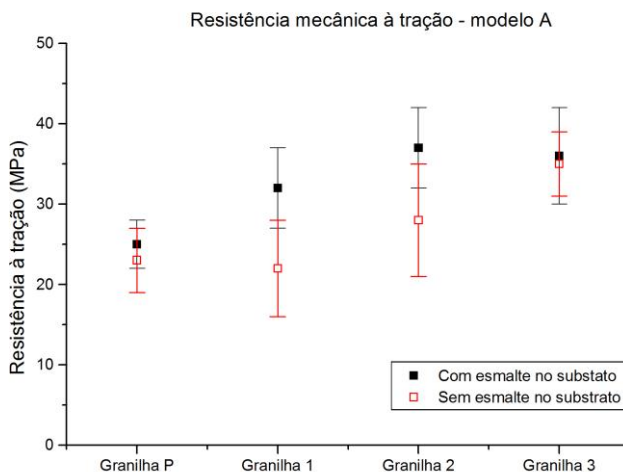


Figura 23. Resistência mecânica à tração de corpos-de-prova modelo A

Da análise dos resultados obtidos, pode-se concluir:

- Para os corpos-de-prova com substrato esmaltado, observa-se que todas as composições alternativas obtiveram melhor desempenho mecânico em relação ao padrão.
- A *granilha 1*, apesar do coeficiente de dilatação mais elevado em relação ao substrato e esmalte, gerou um resultado superior ao da *granilha P*. Esse fato pode estar relacionado à uma menor taxa de dissolução da granilha no esmalte em relação à granilha P, o que pôde ser comprovado pela análise da rugosidade (ver item 5.4.4). De fato, uma menor taxa de dissolução da granilha no esmalte implica na obtenção de uma camada de esmalte com propriedades semelhantes àquela que se observa quando da não aplicação de granilha, mantendo-se assim as características de compressão do conjunto. É importante observar que a *granilha*

1 apresenta uma retração de queima equivalente a da *granilha P* (ou seja, tamanho dos grânulos aplicados semelhantes).

- Ainda em relação aos corpos-de-prova com substrato esmaltado, a *granilha 2* e *granilha 3* apresentaram os melhores resultados de resistência mecânica à tração, o que provavelmente está relacionado à dissolução parcial das granilhas no esmalte, visto que as mesmas apresentaram baixos coeficientes de expansão térmica, sendo essa condição favorável ao desenvolvimento das tensões de compressão superficial nessa região, de acordo com as indicações da literatura [3-31]. Essa dissolução não prejudicou o acoplamento do esmalte com o substrato.
- Para os corpos-de-prova sem esmalte no substrato, observa-se que os melhores resultados foram obtidos com a utilização da *granilha 2* e *granilha 3*, em relação à *granilha P*. A *granilha P* e a *granilha 1* apresentaram desempenho semelhante em termos de resistência mecânica à tração média. Esse fato pode estar relacionado a menor dissolução da granilha padrão pela presença de menor quantidade de esmalte (somente o esmalte proveniente da aplicação da cola padrão). Dessa forma, acredita-se que as características de acoplamento foram menos prejudicadas em relação aos corpos-de-prova esmaltados.
- Em uma observação comparativa entre o resultado de corpos-de-prova com substrato esmaltado e sem esmalte com aplicação da *granilha P*, verifica-se que o incremento da resistência mecânica é bastante menor. Esse fato indica que a *granilha P* interfere de forma a inibir o incremento da resistência mecânica com a presença de maior quantidade de esmalte, o qual seria esperado pelo mecanismo de geração de tensões de compressão na superfície, o qual é obtido pela diferença de coeficientes de expansão térmica entre a camada em questão e o substrato cerâmico. Por outro lado, para as demais composições de granilha estudadas, observa-se um incremento no desempenho mecânico com a presença de esmalte no substrato, seja pela diluição das partículas das granilhas com coeficiente de dilatação mais baixos (*granilha 2* e *granilha 3*), ou pela maior taxa de dissolução das partículas no esmalte (*granilha 1*). Acredita-se que o resultado obtido nos corpos-de-prova com aplicação da *granilha 1* esteja relacionado a essa menor

reatividade, tendo como consequência a manutenção das características de acoplamento do esmalte com o substrato.

