

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE – UNESC
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS – PPGCEM**

RAFAELA TOPANOTTI MELLER

**INFLUÊNCIA DO ESMALTOBE NA PLANARIDADE DE PLACAS DE
PORCELANATO ESMALTADO ACETINADO**

CRICIÚMA

2022

RAFAELA TOPANOTTI MELLER

**INFLUÊNCIA DO ESMALTOBE NA PLANARIDADE DE PLACAS DE
PORCELANATO ESMALTADO ACETINADO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientadora: Profa. Dra. Sabrina Arcaro

CRICIÚMA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

M525i Meller, Rafaela Topanotti.

Influência do esmalto na planaridade de
placas de porcelanato esmaltado acetinado /
Rafaela Topanotti Meller. - 2022.

96 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do
Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-
Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais,
Criciúma, 2022.

Orientação: Sabrina Arcaro.

1. Revestimento cerâmico. 2. Esmaltado. 3.
Porcelanato esmaltado - Qualidade. I. Título.

CDD 23. ed. 620.1404

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

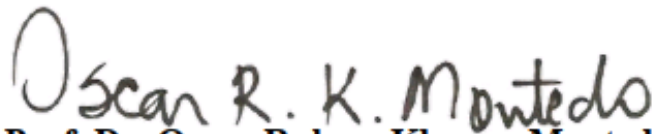
Rafaela Topanotti Meller

Influência do esmalto na planaridade de placas de porcelanato esmaltado acetinado.

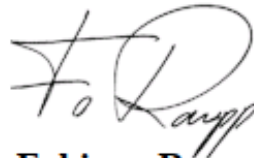
Esta Dissertação foi julgada adequada à obtenção do grau de Mestre(a) em Ciência e Engenharia de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PPGCEM (Área de concentração: Tecnologia de Materiais) da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC.

Criciúma, SC, 1º de setembro de 2022.

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Oscar Rubem Klegues Montedo
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. Fabiano Raupp Pereira
Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC



Prof. Dr. João Batista Rodrigues Neto
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC

Para todos aqueles que suportam minhas
oscilações de humor.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela criação de tudo e por nos conceder a inteligência.

Aos meus pais, Janice e Volnei, por sempre priorizarem e incentivarem minha educação.

Ao meu companheiro Emilio pela paciência em todos os momentos.

À empresa Eliane S/A Revestimentos Cerâmicos pela parceria no desenvolvimento deste projeto.

Ao Fundo de Apoio à Manutenção e ao Desenvolvimento da Educação Superior – FUMDES que por meio do Programa de Bolsas Universitárias de Santa Catarina – UNIEDU propiciou apoio financeiro em parte do desenvolvimento do projeto.

Aos gestores do setor onde trabalho, Sérgio Pereira Ruzza, Angela Waterkemper Vieira e Caetano Cesar de Pelegrin, pelo incentivo e concessões necessárias para a realização do trabalho.

À minha orientadora Sabrina Arcaro, por todos os esclarecimentos e paciência.

Aos funcionários dos laboratórios da Eliane, em especial Aline Demarch, Edesio Guizoni, Martins da Silveira Vicente, Murilo Clausen Vieira, Marcelo de Oliveira Pinto, Leandro Bes de Souza, Jean Morona De March, Fabiana Silvestri Correa da Rosa, e a ex-funcionária Maria Laura Mariot, pelo apoio na confecção das peças de análise, análise de dados e ensaios relacionados.

À Djeisa Pasini, Bruna Rech Dagostim e Angélica Marcilio de Souza pela parceria constante nas disciplinas cursadas.

Aos professores do PPGCEM pelo conhecimento transmitido.

Aos membros da banca avaliadora.

Muito obrigada a todos.

A maior dor do vento é não ser colorido.

Mário Quintana

RESUMO

Um dos principais parâmetros de qualidade de uma placa de revestimento cerâmico é a planaridade. Os desvios de planaridade apresentam-se em diversas formas e são influenciados pela composição do substrato e das camadas de recobrimento. O esmalto é uma camada de recobrimento relativamente nova em uso na indústria e se refere a engobes que possuem maiores quantidades de frita em sua composição, derivando em um composto com características entre o engobe e o esmalte. Por ser recente, ainda não há clareza sobre como as variáveis do processo afetam a planaridade de placas produzidas com esmalto. O objetivo deste trabalho é avaliar a influência da camada de aplicação e retração linear do esmalto na planaridade de placas de porcelanato esmaltado com acabamento acetinado. Após a caracterização dos insumos de fabricação, foram comparadas duas formas de produção de porcelanatos esmaltados com acabamento acetinado, uma com a utilização de engobe e esmalte e outra com o esmalto. Comparando-se com as peças produzidas com esmalte, a condição que utiliza esmalto apresentou melhor desempenho em relação à deformação. Um planejamento experimental fatorial 2^2 foi realizado com retração de queima e camada do esmalto como fatores. Neste caso, quanto menor o brilho da superfície, menor é a percepção da deformação da planaridade. De acordo com os resultados obtidos foi possível obter peças com nível de deformação menor do que a atual condição de produção com o esmalto, representada pela prova P5, constatadas pelo braço de medição por coordenadas (BMC), mas isto não pode ser evidenciado na análise visual devido ao baixo brilho da superfície, característica que possui maior influência na percepção da deformação das peças. A retração foi o fator que apresentou maior influência significativa nos resultados da análise de variância (ANOVA) da fleximetria, brilho e percentual de deformação por meio do tratamento das imagens obtidas por BMC. As técnicas com maior sensibilidade para detecção de desvios de planaridade são braço de medição por coordenadas e fleximetria e a associação com o resultado de brilho é ideal para se garantir uma boa análise visual.

Palavras-chaves: Esmalto, planaridade, porcelanato esmaltado.

ABSTRACT

One of the main quality parameters of a ceramic tile is flatness. Deviations from planarity can be presented in different configurations and are influenced by the composition of the substrate and the top layers. Esmaltobe is a relatively new top layer in use in the industry and refers to engobes that have greater amounts of frit in their composition, resulting in a compound with characteristics between engobe and enamel. As it is recent, there is still no clarity about how the process variables affect the planarity of ceramic tiles produced with esmaltobe. The objective of this work is to evaluate the influence of the application layer and linear shrinkage of the esmaltobe on the flatness of glazed porcelain tiles with a satin finish. After characterizing the manufacturing inputs, two ways of producing glazed porcelain tiles with a satin finish were compared, one with the use of engobe and enamel and the other with the use of esmaltobe. In comparison with the pieces produced with enamel, the condition that uses esmaltobe presented better performance in relation to deformation. A 2² factorial experimental design was fulfilled with firing shrinkage and esmaltobe's layer as factors. In this case, the lower the surface gloss the lower the perception of planarity deformation. According to the results, it was possible to obtain tiles with a lower deformation than the current production condition with esmaltobe, represented by the P5 test, verified by the coordinate measuring arm (CMA), but this cannot be evidenced in the visual analysis due to the low gloss of the surface, a characteristic that has the greatest influence on the perception of the deformation of the tile. Shrinkage was the factor that had the greatest significant influence on the results of analysis of variance (ANOVA) of fleximetry, brightness and percentage of deformation through the treatment of images obtained by CMA. The techniques with the highest sensitivity for detecting deviations from planarity are coordinate measuring arm and fleximetry and the association with gloss result is ideal to guarantee a good visual analysis.

Keywords: Esmaltobe, planarity, porcelain tile.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo produtivo de revestimentos cerâmicos esmaltados.....	20
Figura 2 – Gráfico triaxial de composições de materiais cerâmicos.....	23
Figura 3 – Exemplos de defeitos de planaridade em placas cerâmicas.....	30
Figura 4 – Curva de expansão térmica de massa e esmalte cerâmico.	35
Figura 5 – Esquema de diferenças de expansão térmica com vidrado sob tração.	36
Figura 6 – Esquema de diferenças de expansão térmica com vidrado sob compressão.....	37
Figura 7 - Braço de medição por coordenadas.	38
Figura 8 – Gráfico de difração de raios X da massa crua.	49
Figura 9 – Gráfico de difração de raios X do engobe cru.	50
Figura 10 – Gráfico de difração de raios X do esmalte cru.	50
Figura 11 – Gráfico de difração de raios X da cobertura crua.....	51
Figura 12 – Gráfico de difração de raios X do esmalto cru.	52
Figura 13 – Gráfico de difração de raios X da massa queimada.....	54
Figura 14 - Gráfico de difração de raios X do engobe queimado.	55
Figura 15 – Gráfico de difração de raios X do esmalte queimado.....	55
Figura 16 – Gráfico de difração de raios X da cobertura queimada.	56
Figura 17 – Gráfico de difração de raios X do esmalto queimado.....	57
Figura 18 – Gráfico dos valores de expansão térmica linear dos insumos utilizados.	60
Figura 19 – Gráfico de fleximetria da massa de porcelanato esmaltado.....	62
Figura 20 – Análise visual das peças do sistema 1 <i>versus</i> sistema 2.....	63
Figura 21 – Gráfico dos valores de empeno do sistema 1 e sistema 2.	65
Figura 22 – Gráfico dos valores de curvatura lateral do sistema 1 e sistema 2.	66
Figura 23 – Gráfico dos valores de curvatura central do sistema 1 e sistema 2.	67
Figura 24 – Gráfico de fleximetria óptica das peças do sistema 1 e sistema 2.....	68
Figura 25 – Gráfico das medições em BMC das placas do sistema 1.	70
Figura 26 – Gráfico das medições em BMC das placas do sistema 2.	71
Figura 27 – Análise visual das placas das provas P5 <i>versus</i> P1.....	73

Figura 28 – Análise visual das placas das provas P5 <i>versus</i> P2.....	74
Figura 29 – Análise visual das placas das provas P5 <i>versus</i> P3.....	74
Figura 30 – Análise visual das placas das provas P5 <i>versus</i> P4.....	75
Figura 31 – Gráfico dos valores de empeno das provas P1 a P5.	77
Figura 32 – Gráfico dos valores de curvatura lateral das provas P1 a P5.....	77
Figura 33 – Gráfico dos valores de curvatura central das provas P1 a P5.....	78
Figura 34 – Gráfico de fleximetria óptica das provas P1 a P5.....	79
Figura 35 – Gráfico das medições em BMC da prova P1.	83
Figura 36 – Gráfico das medições em BMC da prova P2.	83
Figura 37 – Gráfico das medições em BMC da prova P3.	84
Figura 38 – Gráfico das medições em BMC da prova P4.	84
Figura 39 - Relações entre brilho, fleximetria, deformação e análise visual das provas P1 a P5.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Formulações dos insumos utilizados.....	40
Tabela 2 – Fatores e níveis para avaliação da planaridade de placas de porcelanato esmaltado acetinado produzidas com esmalto.	46
Tabela 3 – Experimentos a serem realizados para verificação da planaridade das peças com esmalto.	47
Tabela 4 – Análise química dos insumos utilizados.	48
Tabela 5 - Distribuição de tamanhos de partículas dos insumos utilizados.	52
Tabela 6 – Resíduos de moagem dos insumos utilizados.	53
Tabela 7 - Quantificação das fases cristalinas dos insumos utilizados.	58
Tabela 8 – Retração linear dos insumos utilizados.	58
Tabela 9 – Coeficiente de expansão térmica linear dos insumos utilizados.....	60
Tabela 10 – Parâmetros de aplicação conforme padrão fabril das camadas de recobrimento utilizadas para a produção das placas de porcelanato esmaltado acetinado avaliadas.....	63
Tabela 11 – Características dimensionais das placas do sistema 1 e sistema 2.	64
Tabela 12 – Brilho superficial das peças do sistema 1 e sistema 2.	69
Tabela 13 – Valores de planeza e deformação dos sistemas 1 e 2.	71
Tabela 14 – Características dimensionais das placas das provas P1 a P5 em mm.	76
Tabela 15 – Valores de fleximetria das provas P1 a P5 em 1170 °C.....	80
Tabela 16 – Análise de variância (ANOVA) para fleximetria das provas P1 a P5 em 1170 °C.	80
Tabela 17 – Brilho superficial das provas P1 a P5.	81
Tabela 18 – Análise de variância (ANOVA) para brilho superficial das provas P1 a P5.....	82
Tabela 19 – Deformação percentual segundo imagens do BMC para as provas P1 a P5.	85
Tabela 20 – Análise de variância (ANOVA) para deformação percentual segundo imagens do BMC das provas P1 a P5.....	87
Tabela 21 – Valores de planeza para provas P1 a P5.	87
Tabela 22 – Análise de variância (ANOVA) para planeza das provas P1 a P5.....	88

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

α – Coeficiente de dilatação térmica linear

Aa – Absorção de água

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANFACER – Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres