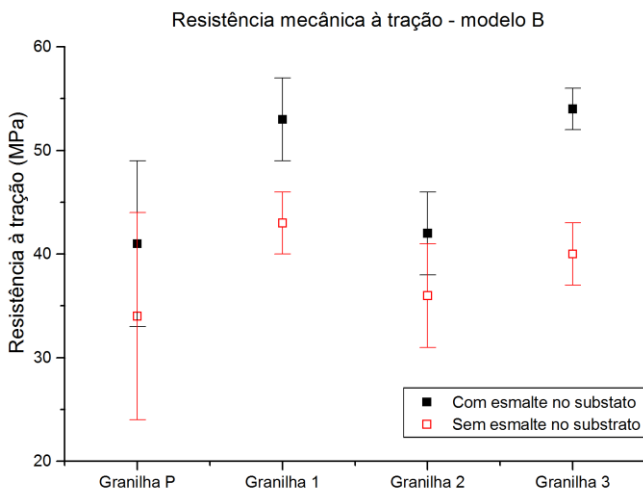


Figura 24. Resistência mecânica à tração de corpos-de-prova modelo B, com substrato não esmaltado.

- Em relação à adesão com o substrato, verificou-se que a *granilha 2* é inadequada após queima quando da ausência de esmalte no substrato. A queda de partículas gerada pela falta de adesão gera baixa rugosidade média e o surgimento de regiões com ausência de granilha. No entanto, na presença de esmalte no substrato, a dissolução das partículas mostrou-se bastante pronunciada (ver Figura 22), gerando baixa rugosidade média (conforme Tabela 13). Essas características, ao que indica, não tiveram efeito negativo sobre os corpos-de-prova cônicos, tendo em vista que as características geométricas dos corpos-de-prova, nesse caso, proporcionam um melhor travamento, com menor dependência da rugosidade superficial. No entanto, para os corpos-de-prova retos (modelo B), onde o mecanismo de

travamento pela granilha é mais exigido, o desempenho da *granilha 2* apresentou-se inferior aos resultados obtidos com a *granilha 1* e *granilha 3*, e equivalente a *granilha P*.

- A *granilha 1*, em função da menor dissolução no esmalte e conseqüente maior rugosidade média, conforme exposto anteriormente, apresentou um desempenho adequado para corpos-de-prova retos (modelo B), tendo em vista a maior exigência das características relacionadas a rugosidade para essa geometria.
- A *granilha 3*, apesar de ter apresentado um comportamento mecânico equivalente à *granilha 1* para os corpos-de-prova retos (modelo B) com esmalte no substrato, se destacou (delaminação) da porcelana do conjunto, não rompendo a porcelana, sendo essa uma situação atípica (Figuras 26(a) e 26(b)). As Figuras 25(a) e 25(b) apresenta um corpo-de-prova com granilha P após ensaio de tração, evidenciando a ruptura da porcelana. A delaminação observada indica que a região com *granilha 3* deve apresentar um nível de compressão mais elevado, ao que indica, em função da dissolução parcial no esmalte e ao baixo coeficiente de expansão térmica mensurado nos corpos-de-prova da referida composição de granilha. O desempenho mecânico do conjunto em termos de sua resistência à tração, para corpos-de-prova retos (modelo B), possa ser incrementado com a utilização de *granilha 3* com tamanho de partícula inicial maior, gerando uma rugosidade mais elevada, propiciando um travamento mais eficiente. Dessa forma, existe a possibilidade de que a falha poderá ocorrer pela ruptura da porcelana, em tensões mais elevadas que a observada na condição ensaiada.
- Para os corpos-de-prova retos (modelo B) sem esmalte no substrato, observa-se que os resultados seguem a mesma tendência em relação aos obtidos com corpo-de-prova com substrato esmaltado. No entanto, em níveis de tensão de ruptura menores. Este comportamento provavelmente se relaciona a uma menor dissolução das granilhas quando da presença de menores quantidades de esmalte no substrato. No entanto, o desempenho mecânico dos corpos-de-prova com *granilha P* apresentaram-se, em média, também nesse caso, inferiores às demais composições estudadas. Esse comportamento pode ser atribuído às características de alta dissolução da granilha no

esmalte no processo de queima, bem como, nesse caso, pelo coeficiente de expansão térmica linear superior ao do esmalte, reduzindo o efeito de compressão do esmalte.

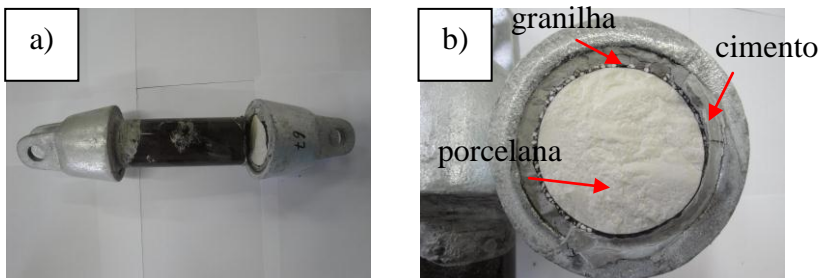


Figura 25(a) Fotografia de corpo-de-prova submetido a ensaio de tração contendo granilha P com substrato esmaltado.

Figura 25(b) Fotografia da seção reta da fratura do corpo-de-prova apresentado na Figura 25(a), onde se observa que a superfície de fratura corresponde àquela região contendo a granilha.



Figura 26(a) Fotografia de corpo-de-prova submetido a ensaio de tração contendo granilha 3 com substrato esmaltado.

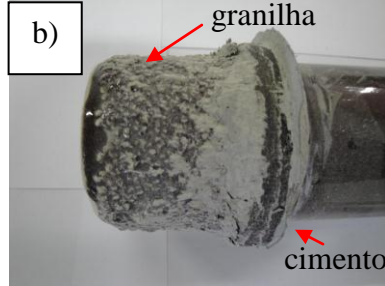


Figura 26(b) Fotografia de corpo-de-prova submetido a ensaio de tração contendo granilha 3 com substrato esmaltado, evidenciando a ausência de fratura no corpo cerâmico.

6 – CONCLUSÕES

A caracterização física e química das matérias-primas disponíveis para a fabricação das granilhas foi realizada, verificando-se a correlação entre as propriedades mensuradas, confrontando as principais características descritas na literatura. Constatou-se que as matérias-primas argilosas diferem entre si principalmente pelo nível de contaminação por quartzo e distribuição de tamanhos de partículas, parâmetros que influenciam as demais propriedades físicas avaliadas.

Foram preparadas quatro composições distintas de granilhas:

- *Granilha P*, a qual consistiu em uma formulação de porcelana elétrica tradicional idêntica àquela utilizada na fabricação do corpo do isolador, cuja composição mineralógica por DRX, após queima, apresentou as fases cristalinas quartzo, cristobalita e mulita. O coeficiente de expansão térmica linear mensurado foi de $66,72 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-7}$ (30-600 $^{\circ}\text{C}$). Esta composição é utilizada atualmente na empresa;
- *Granilha 1*, que consistiu em uma formulação contendo 95% de materiais argilosos e 5% de calcita apresentou, após processo de queima, as fases cristalinas mulita, quartzo, cristobalita e anortita, sendo a anortita proveniente da reação da calcita com as demais matérias-primas. O coeficiente de expansão térmica linear mensurado foi de $73,62 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-7}$ (30-600 $^{\circ}\text{C}$), o qual apresentou-se bastante elevado e inadequado para a aplicação, de acordo com indicações da literatura [3-31]. O resultado obtido provavelmente está relacionado ao elevado percentual de cristobalita encontrado;
- *Granilha 2*, cuja formulação consistiu em uma aproximação da composição da cordierita. Após processo de queima, foi quantificado, em DRX, 71% de cordierita, além de quartzo, cristobalita e silicato de magnésio, o que provavelmente se relaciona com uma reação incompleta das matérias-primas no processo de queima padrão. O coeficiente de expansão térmica linear mensurado foi de $33,72 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1} \times 10^{-7}$ (30-600 $^{\circ}\text{C}$),

consideravelmente menor que o do substrato e esmaltes cerâmicos (vidrados) (Tabela 9). A configuração obtida está de acordo com o indicado na literatura [3-31];

- *Granilha 3*, composta de mulita eletrofundida, argilas e esmalte cerâmico, obtendo-se, após processo de queima, um material contendo 89% de mulita, quartzo proveniente provavelmente das matérias-primas argilosas, e corundum, proveniente da mulita eletrofundida. O coeficiente de expansão térmica linear mensurado foi de $47,61 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times 10^{-7}$ (30-600 $^\circ\text{C}$), condição adequada, de acordo com a literatura [3-31];

O processamento selecionado foi análogo ao processo tradicional, conforme procedimento interno da empresa Porcelanas Industriais Germer S/A. Nesse processo, as principais variáveis foram identificadas e controladas, sendo possível avaliar principalmente os fatores pré-determinados.