BMC – Braço de medição por coordenada

cm – Centímetros

cm² – Centímetros quadrados

DRX – Difração de raios X

g – Gramas

ISO – *International Organization for Standardization*

kgF – Quilograma força

kPa – Quilo Pascal

l - Litros

m² – Metros quadrados

MEV – Microscopia de varredura eletrônica

min – Minutos

mL – Mililitros

mm – Milímetros

N – Newtons

NBR – Norma Brasileira

P.F. – Perda ao fogo

T_a – Temperatura de acoplamento

T_g – Temperatura de transição vítrea

T_R – Temperatura de amolecimento dilatométrico

UB – Unidade de brilho

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	18
2.1 OBJETIVO GERAL	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 MATERIAIS CERÂMICOS	19
3.2 REVESTIMENTOS CERÂMICOS.....	19
3.3 PROCESSO INDUSTRIAL DE FABRICAÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS ESMALTADOS.....	20
3.3.1 Porcelanato	22
3.3.2 Engobe cerâmico	25
3.3.3 Esmalte cerâmico	26
3.3.4 Esmaltobe	27
3.4 QUEIMA.....	27
3.4.1 Sinterização	28
3.4.2 Defeitos de planaridade	29
3.4.3 Deformação piropástica	32
3.5 PROPRIEDADES DAS CERÂMICAS	33
3.5.1 Expansão térmica	33
3.5.1.1 Acordo dilatométrico entre massa-engobe-esmalte.....	35
3.6 MEDIÇÃO DE DESVIOS DE PLANARIDADE	37
4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	39
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES PRINCIPAIS DOS SISTEMAS.....	39
4.1.1 Caracterização química	41
4.1.2 Caracterização mineralógica	41
4.1.3 Distribuição de tamanhos de partículas	41
4.1.4 Resíduo de moagem	42
4.1.5 Retração linear	42
4.1.6 Dilatometria	43
4.1.7 Fleximetria óptica	43

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE PORCELANATO ESMALTADO ACETINADO	43
4.2.1 Análise visual da deformação de planaridade	44
4.2.2 Características dimensionais por meio de dataplucômetro	45
4.2.3 Fleximetria óptica dos sistemas.....	45
4.2.4 Aferição de brilho superficial.....	45
4.2.5 Aferição da planaridade em BMC	45
4.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	46
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS INSUMOS UTILIZADOS.....	48
5.1.1 Caracterização química.....	48
5.1.2 Caracterização mineralógica	49
5.1.3 Distribuição de tamanhos de partículas	52
5.1.4 Resíduo de moagem.....	53
5.1.5 Caracterização mineralógica após a queima	53
5.1.6 Retração linear	58
5.1.7 Expansão térmica	59
5.1.8 Fleximetria óptica da massa	61
5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE PORCELANATO OBTIDAS PELO SISTEMA 1 E SISTEMA 2.....	62
5.2.1 Análise visual da deformação de planaridade	63
5.2.2 Características dimensionais por meio de dataplucômetro	64
5.2.3 Fleximetria óptica dos sistemas.....	67
5.2.4 Aferição de brilho superficial.....	69
5.2.5 Aferição da planaridade em BMC	70
5.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE PORCELANATO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	72
5.3.1 Análise visual da deformação de planaridade	73
5.3.2 Características dimensionais por meio de dataplucômetro	75
5.3.3 Fleximetria óptica dos sistemas.....	79
5.3.4 Aferição de brilho superficial.....	81
5.3.5 Aferição da planaridade em BMC	82
6 CONCLUSÃO	90
7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	92

1 INTRODUÇÃO

Com um volume de aproximadamente 935 milhões de m², o Brasil é um dos maiores produtores mundiais de revestimentos cerâmicos, sendo o terceiro maior produtor global, perdendo em volume de produção apenas para a China e para a Índia. Quando se trata de consumo, o Brasil supera a Índia e fica somente atrás da China, ocupando assim a segunda posição, com um volume aproximado de 827 milhões de m². Sustenta, ainda, a sexta posição no *ranking* de exportações, o que significa um volume de 106 milhões de m² (ANFACER, 2021).

Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres - Anfacer (2021) “o setor brasileiro de revestimentos cerâmicos é constituído por 54 empresas, 71 unidades fabris e 137 marcas”, “com maior concentração nas regiões Sudeste e Sul e em expansão no Nordeste do país”. A produção nacional é caracterizada pela utilização de dois tipos distintos de processos produtivos: a via seca e a via úmida.

Revestimento cerâmico é um termo comumente utilizado para denominar placas de material cerâmico obtidas pelo processo de prensagem, seguido de secagem e queima, utilizadas para revestir paredes (azulejos) ou o chão (pisos ou pavimentos) (OLIVEIRA; HOTZA, 2015). A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT – (2000) define o revestimento cerâmico como uma placa composta de argilas e outras matérias-primas de origem inorgânica, que é utilizada para revestir paredes e chão, podendo ser conformadas por extrusão (denominada A), prensagem (denominada B) ou outros processos (denominada C), que posteriormente passa por um processo de secagem e queima em temperatura adequada para adquirir as propriedades projetadas.

Além da classificação de acordo com o processo de conformação, as placas cerâmicas são ainda especificadas de acordo com o percentual de absorção de água. Desta classificação surgem os grupos Ia, Ib, IIa, IIb e III (ABNT, 2000).

Dentre todos estes produtos, ganha destaque o porcelanato, que é uma placa completamente vitrificada, com baixos valores de absorção de água

($Aa \leq 0,5\%$. (ABNT, 2000). Sánchez *et al.* (2010) salientam que o porcelanato, além do estado vitrificado, é um produto bastante denso e com baixíssima porosidade. Estas características, segundo os autores, são responsáveis pelas diferenciadas características mecânicas e químicas, apresentando carga de ruptura acima de 1300 N e sendo pouco reativos com produtos de limpeza doméstica e sais de piscina. Além disso, possui resistência ao gelo, o que torna esta tipologia bastante adequada para a utilização em locais de clima rigoroso.

Além da absorção de água, uma característica importante para ser controlada durante o processo produtivo é a planaridade das peças. Problemas de planaridade podem ser identificados quando as peças são côncavas, convexas ou ainda possuem as extremidades deformadas ou curvadas (HENRIQUE, 2013). Estes problemas frequentemente acontecem devido à incompatibilidade entre a massa, o engobe e o esmalte (tensões de acoplamento devido a diferentes dilatações), pela baixa resistência estrutural das mesmas devido à grande presença de fase vítrea (deformação piropástica) e tensões devido à gradientes de temperatura e transformações de fase que ocorrem durante o ciclo de queima (SACMI, 2004). Vale ressaltar que esses fenômenos podem ocorrer todos simultaneamente.

Quando a análise da influência de engobes e esmaltes sobre a curvatura de placas cerâmicas do grupo BII_b foi realizada por diversos autores (MELCHIADES *et al.*, 2000; GENNARI *et al.*, 2012; RODRIGUES *et al.*, 2017), alguns fatores foram indicados como relevantes no surgimento deste defeito. Foram citadas as diferenças entre a retração de queima, conseqüentemente diferentes níveis de fundência, entre os componentes do sistema; camadas de aplicação dos compostos de recobrimento e diferenças entre coeficientes de dilatação térmica dos compostos como sendo fatores que afetam a curvatura desses revestimentos.

No que diz respeito à deformação das extremidades de placas de porcelanato, Henrique (2013) descreve que o problema da deformação é ainda mais evidenciado em esmaltes acetinados, pois são mais suscetíveis as variações de brilho, e aponta que curvaturas positivas são mais propícias para o surgimento do defeito, ocorrendo em temperaturas em que o fenômeno de expansão térmica existe. O autor sugere, ainda, que as assimetrias entre as

camadas que compõem a placa, com composições químicas diferentes entre si, tornam o arranjo bastante complexo.

Melchiades *et al.* (2020) cita que as deformações de planaridade iniciam durante a queima, uma vez que o vidrado sofre várias transformações e ao amolecer se transforma em uma camada líquida contínua. Após esta fase, no resfriamento, a viscosidade vai aumentando até se comportar como um corpo rígido e retrair ao mesmo tempo que a massa, que da mesma maneira está se transformando e retraindo. Neste sentido, é no resfriamento que ocorre o acoplamento entre a camada de vidrado e a massa, e tensões surgem pelas diferenças de retração, em ordem da diferença de coeficiente de expansão térmica. Nesta fase, as tensões não podem ser mais aliviadas e produzem curvaturas nas peças.

Portanto, produzir revestimentos cerâmicos de grandes formatos com a planaridade necessária não é uma tarefa simples. Uma análise mais profunda entre as interações do suporte cerâmico e das camadas de recobrimento na tipologia porcelanato esmaltado acetinado é necessária para compreensão da deformação das extremidades dessas placas de revestimento.

Diferentes estratégias vêm sendo avaliadas a fim de minimizar este problema, desde ajustes de formulações, até ajustes de processo. Neste sentido, o esmaltobe, composto que pode substituir engobe e esmalte, surge como uma possibilidade de melhoria nas interações entre as camadas e vem sendo utilizado em várias unidades industriais. Isso porque ele é um composto único, que substitui o engobe e o esmalte durante a produção de porcelanatos esmaltados acetinados, alterando as interações entre os componentes da placa cerâmica. Após identificação da melhor condição de composição química e mineralógica de um esmaltobe, ainda é necessário avaliar outros fatores que podem influenciar a deformação. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência da espessura da camada de aplicação e da retração linear de queima do esmaltobe na deformação da planaridade da peça. Para isso, técnicas tradicionais (medição de curvatura por meio de dataplucômetro) e avançadas (braço de medição por coordenadas e fleximetria) foram utilizadas para identificar e quantificar a maior parte das possíveis deformações de planaridade, medidas por diferentes métodos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da camada de aplicação e da retração linear do esmalto na planaridade de placas de porcelanato esmaltado com acabamento acetinado.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para atingir o objetivo geral da proposta, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- Demonstrar as características e propriedades típicas dos componentes da placa de porcelanato esmaltado com acabamento acetinado;
- Comparar os resultados de caracterizações entre o sistema massa/engobe/esmalte/cobertura e o sistema massa/esmalto/cobertura;
- Avaliar a influência da camada de aplicação e da retração de queima do esmalto na deformação da planaridade, visando identificar a(s) melhor(es) metodologia(s) que permite a medição deste defeito com maior sensibilidade.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MATERIAIS CERÂMICOS

A classificação mais tradicionalmente adotada para os materiais faz a distinção entre três grupos: os materiais metálicos, os materiais cerâmicos e os materiais poliméricos. Basicamente a diferenciação se dá por meio da estrutura atômica e química de cada um deles (PADILHA, 2000).

Os materiais cerâmicos são resultados da combinação de elementos metálicos e não metálicos. Normalmente são óxidos, nitretos, carbetos e boretos. As ligações químicas deste tipo de material podem ser do tipo iônica ou do tipo covalente. São materiais isolantes térmico e elétrico, com alta dureza e grande fragilidade, resistentes a altas temperaturas, podendo ou não ser transparentes (PADILHA, 2000).

As cerâmicas podem ainda ser classificadas em dois tipos: as tradicionais e as avançadas. As cerâmicas tradicionais são aquelas produzidas basicamente à base de argilas e sílica, com pouco beneficiamento, diversas vezes consumidas na sua forma natural (CARTER; NORTON, 2013; OLIVEIRA; HOTZA, 2015). Estes tipos de produtos podem ser conformados por prensagem, extrusão ou colagem. Adquirem resistência por meio de tratamentos térmicos ou queima, em que certo grau de densificação é alcançado. Entre os mais conhecidos desta categoria podem-se citar sanitários, tijolos, e placas de revestimentos. O consumidor busca nesses itens destacadas propriedades mecânicas e estéticas (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

3.2 REVESTIMENTOS CERÂMICOS

A denominação revestimentos cerâmicos é utilizada para denominar placas comumente constituídas por uma base de natureza argilosa, com porosidade variável, e podendo ou não ser recoberta por uma camada vítrea (BARBA *et al.*, 1997). Podem ser esmaltadas ou não esmaltadas, incombustíveis e não afetadas pela luz (ABNT, 2020).

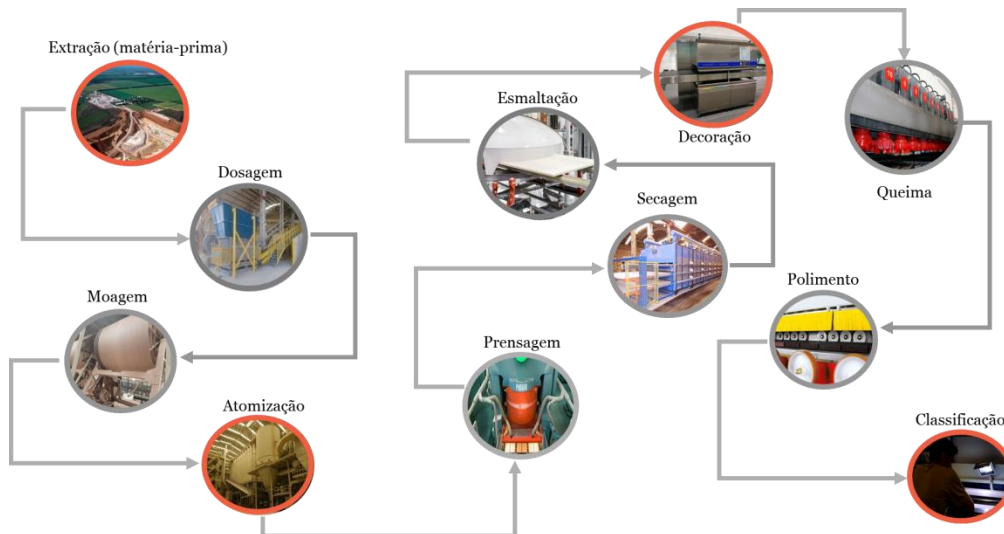
Dentre os tipos de placas cerâmicas classificadas pela ABNT (2020), encontram-se os porcelanatos, que são os revestimentos vitrificados caracterizados por possuírem absorção de água inferior a 0,5% em peso.

Os porcelanatos são produtos com alta densificação, conseqüentemente, com baixa porosidade. A baixa porosidade confere ao produto ótimas características mecânicas e químicas, com excelente resistência ao gelo (SÁNCHEZ *et al.*, 2010). São compostos por diversas fases cristalinas, dependentes da composição utilizada, presentes em uma matriz vítrea (OLIVEIRA, 1998).

3.3 PROCESSO INDUSTRIAL DE FABRICAÇÃO DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS ESMALTADOS

A Figura 1 ilustra o processo produtivo de placas cerâmicas esmaltadas.

Figura 1 - Processo produtivo de revestimentos cerâmicos esmaltados.



Fonte: Autora

A produção do revestimento cerâmico em escala industrial inicia pela extração das matérias-primas na natureza. As jazidas são localizadas por meio de pesquisas topográficas, com posterior sondagem das áreas escolhidas e formação dos lotes para serem consumidos (HENRIQUE, 2013).

Assim que a formulação de massa é definida, de acordo com a tipologia de produto desejada, procede-se com a dosagem das matérias-primas utilizando-se pás carregadeiras que levam os insumos até a balança. Por meio de correias, os materiais são transportados até uma caçamba dosadora, que é responsável pelo carregamento dos moinhos. A importância desta etapa está no fato de que, uma vez que a dosagem não for feita de maneira precisa, podem ocorrer alterações tanto na produção como no produto final (HENRIQUE, 2013).

O processamento das matérias-primas pode ser realizado por via seca ou via úmida. No caso da fabricação de revestimentos cerâmicos por via seca, a moagem da massa é feita sem a presença de água e o ajuste de umidade é realizado posteriormente, com equipamentos que promovem a umidificação do pó. A outra forma de processamento é via úmida, em que a água está presente no processo de moagem, e a barbotina resultante tem sua umidade diminuída pelo processo de secagem por *spray dryer*, comumente chamado atomização (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

O processo de atomização é realizado de forma contínua por meio de utilização de contracorrente de ar quente contra as gotículas de suspensão que são formadas pela injeção da barbotina sob pressão em bicos com diâmetro pré-determinado. Esta etapa produz pós com granulometria e umidade controlada (5-6%). A forma esférica do pó obtido é a ideal para a próxima etapa do processo, que é a prensagem (SACMI, 2004).

A etapa de conformação do material define o formato desejado e algumas propriedades físicas inerentes à placa cerâmica, tal como a resistência mecânica. Durante o processo de prensagem ocorrem três fenômenos distintos: conformação da peça (determinação da geometria), compactação da massa (consistência para resistir aos esforços mecânicos do processo) e redução dos vazios (vazios existentes entre as partículas do pó atomizado) (SACMI, 2004).

Logo após a prensagem, as peças conformadas são direcionadas para o secador. Neste equipamento ocorre a eliminação da umidade residual que estava presente no pó atomizado. Os secadores podem ser do tipo vertical ou horizontal. Utilizam corrente de ar quente, em torno de 250 °C, para que a água remanescente seja eliminada (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

A próxima etapa do processo é a esmaltação. Nela, o aspecto final do produto é definido pela aplicação de camadas de recobrimento de composições distintas. Estas camadas são responsáveis por algumas características técnicas e estéticas como cor, textura, brilho, resistência química, resistência ao escorregamento, resistência ao desgaste, entre outras (HENRIQUE, 2013). Durante a esmaltação, são aplicadas sobre a peça engobe, esmalte, tintas e eventualmente esmaltes de cobertura ou granilhas, respectivamente. Para aplicação de engobe e esmalte, utiliza-se o equipamento denominado véu campana.

Com as peças esmaltadas, segue-se para a etapa de queima. Esta etapa é a que dá origem ao material cerâmico, em que as matérias-primas da massa se transformam em compostos vítreos e cristalinos, conferindo as propriedades desejadas do produto final. No que diz respeito às camadas de recobrimento, a queima induz a fusão, formando uma capa delgada vítrea contínua, bem ancorada e permeada com o suporte. O tratamento térmico das placas cerâmicas consiste, desta forma, no aquecimento das mesmas, ou seja, na transmissão de energia às peças secas, e ocorre por tempo determinado. Nesta etapa ocorrem transformações físicas e químicas no material, o que levam a massa e as camadas de recobrimento a adquirirem as propriedades desejadas do produto, tanto técnicas quanto estéticas (SACMI, 2004). Na atualidade o equipamento mais utilizado é o forno a rolo.

Após a queima, se procede à fase final do processamento da placa cerâmica. Por meio de análise visual e medições automatizadas, utilizando-se critérios definidos por normas nacionais e internacionais, as peças são selecionadas e classificadas de acordo com os padrões pré-estabelecidos. Analisa-se, por exemplo, variações na tonalidade e defeitos visuais e dimensionais. Depois desta análise, os produtos são estocados em pavilhões para aguardar o momento da comercialização (HENRIQUE, 2013).

3.3.1 Porcelanato

Independente do sistema produtivo utilizado para o processamento, a fabricação de qualquer revestimento cerâmico parte de uma composição de matérias-primas, que sofrem transformações físicas e químicas para que se

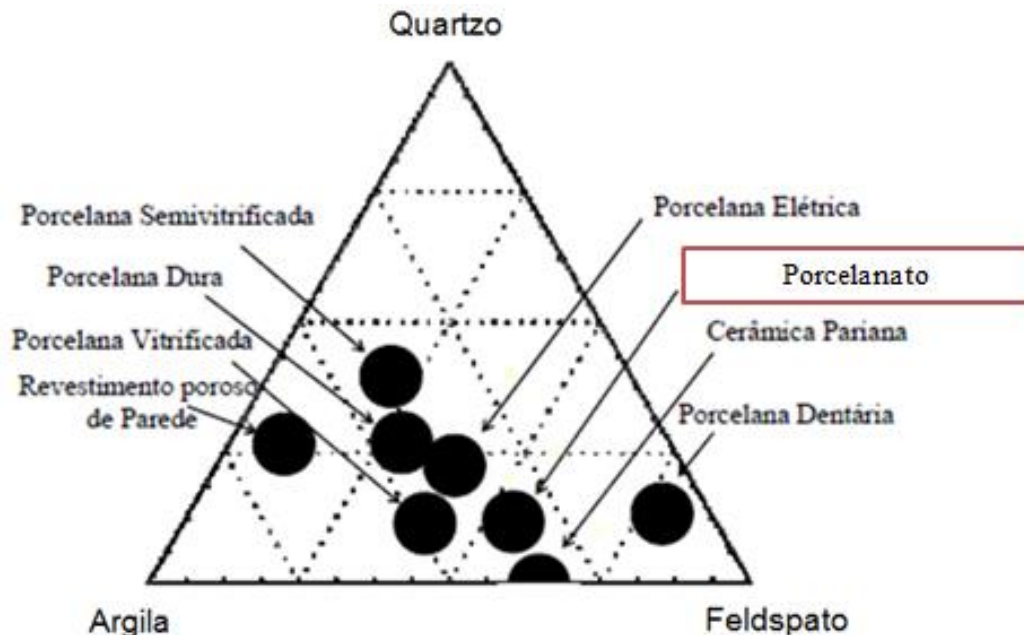
obtenham as propriedades desejadas do produto acabado (BARBA *et al.*, 1997).

De acordo com Oliveira e Hotza (2015), “as matérias-primas usadas na formulação de massas de porcelanato apresentam composições mineralógicas distintas, exercendo funções próprias e específicas”.

Tais matérias-primas são divididas em duas classes: as argilosas e as não argilosas. As primeiras são responsáveis por conferir plasticidade para a massa; as segundas, que compreendem as matérias-primas fundentes e as refratárias, servem para que a massa densifique e obtenha resistência mecânica desejada (OLIVEIRA, 1998).

Norton (1973) explana que a composição do corpo cerâmico pode ser desenvolvida visando as melhores propriedades em relação à plasticidade, secagem, queima e características do produto acabado. Assim, as formulações de massa de porcelanato usualmente são oriundas de composições triaxiais de argila, quartzo e feldspato, conforme Figura 2.

Figura 2 – Gráfico triaxial de composições de materiais cerâmicos.



Fonte: Adaptação NORTON (1973)

As propriedades mecânicas podem ser incrementadas se o quartzo for substituído por alumina; no lugar do feldspato, podem-se utilizar outros fundentes como o filito ou a nefelina. Além desses componentes, outros mais

podem ser adicionados nas massas para que o processo de sinterização seja otimizado e para que as propriedades técnicas, como resistência mecânica à flexão ou absorção de água, sejam incrementadas (CONSERVA, 2016).

A argila é a matéria-prima mais fina presente na massa do porcelanato e é responsável pela plasticidade da massa. O aumento do teor na formulação é responsável pelo incremento das resistências a verde e a seco. Os teores utilizados variam entre 35 e 50% em peso (MARUCHIN, 2007).

Argilas são rochas das mais variadas origens, composta por diversos minerais diferentes. São chamadas de alumino-silicatos hidratados. Raramente se apresentam de forma pura na natureza, podendo conter feldspatos, quartzo, carbonatos e, em alguns casos, matéria orgânica. (BARBA *et al.*, 1997)

O quartzo é uma das formas da sílica. Ele é o mineral mais abundante da crosta terrestre. É um cristal duro e rígido, de estrutura compacta e fórmula química SiO_2 . Com a aplicação de calor, o quartzo pode se transformar em cristobalita ou tridimita. O quartzo evita que a massa se contraia ou deforme tanto na secagem como na queima. Na temperatura de 573 °C, o quartzo muda da forma alfa para a forma beta, o que é responsável por uma alteração de volume na sua estrutura (NORTON, 1975).

A presença de sílica livre nas massas cerâmicas pode acarretar quebra das peças, com brusco aquecimento ou resfriamento, devido ao aumento de volume da estrutura, além de reduzir a resistência mecânica e ao choque térmico. O quartzo possui bastante influência na dilatação das placas cerâmicas, de modo que pode aumentar a dilatação em corpos porosos e diminuí-la em corpos vitrificados (MARUCHIN, 2007).

O feldspato, assim como as matérias-primas não plásticas, reduz a plasticidade da composição e facilita a defloculação das massas. São alumino silicatos de sódio, cálcio, potássio e bário. Estão presentes na maioria das rochas ígneas (BARBA *et al.*, 1997).

Nas formulações de massas cerâmicas, os feldspatos são utilizados como fundentes para a formação de fase vítrea (NORTON, 1975). Por facilitar a presença de fase líquida, contribuem para a redução da porosidade da peça e, desta maneira, aumentam a resistência mecânica dos produtos finais. Esta é

uma das razões para que se utilizem quantidades relativamente altas na massa de porcelanato (BAUCIA JUNIOR *et al.*, 2010).

3.3.2 Engobe cerâmico

O engobe é uma cobertura aplicada sobre o revestimento cerâmico geralmente cru. Em sua formulação podem estar inclusos argilas, caulins, quartzo, feldspato, zircônio e fritas fundentes (PRACIDELLI, 2008). Desta forma, a composição química de um engobe é intermediária entre a massa e o esmalte cerâmico. No processo, o engobe, em forma de finas camadas é aplicado entre a massa e o esmalte (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

A aplicação do engobe antes do esmalte pode servir para limitar a desgazeificação que ocorre durante o processo de queima, ou para evitar o contato do esmalte com eventuais contaminantes presentes na massa (SACMI, 2004). Além dessas funções, pode-se atribuir ao engobe (OLIVEIRA; HOTZA, 2015; PRACIDELLI, 2008):

- Melhorar a superfície do esmaltado por meio de eliminação de defeitos provenientes da base;
- Ajuste do acordo dilatométrico do sistema;
- Ocultar e mudar a cor da massa;
- Diminuição de custo de aplicação de esmalte, uma vez que disfarçando a cor do suporte, o engobe permite a utilização de esmaltes menos opacos;
- Reduzir o defeito de marca d'água.

A principal diferença entre um engobe e um esmalte é que a quantidade de fase líquida formada em um engobe é menor e a temperatura de queima de ambos é dependente da composição química apresentada nas suas formulações (PRACIDELLI, 2008).

Santos *et al.* (2007) apontam que na prática, o que se nota, é que o engobe geralmente apresenta desempenho mais próximo ao da massa. Desta

maneira, seu comportamento se difere dos esmaltes, considerados materiais vítreos, e assim não possuem temperatura de transição vítrea (T_g).

3.3.3 Esmalte cerâmico

O esmalte cerâmico é uma camada fina e contínua, de natureza vítrea, preparada a partir de formulações fundentes em altas temperaturas, que é aplicado sobre as superfícies cerâmicas (LÓPEZ *et al.*, 2001; STEFANOV; BATSCHWAROV, 1991).

Pode-se afirmar que o esmalte é um recobrimento vítreo, geralmente composto por silicato, que é depositado sobre as peças cerâmicas. A maior diferença entre em esmalte cerâmico e um vidro de aplicações gerais é que o esmalte cerâmico é uma fina camada que apresenta fortes ligações na interface com o substrato cerâmico, enquanto um vidro industrial é utilizado por si só (STEFANOV; BATSCHWAROV, 1991).

O principal componente de um esmalte cerâmico é a frita. A frita é um composto vítreo, insolúvel em água, que é obtida por meio da fusão de diversas matérias-primas em formulação apropriada, que sofrem um brusco resfriamento em água. Fabrica-se a frita justamente para insolubilizar os elementos solúveis em água por meio da fusão em temperaturas em torno de 1300 e 1500 °C, que quando resfriadas abruptamente formam um vidro. A quantidade de frita na formulação de um esmalte varia de acordo com a tipologia do produto e os parâmetros de processamento do revestimento. A frita é responsável pela fundência do esmalte (LÓPEZ *et al.*, 2001).