As composições de granilha foram aplicadas em corpos-de-prova em forma de placas de porcelana, sendo parte destes esmaltados antes de receberem a camada de cola e granilha. Como resultado, verifica-se que a interação da granilha com esmalte (dissolução) no processo de queima é determinante nas características de rugosidade e aspecto visual após processo de queima. Obteve-se maiores níveis de rugosidade para os corpos-de-prova contendo a *granilha 3*, ao passo que os corpos-de-prova contendo *granilha 2* apresentaram baixa rugosidade quando na presença de esmalte no substrato, indicando elevada dissolução aparente. A determinação das causas das diferenças observadas implicará na caracterização mais detalhada da camada formada.

As granilhas foram aplicadas em duas geometrias distintas de corpos-de-prova cilíndricos (modelos A e B, Figuras 9 e 10), em condições análogas às aplicadas nas placas cerâmicas, sendo que após a queima foram cimentadas ferragens as extremidades, submetendo-se os mesmos a ensaio de tração uniaxial. Neste ensaio verificou-se que, para os corpos-de-prova onde o substrato havia sido previamente esmaltado, o módulo de ruptura médio foi superior para as três composições alternativas quando comparadas a corpos-de-prova com granilha tradicional. No entanto, para corpos-de-prova sem esmalte no substrato, as diferenças em termos de módulo de ruptura médio foram menos pronunciadas, indicando que a interação da granilha com o esmalte apresenta influência no comportamento mecânico da estrutura montada. Para as *granilhas 2* e *granilha 3*, essa diferença pode ser atribuída ao

baixo coeficiente de expansão térmica obtido para estas granilhas, o que indica que o nível das tensões de compressão no esmalte foram maiores em comparação à granilha tradicional. Para a *granilha 1*, o resultado obtido pode estar relacionado com a menor interação da granilha com o esmalte, o que é evidenciado pelas alterações diferenciadas na rugosidade aparente e o aspecto visual com e sem a presença de esmalte no substrato. A menor interação, conseqüentemente, propicia um aumento dos níveis de compressão no esmalte, quando comparados à *granilha P*.

Em termos dos níveis do módulo de ruptura médio à tração, é importante observar que os melhores resultados foram obtidos com a *granilha 3*, apresentando, em média, um incremento de 51% para corpos-de-prova modelo A e 25% para corpos-de-prova modelo B. Estes resultados se relacionam a alguns fatores, dentre eles: o baixo coeficiente de expansão térmica da granilha; a presença de esmalte na composição da granilha, que contribui para a obtenção de um composto granilha/esmalte mais homogêneo e o nível de rugosidade mais elevado, propiciando um melhor travamento da estrutura.

Outra observação relevante diz respeito à ausência de ruptura do corpo-de-prova modelo B contendo *granilha 3* e substrato esmaltado, cuja delaminação ocorreu a tensões 18% mais elevadas do que as de ruptura dos corpos-de-prova contendo *granilha P*. Este fato indica que a resistência à tração, nesse caso, supera a resistência da junção com o cimento, o que demonstra a possibilidade de melhorias no âmbito da resistência específica da junção entre o corpo cerâmico e a ferragem. Dessa forma, acredita-se que o incremento na resistência à tração possa ser equivalente aos resultados obtidos com os corpos-de-prova modelo A.

7 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em função dos resultados positivos verificados para algumas das composições estudadas, sobretudo quando comparadas à condição padrão e de aplicação atual no processo de fabricação atual, torna-se interessante sugerir a continuidade do trabalho, incluindo os seguintes pontos:

- Uma análise da microestrutura da camada contendo granilha em microscópio eletrônico de varredura (MEV) pode ser interessante no que diz respeito à avaliação da interação das granilhas com o esmalte, podendo incluir uma análise química semi-quantitativa através de micro-sonda EDS das partículas de granilha e seu entorno, determinando-se um possível gradiente de composição química. Dessa forma tornar-se-ia possível a comparação dos perfis de dissolução das composições estudadas. Por fim, os dados obtidos poderiam ser confrontados com os resultados de caracterização de perfil de rugosidade da superfície, bem como as características mecânicas obtidas.
- A aplicação das melhores condições obtidas em isoladores normalizados pode ser realizada, observando o desempenho mecânico e o critério de falha do isolador no ensaio.
- Um estudo das granilhas desenvolvidas em corpos-de-prova e isoladores confeccionados em massa aluminosa (IEC 672 C120 e C130) podem ser realizados. Acredita-se que, para esses casos, o incremento nas propriedades mecânicas pode ser inclusive mais relevante, tendo em vista os limites de resistência normalizados substancialmente mais elevados, o que implica em um controle de qualidade mais rígido quanto à presença de defeitos que comprometem o desempenho mecânico dos isoladores.
- Tendo sido observado que para os corpos-de-prova modelo B contendo *granilha 3* e esmalte no substrato o critério de falha foi a ruptura do cimento, sendo este um resultado atípico ao observado nas demais composições analisadas, torna-se interessante avaliar a possibilidade de incremento da resistência específica do cimento Portland. De acordo com a literatura, um incremento na resistência do cimento pode ser obtido pela

substituição parcial por caulim calcinado [40] ou areia de sílica [41].

8 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Disponível em: <www.epe.gov.br>. Acesso em: 23 agosto 2010.
- [2] INTERNATIONAL STANDARD. **Ceramic and Glass Insulating Materials**. . IEC 60672-3. 1997. 25 p.
- [3] General Electric Company. **Locke Insulator Catalog and Engineering Handbook No. 55**. 1955
- [4] RICHERSON, David W. **Modern ceramic engineering: properties, processing, and use in design**. 2.ed. New York: M. Dekker, 1992. 860p.
- [5] BARBA, A. Feliu, et al. **Materias-primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas**. 2 ed. Instituto de Tecnología Cerámica, Castellón, 2002. 292p.
- [6] HÖLAND, W.; BEALL, G. Glass-Ceramic Technology. **The American Ceramic Society**, Westerville, Ohio, 2002.
- [7] LIEBERMANN, J. S. Bauxite Porcelain: A New High-Tech Product For High-Voltage Insulation, **American Ceramic Society Bulletin**, Vol. 812, n.2. p.33-38, 2002.
- [8] LIEBERMANN, J. S. Avoiding Quartz in Alumina Porcelain for High-Voltage Insulators: Part I. **American Ceramic Society Bulletin**, Vol. 80., n.6. p.37-42, 2001.
- [9] LIEBERMANN, J. S. Avoiding Quartz in Alumina Porcelain for High-Voltage Insulators: Part II. **American Ceramic Society Bulletin**, 80., n.7. p.43-48, 2001.
- [10] BONETTI, A. N. **Desenvolvimento de massas cerâmicas para fabricação de isoladores elétricos**. 2008. 90p. Dissertação (Mestrado

em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.

[11] BONETTI, A. N.; TOMELIN, J.C.; ALARCON, O.E.; OLIVEIRA, A.P.N. ; HOTZA, D. Desenvolvimento de porcelana quartzosa para isoladores elétricos de alta tensão. **Exacta**. (São Paulo. Impresso), v. 7, p. 187-194, 2009.

[12] BONETTI, A. N.; TOMELIN, J. C.; ALARCON, O. E.; OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D. Desenvolvimento e caracterização de massa porcelânica quartzosa tipo IEC 672C-110 para isoladores elétricos de alta tensão. In: **51º Congresso Brasileiro de Cerâmica**, Salvador. (CD) ABC, 2007. v. 1. p. 1-12.

[13] CHINELATTO, A. L.; SOUZA, D. P. F. de. Porcelanas elétricas aluminosas. Parte I: Revisão da Literatura. **Cerâmica**. (São Paulo. Impresso), São Paulo, v. 50, n. 313, p. 62-68, 2004.

[14] CHINELATTO, A. L.; SOUZA, D. P. F. de. Porcelanas elétricas aluminosas. Parte II: Desenvolvimento da microestrutura e sua influência no módulo de ruptura. **Cerâmica**. (São Paulo. Impresso), São Paulo, v. 50, n. 313, p. 62-68, 2004.