Do ponto de vista mecânico, sendo que esmaltes cerâmicos são um tipo de vidro, eles têm certa semelhança com os sólidos, mas devido a sua estrutura ser amorfa, tem similaridades com os líquidos. São constituídos pela combinação de diversos óxidos, possuindo três componentes gerais: os formadores de rede, caracterizados pela estrutura vítrea, geralmente do óxido de silício; os modificadores de rede, que são os elementos que ocupam os interstícios da estrutura formada pela sílica, responsáveis pela fusibilidade e dureza do esmalte, por exemplo; e os estabilizadores de rede, responsáveis pela manutenção do estado vítreo amorfo da composição (PRACIDELLI, 2008; LÓPEZ *et al.*, 2001).

3.3.4 Esmaltobe

Buscando-se a flexibilização de produção, juntamente com possíveis reduções de custos, surge na indústria o conceito esmaltobe.

A utilização do termo esmaltobe é bastante recente, se refere a engobes que possuem maiores quantidades de frita em sua composição, derivando em um composto com características entre o engobe e o esmalte (MELCHIADES *et. al.*, 2020).

Pode-se dizer, então, que o esmaltobe é uma mistura entre as composições do engobe e do esmalte, que atende às características técnicas de ambos os compostos, podendo assim ser realizada somente uma aplicação em cima da peça.

Na prática, o esmaltobe é a junção das matérias-primas cruas do engobe e das fritas nobres comumente utilizadas nos esmaltes. Por se tratar de um produto relativamente novo em uso na indústria, são escassas as informações sobre ele na literatura.

3.4 QUEIMA

A queima, ou tratamento térmico, é a etapa fundamental do processamento de revestimentos cerâmicos. Nesta etapa, as propriedades técnicas e estéticas se consolidam na placa. As matérias-primas da massa sofrem transformações físicas e químicas e são convertidas em compostos cristalinos e vítreos, que são responsáveis pelas características do produto final, como a insolubilidade e solidez para garantia do formato da placa, a resistência mecânica, a porosidade, entre outras. No sistema de recobrimento, ocorre a fusão do vidro e a formação de uma camada contínua que cria interações fortes com o suporte e desenvolve determinadas propriedades químicas e físicas, além das estéticas (HENRIQUE, 2013; SACMI, 2004).

As temperaturas durante toda esta etapa e os tempos em que o material fica exposto em cada uma delas são os parâmetros primordiais que devem ser determinados e observados para que as características técnicas desejadas sejam alcançadas: no caso do porcelanato, pode-se citar a baixa porosidade e alta vitrificação. Para esta tipologia de produto temperaturas em

torno de 1200 °C são requeridas, com os mais variados tempos de permanência (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

Desidratação, expansão térmica, densificação e fusão são exemplos de fenômenos físicos que ocorrem na queima. Entre os químicos, cita-se perda de água de constituição das matérias-primas, decomposição de material orgânico e de carbonatos, oxidação de compostos de ferro, formação de novas fases cristalinas (HENRIQUE, 2013).

A densificação do porcelanato está intimamente ligada ao processo de sinterização em presença de fase líquida e a quantidade e características da mesma são fatores determinantes para a deformação pirolástica das peças cerâmicas. Desta forma, o conhecimento sobre a evolução da microestrutura é importante para o entendimento dos mecanismos envolvidos nesta etapa (CONSERVA, 2016).

3.4.1 Sinterização

“A sinterização é um tratamento térmico para unir as partículas em uma estrutura coerente, predominantemente sólida, por meio de eventos de transporte de massa, que geralmente ocorrem em escala atômica. As ligações acarretam um aumento de resistência e a diminuição da energia do sistema” (GERMAN, 1996). A sinterização, normalmente, é acompanhada por retração do corpo, densificação e estabilidade dimensional.

Em muitos materiais cerâmicos, como os porcelanatos, a sinterização em presença de fase líquida é a mais utilizada, pois proporciona uma melhor sinterização e facilita a evolução de microestruturas desejadas (RAHAMAN, 2003). A sinterização em presença de fase líquida é aquela na qual uma fase líquida está presente no pó compactado durante a etapa de sinterização (KANG, 2005).

A sinterização em presença de fase líquida ocorre em três fases distintas. A primeira etapa é em que ocorre a redistribuição da fase líquida na peça e o rearranjo das partículas sólidas, que ocorre principalmente por capilaridade. A segunda fase é reprecipitação da solução, em que eventos de difusão por meio da fase líquida controlam a densificação. O estágio final

ocorre por meio da sinterização em estado sólido, para a consolidação do processo de densificação (RAHAMAN, 2003).

Em porcelanatos, durante o processamento térmico, em temperaturas entre 900 e 1000 °C, uma grande quantidade de fase líquida se forma, envolvendo as partículas e dando início ao processo de capilaridade nos pontos de contato entre os grãos da peça conformada. A capilaridade é responsável pela aproximação dessas partículas, aumentando a retração, diminuindo a porosidade e alterando o tamanho e a forma dos mesmos. Com o aumento da temperatura, há um incremento na quantidade de fase líquida e a diminuição da porosidade. Em torno de 1180 °C, os poros começam a fechar. Este selamento dos poros pode fazer com que gases fiquem presos no interior da peça e tenham a possibilidade de exercer pressão no sistema, o que prejudica a densificação. Em 1200 °C, a pressão dos gases é bastante significativa, podendo fazer a peça expandir (SÁNCHEZ *et al.*, 2010).

Nas cerâmicas produzidas por sinterização em presença de fase líquida, além de porosidade, a microestrutura formada possui duas outras fases: grânulos cristalinos e fase vítrea residual. Algumas propriedades mecânicas, como a fadiga ou a fluência, podem ser alteradas dependendo da quantidade de cada uma dessas fases formadas (RAHAMAN, 2003).

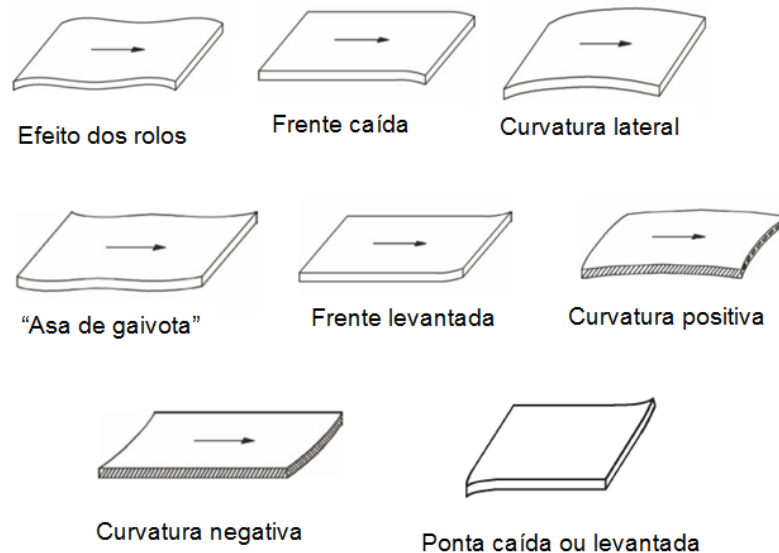
3.4.2 Defeitos de planaridade

Durante a etapa de queima, as peças cerâmicas podem desenvolver curvaturas devido às variáveis do processo, ou ainda pela incompatibilidade de características dos materiais utilizados nos componentes do sistema, ou seja, a massa e as camadas de recobrimento (RODRIGUES *et al.*, 2017; SACMI 2004).

Os tipos mais comuns de desvios de planaridade, segundo SACMI (2004) são expostos na Figura 3. A curvatura convexa é a mais comum e de difícil previsão e controle, uma vez que está ligada ao acordo dilatométrico entre o suporte e as camadas de recobrimento (HENRIQUE, 2013; SACMI, 2004). Henrique (2013) salienta, que o tipo de engobe, as relações entre camadas de engobe e esmalte, o formato da peça, o grau de densificação e o

desenho da muratura também são fatores que influenciam no desenvolvimento das curvaturas.

Figura 3 – Exemplos de defeitos de planaridade em placas cerâmicas.



Fonte: Adaptação HENRIQUE, 2013; SACMI, 2004

Gennari *et al.* (2011) explicam que muitos problemas de curvatura podem ser resolvidos por meio de ajuste de curvas e temperaturas de queima. O tipo e a intensidade da curvatura que a peça apresentará dependem do gradiente de temperatura inferior e superior aos quais as superfícies das peças são expostas, o que pode gerar diferenças nas retrações ao longo das mesmas.

Amorós *et al.* (1989) explicam que curvaturas e tensões podem surgir na etapa de resfriamento do ciclo de queima, quando os componentes da peça (suporte a recobrimentos) já se encontram no estado sólido. Este fenômeno ocorre devido à diferença na contração entre as partes do sistema. As espessuras dos componentes de recobrimentos também têm bastante influência sobre a curvatura da peça segundo o autor.

Melchiades *et al.* (2000) declaram que o engobe afeta consideravelmente a curvatura de peças cerâmicas, sendo que somente o controle da compatibilidade dilatométrica entre os componentes não é suficiente para que se garanta planaridade das peças. Assim como Amorós *et*

al. (1989), este autor também conclui que a camada do engobe influencia a curvatura de revestimentos cerâmicos e que refratariedade e expansão térmica linear são fatores que precisam ser levados em consideração no controle do defeito.

Gennari *et al.* (2012), ao estudar a curvatura central em revestimentos porosos com absorção de água entre 6 e 10%, descrevem que, como já descrito por Amorós *et al.* (1989) e Melchiades *et al.* (2000), a camada de engobe exerce real influência nos valores e sentido da curvatura central das peças e que somente os controles dilatométricos não são suficientes para o controle do defeito de desvio na planaridade. A influência do engobe na curvatura central depende da expansão térmica e do grau de fundência do mesmo. Quanto ao grau de efeito sobre a curvatura, o coeficiente dilatométrico, a retração de queima e a camada de aplicação são, nesta ordem, os fatores que mais têm influência no desvio.

Dal Bó *et al.* (2012) concluíram que os esmaltes cerâmicos exercem tensões sobre a placa somente no resfriamento, após o fenômeno de sinterização, e que as interações entre o esmalte e o suporte analisados por meio de curvas de dilatação térmica linear auxiliam na previsão do tipo de curvatura que a placa irá apresentar. Já em relação à interação entre o engobe e o suporte, o fator que mais influencia no quesito curvatura central é a retração linear de queima.

Rodrigues *et al.* (2017) apontaram, em seu estudo sobre engobes e curvaturas de placas cerâmicas com absorção de água entre 6 e 10%, que a retração de queima do engobe, em relação ao suporte, do aquecimento até a temperatura máxima de queima das peças e as diferenças de dilatações térmicas no resfriamento influenciam no surgimento de curvaturas do produto acabado. Caso o engobe seja mais refratário que a massa, uma curvatura positiva ou convexa irá surgir. Quando se considera o esmalte e a massa, a curvatura convexa é mais acentuada se o coeficiente de dilatação térmica do esmalte for menor que o da massa.

3.4.3 Deformação pirolástica

Conforme citado anteriormente, em torno de 1000 °C, tem-se o início da formação da fase líquida viscosa que é responsável pela gresificação da peça cerâmica. Neste ponto, o material deixa de se comportar como um sólido rígido e a aplicação de qualquer força de tensão provoca uma deformação permanente, que é denominada deformação pirolástica. O grau da deformação é dependente da viscosidade aparente do sistema, que é diretamente proporcional à quantidade de fase líquida presente e à viscosidade da mesma, e também da magnitude da tensão aplicada sobre a peça (ALBERO *et al.*, 1991).

Bernardin *et al.* (2006) destacam que a deformação pirolástica em peças cerâmicas é a flexão que a gravidade causa nas mesmas durante a queima. O produto perde a forma durante este processo. Este fenômeno é relacionado à quantidade de fase líquida formada, com a viscosidade que esta fase possui, sendo que quanto menor, pior é o grau de deformação e com a densidade aparente da peça, que está relacionada com a quantidade de poros existentes para serem preenchidos pelo líquido e que devem ser preenchidos em sua maior parte para garantir baixos valores de absorção de água (SANTOS *et al.*, 2019).

As peças de porcelanato, que são bastante vitrificadas, durante a queima em fornos a rolos industriais, precisam manter suas características dimensionais enquanto prosseguem dentro do equipamento. Durante este trajeto é possível que as peças se curvem, devido à força da gravidade e sua relação com o peso da peça (BERNARDIN *et al.*, 2006; SÁNCHEZ *et al.*, 2018).

As curvaturas decorrentes da deformação pirolástica podem ser observadas já na saída do forno, sendo responsáveis por diminuir os níveis de qualidade da produção. O defeito se torna bastante visível após o assentamento das peças; quando há incidência da luz na mesma, um reflexo é produzido em sua superfície, acentuando o ocorrido. Se medida com instrumentos apropriados, esta deformação muitas vezes não passa de décimos de milímetros (BRESCIANI; SPINELLI, 2012; SÁNCHEZ *et al.*, 2018).

Deformação pirolástica e empenamento durante a queima não devem ser confundidos. O empeno ocorre por causa das retrações diferentes

em partes de uma mesma peça durante a secagem ou a queima do produto, devido aos processos de conformação, ou acordos dilatométricos entre as múltiplas camadas de um revestimento. O empeno ocorre em diversas direções. A deformação piropoplástica sempre é direcionada para baixo, como resultado da ação da força da gravidade. O formato das peças é um fator que tem bastante influência sobre a deformação piropoplástica, pois pode propiciar ou não material a se deformar (RESTREPO; DINGER, 2003).

3.5 PROPRIEDADES DAS CERÂMICAS

Como as cerâmicas são compostos químicos complexos que são formados por elementos metálicos e não metálicos, esses materiais possuem uma grande variedade de propriedades químicas e físicas. Devido as suas ligações iônicas e covalentes, os materiais cerâmicos têm como características alta dureza, fragilidade, alto ponto de fusão, baixa condutividade elétrica e térmica, ótima estabilidade química e térmica e uma elevada resistência à compressão (PADILHA, 2000).

3.5.1 Expansão térmica

A expansão térmica, ou dilatação térmica, é um fenômeno que acomete todos os corpos sólidos, em maior ou menor intensidade, estando intimamente ligada às forças e tipos de ligação do material. Com o aumento do conteúdo energético da amostra, ocorre um aumento nas vibrações atômicas, o que acarreta uma alteração de volume (BARBA *et al.*, 1997).

O termo expansão térmica é geralmente utilizado para denominar as alterações de dimensões que ocorrem no material quando se aumenta ou diminui a temperatura na qual o mesmo é exposto. Na maioria dos casos, as dimensões aumentam quando a peça é aquecida e contrai quando resfriada (CARTER; NORTON, 2013; RICHERSON, 1992).

O coeficiente de expansão térmica, comumente conhecido como α , pode ser determinado por meio da Equação 1 (CARTER; NORTON, 2013; RICHERSON, 1992):

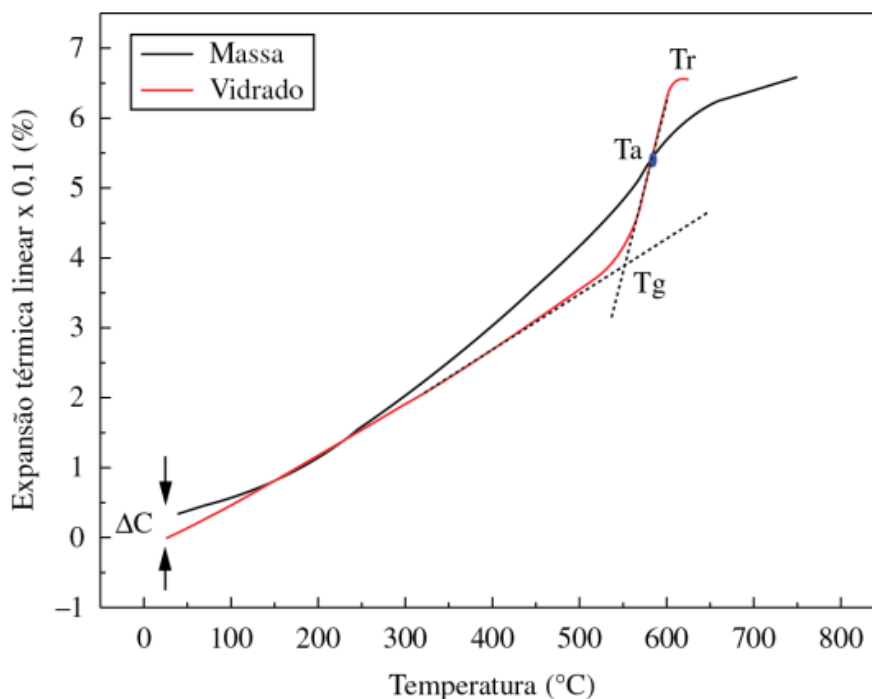
$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T} \quad \text{Eq. 1}$$

Em que Δl é a variação na dimensão do corpo de prova, l_0 é o comprimento inicial da amostra e ΔT é a variação de temperatura. A unidade de medida comumente utilizada para este coeficiente é $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

O α está diretamente relacionado com a energia de ligação. Materiais com fortes ligações químicas, como é o caso da maioria dos materiais cerâmicos, possuem baixo coeficiente de expansão térmica. Esta propriedade dos sólidos é originada na variação assimétrica de energia de ligação e distância entre átomos, ou seja, com o aquecimento a frequência e a amplitude de vibração dos átomos aumentam e como energias de repulsão são maiores que as de atração, a distância entre eles aumenta (PADILHA, 2000). Materiais iônicos possuem maior α quando comparados aos materiais com ligações covalentes. (CARTER; NORTON, 2013)

A medida do coeficiente de expansão térmica pode ser feita por meio de equipamentos denominados dilatômetros. Os dilatômetros fornecem curvas de expansão, que relacionam a variação de tamanho e a temperatura em que a mesma ocorre. Estas curvas fornecem informações importantes sobre o possível comportamento térmico dos materiais. Várias transformações podem aparecer nestas curvas, como exemplo: desidratação em minerais argilosos, transformações alotrópicas como a do quartzo α para o quartzo β , certos tipos de cristalização, ponto de formação de fase líquida e sinterização ou ainda liberações gasosas. Isto, pois todos estes fenômenos citados fazem com que o material analisado tenha uma alteração de volume (BARBA *et al.*, 1997). Um exemplo de curvas de expansão de uma massa cerâmica e um esmalte cerâmico pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 – Curva de expansão térmica de massa e esmalte cerâmico.



Fonte: MELCHIADES *et al.*, 2000

Para os esmaltes cerâmicos, a curva de expansão pode fornecer três informações bastante importantes: a temperatura de amolecimento (T_r), a temperatura de transição vítrea (T_g) e a temperatura de acoplamento (T_a). A temperatura de acoplamento é determinada em conjunto com a curva de expansão da massa (PETERSON, 2002).

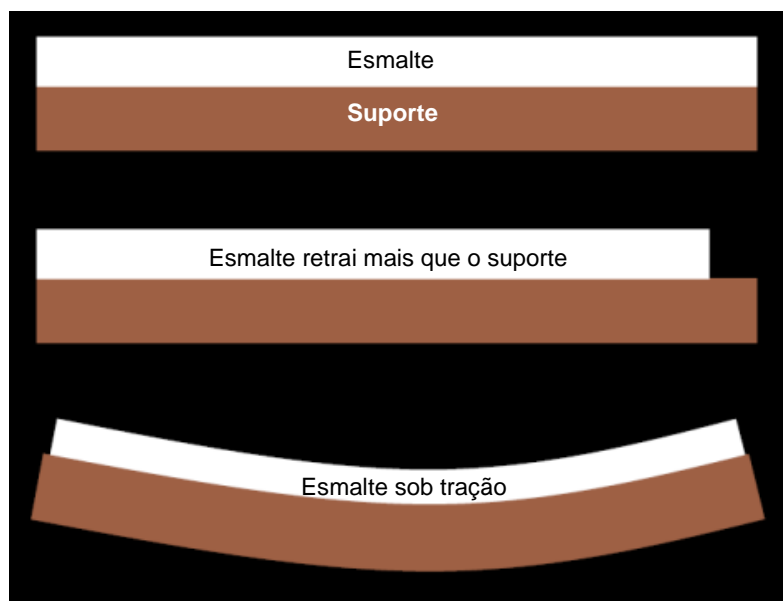
3.5.1.1 Acordo dilatométrico entre massa-engobe-esmalte

A expansão térmica tem um papel fundamental quando um ou mais materiais em contato são submetidos a processos térmicos (CARTER; NORTON, 2013), como é o caso dos revestimentos cerâmicos. A massa cerâmica dilata quando aquecida, assim como quase todos os materiais, e se contrai quando resfriada. O mesmo ocorre com o engobe e o esmalte. Como todos estes compostos possuem composições diferentes, também possuem dilatações diferentes. Quando o esmalte amolece no processo de queima, estas diferenças são diminuídas, pois o esmalte se encontra em estado plástico-viscoso, acompanhando as dilatações do engobe e da massa (MATTHES, 1990).

Ao final da etapa de queima, no resfriamento, o esmalte fundido interage com o engobe. Se os coeficientes de expansão térmica do suporte e do esmalte forem consideravelmente diferentes um do outro, tensões podem se desenvolver, gerando defeitos (SACMI, 2004). Estas tensões surgem quando o engobe e o esmalte e a massa já estão solidificados, tendo como principal causa a diferença de contração entre estas camadas.

Se a camada de engobe ou esmalte possui uma expansão térmica maior que a do suporte cerâmico, esta camada também retrairá mais no resfriamento, mas como está intimamente ligada à base, não pode retrair livremente. Desta forma, tensões de tração serão originadas no vidrado e a curvatura se apresenta de forma côncava (MATTHES, 1990), conforme ilustra a Figura 5.

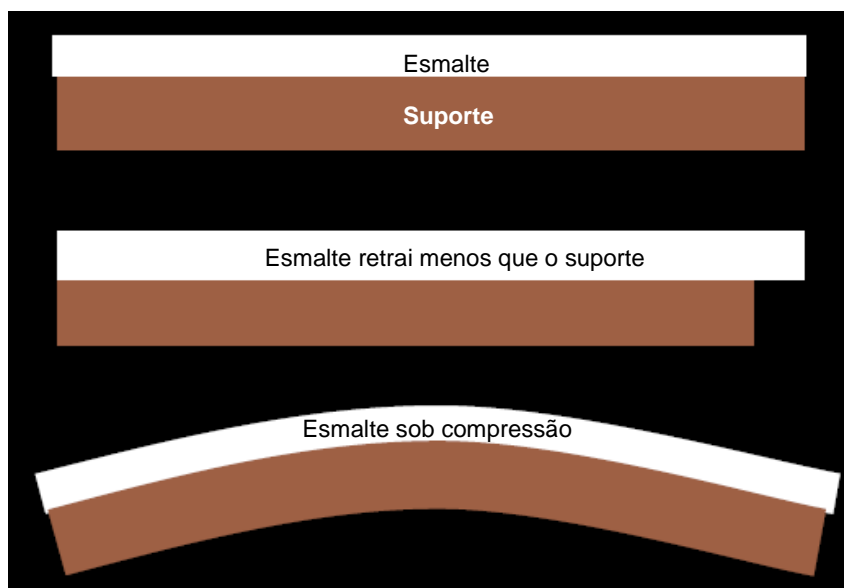
Figura 5 – Esquema de diferenças de expansão térmica com vidrado sob tração.



Fonte: Adaptação MELCHIADES, 2016

Caso ocorra que o engobe ou esmalte possuam dilatação menor que a da massa, neste caso a massa retrairá mais e, assim, tensões de compressão serão originadas no vidrado, com curvaturas sendo convexas (MATTHES, 1990), conforme ilustra a Figura 6.

Figura 6 – Esquema de diferenças de expansão térmica com vidrado sob compressão.



Fonte: Adaptação MELCHIADES, 2016

3.6 MEDIÇÃO DE DESVIOS DE PLANARIDADE

A ABNT (2020) prevê que os requisitos dimensionais das placas cerâmicas devem atender ao ensaio estabelecido pela norma ABNT NBR ISO 10545 - parte 2. Este procedimento prevê a utilização do equipamento denominado dataplucômetro, que utiliza relógios comparadores para fazer a medição das dimensões em nove pontos distintos das peças.

De March (2019) aponta que nove pontos de avaliação em uma peça eventualmente são insuficientes para se fazer uma análise precisa da planaridade de peças com formatos acima de 60 cm x 60 cm, uma vez que áreas não inspecionadas podem apresentar deformações, que desta maneira não são contempladas. O mesmo autor destaca que as deformações, que eventualmente as peças possuem, acarretam em um efeito visual insatisfatório quando as mesas são utilizadas em grandes áreas. Muitas peças estão de acordo com a análise dimensional tradicional, com resultados de acordo com a norma vigentes, mas mesmo assim, desagradam clientes.

Por esse motivo, recentemente houve a necessidade de utilização dos braços de medição por coordenadas para o incremento da avaliação das deformações que as placas cerâmicas possam apresentar.

Os braços de medição por coordenadas (BMC) são equipamentos construídos em semelhança com um braço humano, em que o operador faz a inspeção das peças por meio da medição de pontos na superfície da mesma. A máquina é constituída por segmentos unidos por juntas rotativas e possui duas extremidades: uma fixa e outra livre, em que está localizada a ponteira que obtém as coordenadas dos pontos da placa analisada (MADRUGA, 2013). A Figura 7 mostra o equipamento em questão.

Figura 7 - Braço de medição por coordenadas.



Fonte: FARO, 2020

O BMC, dependendo de seu modelo, utiliza tecnologia de triangulação a laser, baseando-se na projeção do laser em determinado ângulo sobre a peça, de maneira que se possa visualizar o perfil do mesmo na imagem capturada e por meio de sua forma seja possível o cálculo da altura de cada um dos pontos medidos. A captura de imagens consecutivas, deslocando a peça ou o laser, possibilita a obtenção da altura de todo o objeto examinado (DE MARCH, 2019).

4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES PRINCIPAIS DOS SISTEMAS

A primeira etapa do desenvolvimento deste trabalho consistiu na caracterização dos componentes típicos de uma placa de porcelanato esmaltado – massa, engobe, esmalte, cobertura – e do esmalto, a fim de identificar e conhecer melhor algumas características e propriedades desses materiais.

Esta etapa foi realizada utilizando-se insumos de produção de uma unidade fabril. Para os dois sistemas, a massa e a cobertura são fatores comuns. Cada um dos componentes possui formulação e parâmetros de moagem específicos para desenvolver as características necessárias ao produto acabado, sendo que são utilizadas na indústria nas seguintes condições:

- Sistema 1 – Massa de porcelanato, engobe, esmalte acetinado e cobertura acetinada;
- Sistema 2 – Massa porcelanato, esmalto e cobertura acetinada.

As matérias-primas utilizadas e suas devidas proporções para a obtenção de cada componente é apresentada na Tabela 1. Os insumos utilizados foram coletados e processados na unidade fabril em que o trabalho foi realizado.

Tabela 1 – Formulações dos insumos utilizados.