[15] SANTOS, Persio de Souza; SANTOS, Helena Souza. **Ciência e tecnologia de argilas**. 2. ed., rev. e ampl. São Paulo: E. Blucher, 1992. 3v. 1089p.

[16] FERNÁNDEZ NAVARRO, J.M. **El vidrio: Constitución, fabricación y propiedades**. 2.ed. Madrid, Espanha: C.S.I.C., 1985. p.82-96

[17] ELFUSA. Disponível em: < <http://www.elfusa.com.br>>. Acesso em: 03 agosto 2010.

[18] TAYLOR J.R.; BULL, A.C. **Ceramic Glaze Technology**. Oxford, U.K.: Pergamon, 1986. p.75-96.

[19] SEDMIDUBSKY, J. **L.Industrie Céramique**. [S.I:s.n.], 1979. 595-597.

- [20] CAMARGO, C. C. de B. **Transmissão de Energia Elétrica: Aspectos fundamentais**. 3 ed. Florianópolis, SC: Editora da UFSC, 2006. p. 80-81.
- [21] IQBAL, Y.; LEE, W. E. Microstructural Evolution in Triaxial Porcelain. **Journal of American Ceramic Society**, Vol. 83, n. 12, p. 3121-27.2000.
- [22] BRAGANÇA, S. R.; BERGMANN, C. P. Aspectos teóricos e práticos sobre a resistência mecânica de porcelanas. **Cerâmica**. v.50, p.145-155, 2004.
- [23] INGLIS, C. E.. **Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners**. Trans. Int. Nav. Arch. 55, 219.1913.
- [24] FONTANELLA, C. A. **Recobrimentos hidrofóbicos para uso em isoladores porcelânicos de alta tensão**. 2007, 113p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC.
- [25] FONTANELLA, C. A.; OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D. Recobrimentos poliméricos hidrofóbicos sobre isoladores elétricos de porcelana. **Matéria (UFRJ)**, v. 13, p. 624-635, 2008.
- [26] AMORÓS, J. L., et al. Acordo Esmalte-Suporte (II) Expansão Térmica de Suportes e Esmaltes Cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, 02 (01/02), Janeiro/Abril, 1997, 8-16.
- [27] DURAN, Alicia, et. al. **Introducción a los Esmaltes Cerâmicos**. Castellón: CYTED, 2000. 224p.
- [28] DALIAN DAIWA. Disponível em: <<http://www.dldkc.com>>. Acesso em: 10 fevereiro 2009.
- [29] MITSU. Disponível em: <<http://www.mitsacy.com>> Acesso em: 10 fevereiro 2009.
- [30] TAYLOR, H.F.W. **Chemistry of Cements**. London: Academic Press Inc. Ltd, 1964. p. 4-5.

- [31] LIEBERMANN, J. S. The Crucial Impact of Gritting on the Product Stability of Strength-Stressed High-Voltage Insulators. **Interceram**, Vol 57, 2008.
- [32] LIEBERMANN, J. S. Microstructure Properties and Product Quality of Strength-Stressed High-Voltage Insulators. **American Ceramic Society Bulletin**, 82 [1], 39-46. 2003
- [33] SILVA, F.A. Preparação e Caracterização de Membranas Cerâmicas de Cordierita. **Cerâmica**, 52, 2006, p. 276-282.
- [34] ASM INTERNATIONAL. **Metals Handbook**. Surface Engineering. Volume 5, 1994.
- [35] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Placas cerâmicas para revestimentos – Especificação e métodos de ensaios – Anexo B**. NBR 13818/97. 1997.
- [36] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Placas cerâmicas para revestimentos – Especificação e métodos de ensaios – Anexo S**. NBR 13818/97. 1997.
- [37] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Solo – Análise Granulométrica**. NBR 7181. 1984. 13p.
- [38] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica**. NBR 6508. 1984. 8p.
- [39] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Isoladores para linhas aéreas com tensões acima de 1 000 V - Isoladores de porcelana ou vidro para sistemas de corrente alternada**. NBR 5032. 2004. 59p.
- [40] OLIVEIRA, M. P. de, et al. Estudo do Caulim Calcinado Como Material de Substituição Parcial do Cimento Portland. **NOCMAT**, 2004, p. 378-385.
- [41] NGK. Disponível em: < <http://www.ngk-locke.com/pdf/station1.pdf>>. Acesso em: 03 agosto 2010.