Matéria-Prima	Massa	Esmaltobe	Engobe	Esmalte	Cobertura
Argila	64,5	14	22		
Resíduo	4,5				
Feldspato	19,0			13,2	
Nefelina	10,0				
Talco	2,0		2,5		
Albita		18,4		13	12
Alumina			5	2	2,5
Bentonita		1,5	1,5		0,5
Caulim		4,5	5	22	12,5
Dolomita				16	5
Frita A		20			
Frita B					21
Frita C				10,17	42,92
Frita D		10		11	
Frita E			26,27		
Zinco				2	
Quartzo		19,92	25	2	2
Silicato de Zircônio		11	12	7	
Aditivos		0,68	0,73	1,63	1,58
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Fonte: Autora

Ensaio de caracterização química, mineralógica, distribuição de tamanhos de partículas, retração linear e dilatométrica foram realizados com todos os insumos utilizados. Além desses, exclusivamente para a massa, foi realizado o ensaio de fleximetria.

Os insumos foram coletados durante o processo fabril, em sua forma de uso: engobe, esmalte, cobertura e esmaltobe na forma líquida e massa na forma de pó atomizado e placa prensada. O detalhamento de cada ensaio é realizado nos tópicos a seguir.

4.1.1 Caracterização química

A análise química dos componentes – massa, engobe, esmalte, cobertura – antes da etapa de queima, foi realizada pelo método de espectrometria de fluorescência de raios X, para a identificação dos elementos químicos presentes, apresentados em forma de óxidos. Para tanto, foi usado espectrômetro Panalytical, modelo WRFDX AXIOS MAX. As amostras foram preparadas como pérolas fundidas com tetraborato de lítio.

Para a obtenção do pó necessário para a realização do ensaio, os compostos foram secos em estufa a 120 °C até peso constante e destorroados em moinho de bolas laboratorial (marca Servitech, capacidade 1 L) e passados em peneira malha 200 mesh.

4.1.2 Caracterização mineralógica

Os insumos em pó foram analisados mineralogicamente para identificação das fases cristalinas presentes por meio de difração de raios X (DRX) em um difratômetro Phillips X'Pert, com radiação Cu K α , 40 kV, 30 mA, 0,05°, 2 s com uma faixa de 3 a 90°. O banco de dados ICSD (*Inorganic Crystal Structure Database*) foi utilizado para a identificação das fases cristalinas presentes.

Da mesma forma, após a queima, em que se formam diferentes fases cristalinas e um teor de fase amorfa nos componentes, foi realizada análise de difração de raios X (DRX). A quantificação das fases cristalinas foi determinada pelo método de refinamento Rietveld. O refinamento Rietveld foi realizado utilizando software X'PertHighScore Plus® (Philips). Um padrão interno (fluorita) foi utilizado para determinação dos teores de fases cristalinas e amorfa.

4.1.3 Distribuição de tamanhos de partículas

O ensaio de distribuição de tamanhos de partículas foi realizado para a determinação do tamanho médio das partículas após a moagem dos insumos. Por meio de difratometria a laser em equipamento marca CILAS

(modelo 1064) por via úmida, com a utilização de água, utilizando-se 5 g de amostra. As leituras foram feitas na faixa entre 0,04 e 500,00 μm / 100 classes.

4.1.4 Resíduo de moagem

O resíduo de moagem é um parâmetro comumente utilizado na indústria e foi obtido por meio da passagem de 200 mL (volume de um picnômetro) da suspensão aquosa em questão em peneira de malha 325 *mesh* com o auxílio de água corrente. O material que fica retido na malha foi despejado em proveta graduada, em que cada mL corresponde a 1% de resíduo.

4.1.5 Retração linear

Para obter-se os valores de retração linear, os corpos da massa cerâmica foram obtidos a partir de uma porção de peça seca prensada na unidade fabril (prensa hidráulica marca SACMI com 370 KgF/cm² de pressão específica). Os corpos de prova de engobe, esmalto, esmalte e cobertura foram obtidos pelo processo de colagem de suas suspensões aquosas, em moldes cilíndricos de caulim. A queima dos mesmos foi realizada em forno a rolo laboratorial elétrico (marca Servitech, modelo CT-094) queimados a 1190 °C com ciclo de 30 min.

Estas amostras foram medidas antes e depois da queima com paquímetro digital (marca Mitutoyo), sendo o valor calculado de acordo com a seguinte equação:

$$R.Q. = \frac{L_i - L_f}{L_i} * 100 \quad \text{Eq. 7}$$

em que:

R.Q. – retração de queima (%);

L_i – comprimento inicial (mm);

L_f – comprimento final (mm).

4.1.6 Dilatometria

O ensaio de dilatometria para determinação do coeficiente de expansão térmica linear foi realizado em equipamento (marca Netzch, modelo 402 EP microprocessado) por contato com hastes medidoras.

As amostras queimadas provenientes do ensaio de retração linear foram esmerilhadas para apresentarem com comprimento entre 49 e 51 mm e espessura máxima de 6 mm.

4.1.7 Fleximetria óptica

O ensaio de fleximetria óptica da massa foi realizado com corpos de prova obtidos na mesma metodologia do ensaio de piroplasticidade, descrito no item 4.1.7, sendo cortados para a dimensão 80 mm x 5 mm x 5 mm. O equipamento utilizado foi da marca Expert System Solutions (modelo S.R.L Misura Flex ODLT), sendo as leituras realizadas no intervalo de 25 °C até 1170 °C.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE PORCELANATO ESMALTADO ACETINADO

Além da caracterização individual de cada um dos componentes das placas de porcelanato esmaltado acetinado, foi realizada a caracterização de placas produzidas com massa/engobe/esmalte/cobertura e placas produzidas com massa/esmalto/cobertura.

Para os dois tipos de placa, a massa e a cobertura são fatores comuns. Cada um dos componentes possui formulação e parâmetros de moagem específicos para desenvolver as características necessárias ao produto acabado.

Peças prensadas em prensa isostática com pressão de 355 bar, coletadas todas da mesma cavidade, no formato 60 cm x 60 cm, da massa foram coletadas em linha de produção industrial. Os insumos de recobrimento foram moídos em moinho de bolas laboratorial (capacidade de 500 L) para que a variável equipamento de moagem fosse eliminada. O parâmetro de moagem

foi o resíduo em peneira malha 325 *mesh*, na mesma metodologia descrita anteriormente. O peneiramento foi feito em peneira vibratória com malha 150 *mesh*.

Para a aplicação das camadas de recobrimento, realizado em linha de teste piloto, foram controlados o peso específico, o tempo de escoamento e as camadas de cada insumo, de acordo com a ficha técnica padrão de produção de cada tipo de placa. Seis peças de cada condição foram aplicadas. O peso específico foi obtido por meio de picnômetro (marca Servitech) e o tempo de escoamento utilizando-se copo Ford número 4. A queima das peças foi realizada em forno a rolos industrial, com temperatura máxima de queima de 1201 °C e 34 min de ciclo, sendo sempre queimadas na posição central do forno.

As peças produzidas foram caracterizadas por meio dos ensaios análise visual da deformação de planaridade, medição de características dimensionais por meio de dataplucômetro, fleximetria óptica, aferição de brilho superficial e aferição da planaridade em BMC. Esses ensaios estão descritos nas sessões seguintes.

4.2.1 Análise visual da deformação de planaridade

O aspecto superficial ou análise visual está vinculado a norma NBR ISO 10545-2, que classifica como produtos de primeira qualidade aqueles onde 95% das peças examinadas não apresentem defeitos visíveis de superfície na distância de 1,0 m. A análise visual da deformação foi realizada colocando-se três peças, devidamente limpas e secas, sobre uma superfície plana, na mesma posição de entrada no forno durante a queima do produto, e projetando um foco de luz paralelamente sobre a superfície das mesmas. Com as luzes do ambiente apagadas, fez-se a observação, em vários ângulos de observação, das deformidades presentes nas placas. O grau de deformação é classificado como leve, médio ou alto, sendo um critério qualitativo.

4.2.2 Características dimensionais por meio de dataplucômetro

A determinação de características dimensionais das peças geradas foi feita com a utilização do equipamento dataplucômetro marca Gabbrielli, modelo DH23-1600. Trata-se de uma mesa de medição com relógios comparadores (marca Mitutoyo, modelo ID-U1025) que medem comprimento, largura, espessura, ortogonalidade, retitude lateral, curvatura lateral, curvatura central e empenamento da placa cerâmica. O procedimento foi realizado de acordo com a norma NBR ISO 10545-2.

4.2.3 Fleximetria óptica dos sistemas

O ensaio de fleximetria óptica com os sistemas 1 e 2 foi realizado de acordo com procedimento descrito no item 4.1.7, para ser possível a análise do comportamento de deformação das placas durante o processo de queima.

4.2.4 Aferição de brilho superficial

A aferição do brilho superficial foi realizada utilizando-se o aparelho medidor de brilho *Glossmeter* série BE110411, com fontes e receptores com geometria de 20, 60 e 85°, para que fosse possível realizar correlações entre o brilho que a superfície possui e a deformação observada na superfície das peças.

Após a limpeza da superfície da peça e calibração do equipamento para a angulação de 60°, conforme instruções do fabricante, nove pontos por peça foram medidos e avaliados.

4.2.5 Aferição da planaridade em BMC

A aferição da planaridade das placas por meio de braço de medição por coordenadas possibilitou a observação das deformidades por meio de figuras de cores, em que os tons mais vermelhos indicaram curvaturas positivas e os tons azuis indicaram curvaturas negativas. O BMC utilizado foi da marca FARO em conjunto com o *software* CAM2 Measure 10. Após o

posicionamento da placa nos pontos de orientação da mesa do dataplucômetro, a ponteira do *laser* do braço fez a leitura da superfície da peça por meio de movimentos de vai e vem permitindo a captação de todos os pontos definidos na nuvem de pontos determinada pelo software.

O tratamento das imagens geradas foi feito por meio do *GOM Software 2021* versão *Inspect Pro* para teste.

4.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental deste trabalho foi realizado visando a avaliação da influência de alguns fatores no desvio da planaridade das placas de porcelanato, considerando o exposto por Gennari *et al.* (2012), que elenca que retração de queima e camada de aplicação do engobe são fatores que mais tem influência da curvatura de peças cerâmicas. O esmalto é um composto que vem crescendo em consumo na unidade industrial onde deu-se a realização do trabalho, sendo apresentado como alternativa de produção na substituição do engobe e do esmalte na fabricação de placas cerâmicas de porcelanato esmaltado.

A Tabela 2 mostra os fatores e os níveis que serão variados:

Tabela 2 – Fatores e níveis para avaliação da planaridade de placas de porcelanato esmaltado acetinado produzidas com esmalto.

Fatores	Níveis		
	-1	0	1
Retração de Queima (%)	6,02	8,35	10,36
Camada de Aplicação (g)	180	190	200

Fonte: Autora

Os níveis do fator camada de aplicação foram definidos baseados na camada utilizada na unidade fabril onde as peças foram produzidas, sendo o nível 0 a camada padrão de aplicação do esmalto, demonstrada no item 5.2. Os níveis -1 e +1 foram definidos de acordo com as tolerâncias estabelecidas pela unidade fabril.

Os níveis do fator retração de queima foram definidos tendo como ponto central a retração obtida no esmalto com resíduo de moagem dentro do intervalo padrão da unidade fabril, conforme será demonstrado no item 5.1.5. A retração de queima foi variada indiretamente a partir da alteração dos resíduos de moagem, alterados através de tempo de moagem, pois influenciam diretamente na fundência dos componentes. Os níveis -1 e +1 foram definidos avaliando-se os resultados de retração, obtidos através da metodologia exposta no item 4.1.5, definindo-se uma diferença de aproximadamente 2% entre cada nível.

Obteve-se, portanto, um planejamento fatorial do tipo 2^2 , com três pontos centrais, e os experimentos conforme Tabela 3:

Tabela 3 – Experimentos a serem realizados para verificação da planaridade das peças com esmalto.

Níveis/Fatores	Prova	Retração de Queima (%)	Camada de Aplicação (g)
-1 e -1	P1	6,02	180
-1 e +1	P2	6,02	200
+1 e -1	P3	10,36	180
+1 e +1	P4	10,36	200
0 e 0		8,35	190
0 e 0	P5	8,35	190
0 e 0		8,35	190

Fonte: Autora

Analisando-se o tipo de planejamento, 2^2 e as oito superfícies a serem avaliadas, foram produzidas industrialmente 42 placas, na mesma metodologia descrita no item 4.2, para avaliação, sendo que todas elas foram caracterizadas de acordo com os mesmos procedimentos descritos, também, no item 4.2. As variáveis de resposta analisadas, por meio de análise estatística, foram brilho, fleximetria, planeza e dados tratados das imagens escaneadas pelo BMC.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS INSUMOS UTILIZADOS

5.1.1 Caracterização química

Os resultados de caracterização química de cada insumo utilizado encontram-se na Tabela 4. Observa-se que a massa é composta de óxidos típicos para a produção de porcelanato. Engobe, esmalte e esmalto possuem composição com os mesmos óxidos, apenas com variações nas quantidades. A cobertura possui uma composição típica de cobertura acetinada, contendo sílica, alumina, óxidos de cálcio, zircônio, sódio e magnésio em menores quantidades.

Tabela 4 – Análise química dos insumos utilizados.

	Massa	Engobe	Esmalte	Cobertura	Esmaltobe
Óxido	Quantidades (%)				
Al ₂ O ₃	18,17	14,57	15,50	18,64	12,55
CaO	0,75	2,82	11,04	10,20	5,11
Fe ₂ O ₃	2,47	0,19	0,19	0,12	0,14
K ₂ O	3,10	1,37	1,31	1,62	1,02
MgO	0,76	1,36	4,57	3,10	0,71
MnO	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
Na ₂ O	2,48	1,74	2,20	3,16	2,25
P ₂ O ₅	0,05	0,28	0,28	0,17	0,27
SiO ₂	67,86	61,55	43,50	48,37	62,90
TiO ₂	0,41	0,18	0,00	0,00	0,17
BaO		0,00	0,25	5,84	1,62
Cr ₂ O ₃		0,00	0,00	0,00	0,00
PbO		0,00	0,00	0,00	0,00
SrO		0,00	0,00	0,00	0,00
ZnO		0,00	0,06	0,08	0,06
ZrO ₂ /Hf		0,00	3,57	4,13	1,00
B ₂ O ₃		13,09	5,88	0,00	9,66
Li ₂ O		0,00	0,00	0,00	0,00
P.F	3,88	3,00	11,62	4,53	2,53

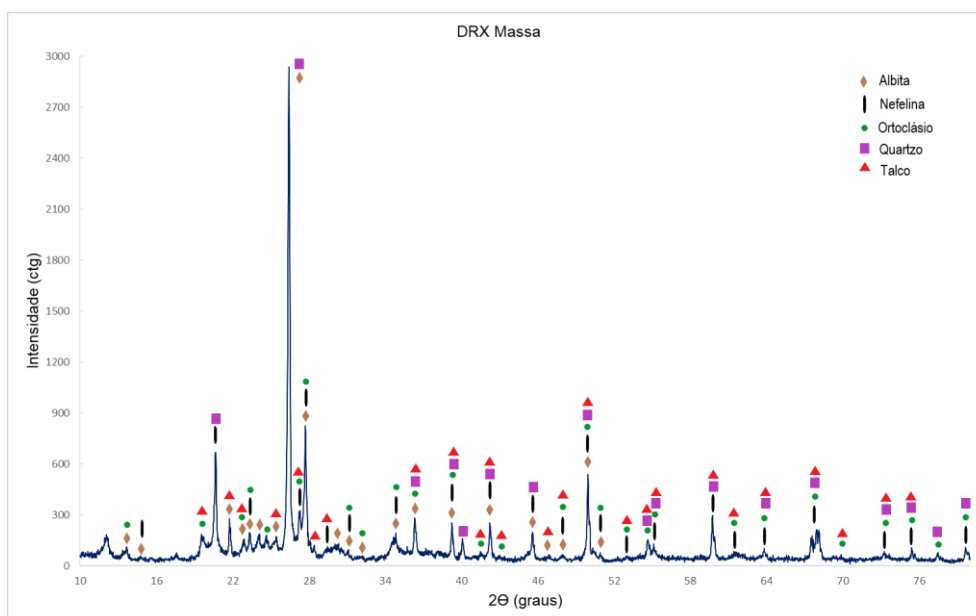
Fonte: Autora

5.1.2 Caracterização mineralógica

As análises das fases cristalinas presentes nos insumos, após a homogeneização das formulações pelo processo de moagem, antes da etapa de queima, são apresentadas nas Figuras 09 a 13.

Na Figura 8 apresentam-se os resultados obtidos do DRX da massa de porcelanato esmaltado. Observa-se a presença das fases cristalinas albita, nefelina, ortoclásio, quartzo e talco. As fases encontradas estão condizentes com as matérias-primas utilizadas na formulação da massa em questão, que são uma mistura de argilas, talco, nefelina e feldspato.

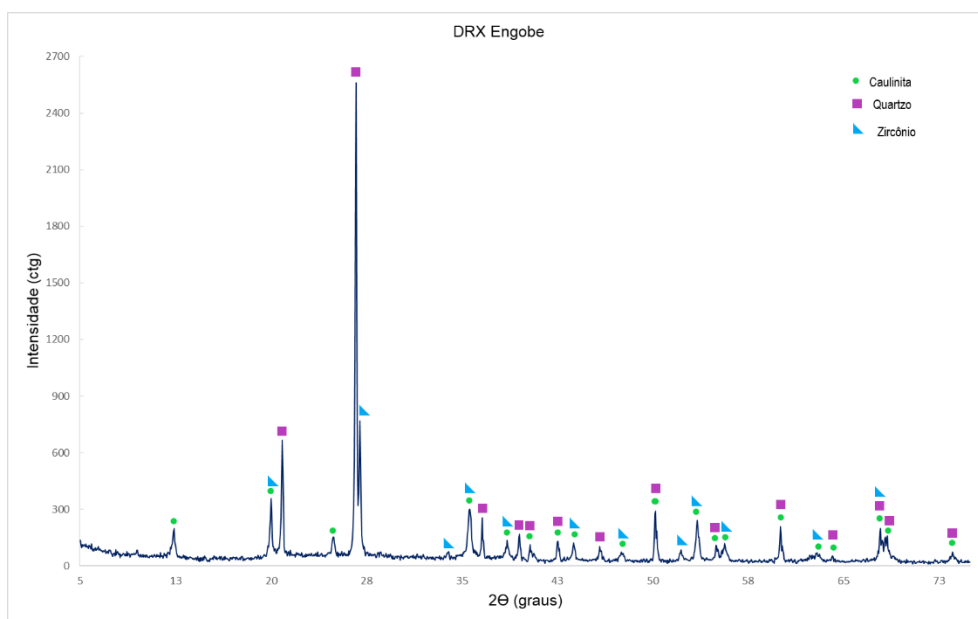
Figura 8 – Gráfico de difração de raios X da massa crua.



Fonte: Autora

A Figura 9 mostra os resultados do DRX do engobe. As fases presentes encontradas foram caulinita, quartzo e zircônio, condizentes com a análise química apresentada no item 5.1.1, em que este insumo apresentou 61,5% de sílica e 13% de óxido de zircônio. Estas fases também estão coerentes de acordo com as matérias-primas utilizadas na formulação do engobe: argila, caulim, frita, quartzo e zircônio.

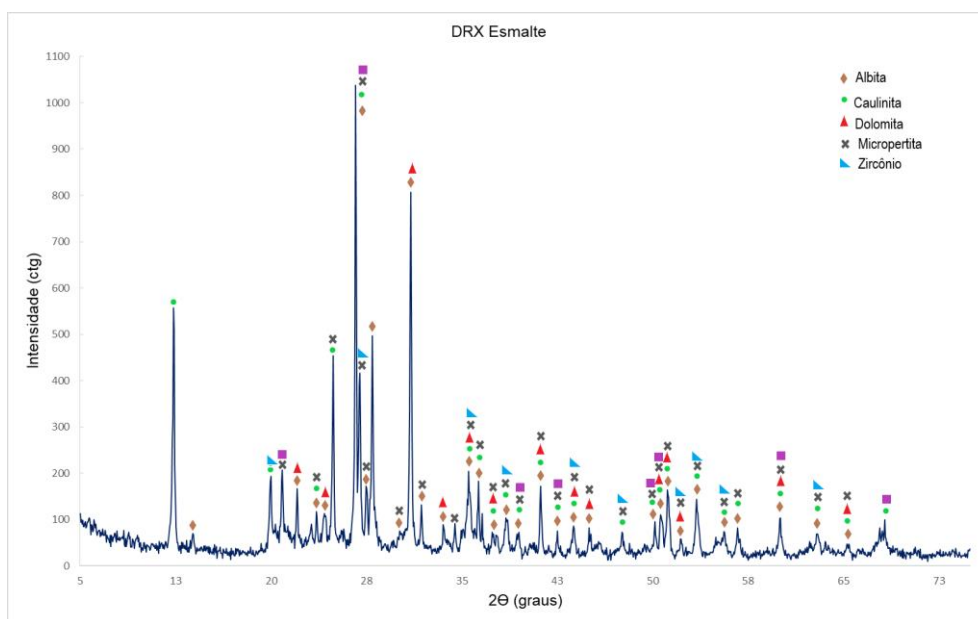
Figura 9 – Gráfico de difração de raios X do engobe cru.



Fonte: Autora

As fases encontradas no esmalte, de acordo com a Figura 10, foram albita, caulinita, dolomita, micropertita e silicato de zircônio. Considerando que a formulação deste esmalte é uma mistura de albita, caulim, feldspato, dolomita, frita, alumina, zircônio, zinco e quartzo, todas as fases encontradas estão de acordo com o esperado.

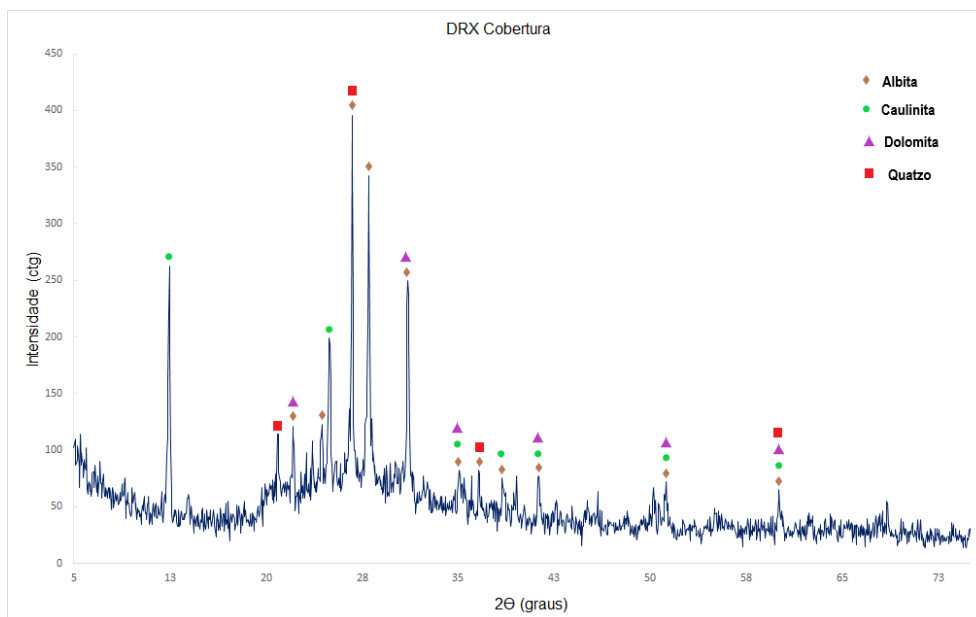
Figura 10 – Gráfico de difração de raios X do esmalte cru.



Fonte: Autora

A cobertura utilizada trata-se de um esmalte com transparência necessária para não esconder o desenho da decoração digital do produto, sendo composta por uma mistura de albita, caulim, dolomita, feldspato, frita, zinco e zircônio. Desta forma, as fases demonstradas na Figura 11, albita, caulinita, dolomita e quartzo, são as esperadas para a análise deste material.

Figura 11 – Gráfico de difração de raios X da cobertura crua.



Fonte: Autora

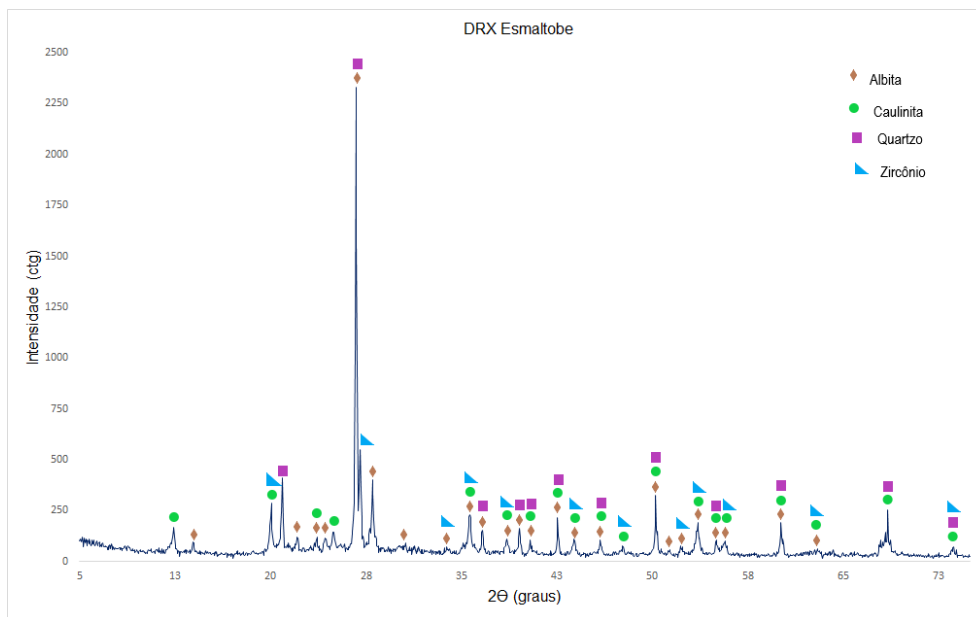
A Figura 12 mostra os resultados de DRX do esmalto, que constitui uma composição de albita, argila, caulim, fritas, quartzo e zircônio. As fases encontradas foram albita, caulinita, quartzo e zircônio, todas coerentes com as matérias-primas da composição.

Levando-se em consideração que o esmalto é um insumo com características de engobe e esmalte num mesmo composto, o esperado é que o mesmo possua fases presentes de ambos os produtos. De fato, a albita presente no esmalto também está presente no engobe, a caulinita e o silicato de zircônio também estão presentes no engobe e no esmalto, e o quartzo foi encontrado no engobe.

Comparando-se as Figuras 9 e 12, que são respectivamente do engobe e do esmalto, observa-se a mesma tendência das reflexões. Além das mesmas fases do engobe, o esmalto possui a fase albita, pois possui

esta matéria-prima em sua formulação. A diferença básica entre as formulações de engobe e do esmalto está na presença de albita no esmalto e também nas fritas utilizadas em cada composição, que são diferentes.

Figura 12 – Gráfico de difração de raios X do esmalto cru.



Fonte: Autora

5.1.3 Distribuição de tamanhos de partículas

A Tabela 5 demonstra os resultados das distribuições de tamanhos de partículas dos insumos utilizados. Na distribuição acumulada do tamanho de partículas da massa, nota-se um diâmetro máximo encontrado de 71 μm . O diâmetro médio da amostra foi de 14,71 μm .

Tabela 5 - Distribuição de tamanhos de partículas dos insumos utilizados.

	Massa	Engobe	Esmalte	Cobertura	Esmalto
Diâmetro Máximo (μm)	71,00	45,00	45,00	56,00	56,00
Diâmetro Médio (μm)	14,71	10,45	9,82	12,95	12,69

Fonte: Autora

Para o engobe, a distribuição do tamanho de partículas, segundo a Figura 20, apresenta diâmetro máximo encontrado de 45 μm . O diâmetro médio da amostra foi de 10,45 μm .

Para o esmalte, o diâmetro máximo das partículas, igual ao engobe, foi de 45 μm , porém com um diâmetro médio de 9,82 μm .

Na cobertura, o tamanho máximo do diâmetro das partículas foi de 56 μm e um diâmetro médio de 12,95 μm .

Observa-se, para o esmalto, diâmetro máximo encontrado de 56 μm , com tamanho médio das partículas em 12,69 μm , valores bastante similares aos encontrados na cobertura também.

5.1.4 Resíduo de moagem

A Tabela 6 demonstra os valores de resíduo de moagem dos componentes superficiais dos sistemas 1 e 2, em comparação com as faixas padrão estabelecidas pela unidade fabril. Observa-se que a moagem das amostras coletadas para a caracterização encontra-se de acordo com os padrões fabris estabelecidos.

Tabela 6 – Resíduos de moagem dos insumos utilizados.

	Engobe	Esmalte	Cobertura	Esmaltobe
Padrão Fabril (%)	0,2 a 0,5	0,5 a 1,0	2 a 3,0	2 a 3,0
Resíduo (%)	0,4	1,0	2,6	2,8

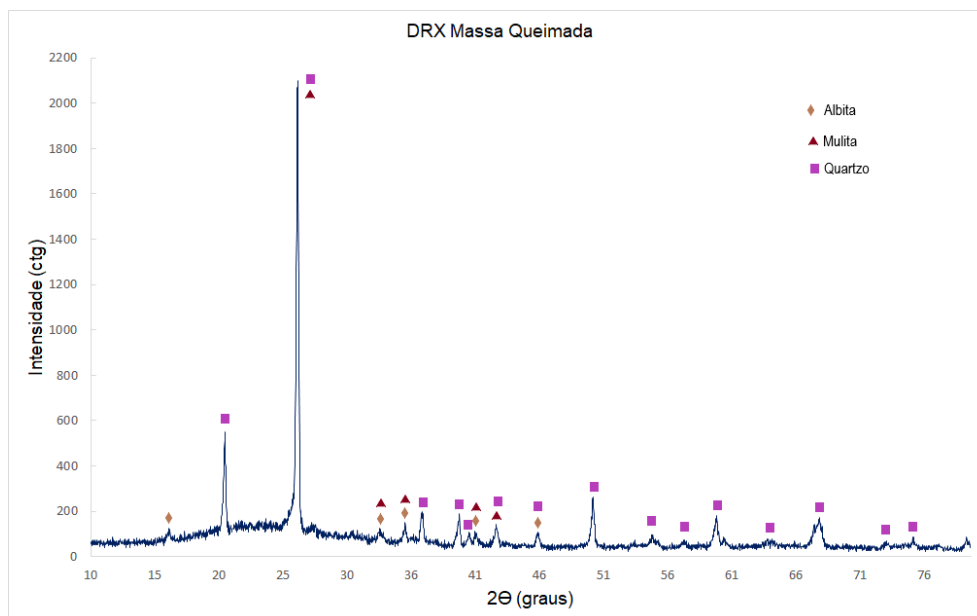
Fonte: Autora

5.1.5 Caracterização mineralógica após a queima

Análises de DRX foram realizadas com as amostras após o processo de queima, em forno laboratorial com temperatura máxima de 1190 $^{\circ}\text{C}$ por 30 min, utilizando-se os corpos de prova provenientes do teste de retração linear. De acordo com testes preliminares realizados na unidade fabril, este ciclo térmico é correspondente ao ciclo térmico industrial. Os resultados estão apresentados nas Figuras 19 a 23. Na Tabela 6 são expostas as quantificações das fases cristalinas e do teor de amorfo encontrados.

A Figura 13 apresenta as fases cristalinas formadas após a queima da massa. As fases cristalinas resultantes identificadas foram a albita, a mulita e o quartzo, fases consideradas esperadas para massas de porcelanato, de acordo com Zanelli *et. al.* (2019), que as nomeiam como fases refratárias persistentes.

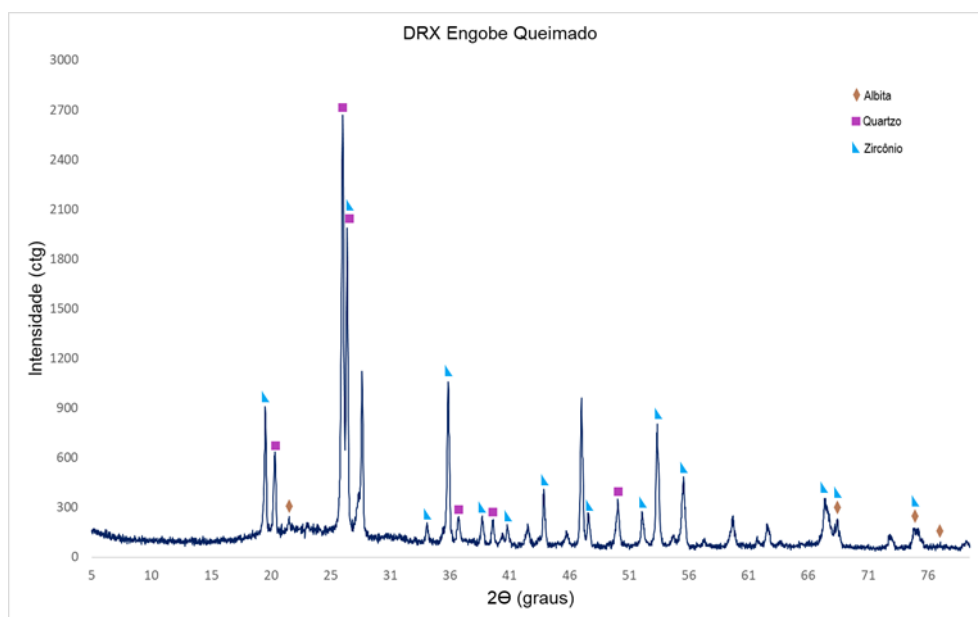
Figura 13 – Gráfico de difração de raios X da massa queimada.



Fonte: Autora

Para o engobe, apresentado na Figura 14, puderam ser identificados e quantificados, após a queima, 21,22% de albita, 2,28% de mulita, 28,22% de quartzo, 16,96% de zircônio e 33,36% de fase amorfa.

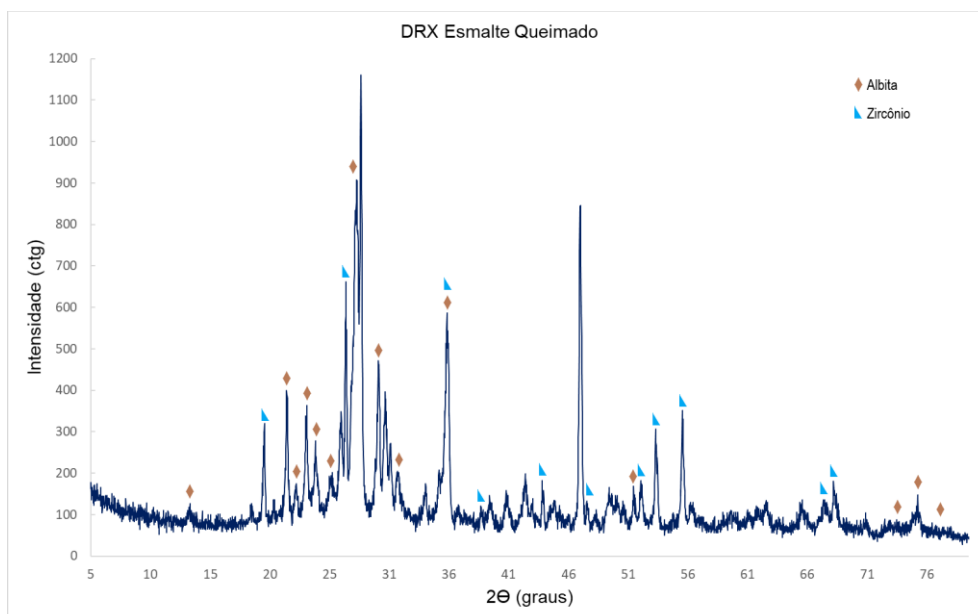
Figura 14 - Gráfico de difração de raios X do engobe queimado.



Fonte: Autora

A Figura 15 mostra os resultados do DRX do esmalte. Este apresentou 35,69% de albita, 1,99% de quartzo, 3,82% de zircônio e 58,44% de fase amorfa.

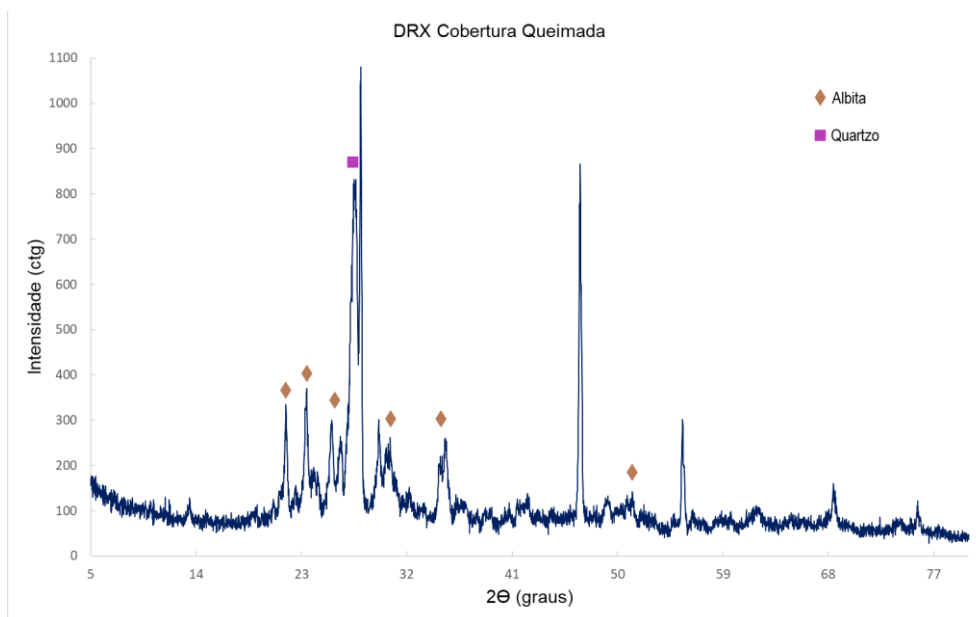
Figura 15 – Gráfico de difração de raios X do esmalte queimado.



Fonte: Autora

A análise de DRX da cobertura após o processo de queima, observado na Figura 16, mostra as fases cristalinas resultantes, que são a albita e o quartzo. A quantificação das fases resultou em 51,32% de albita, 31,52% de quartzo e 29,49% de fase amorfa.

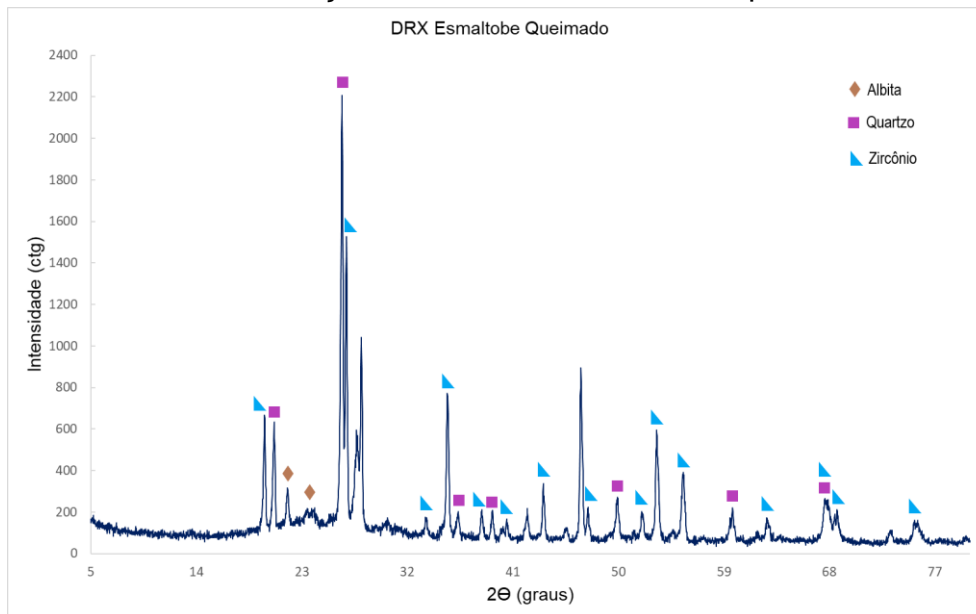
Figura 16 – Gráfico de difração de raios X da cobertura queimada.



Fonte: Autora

No esmalto após a queima, conforme Figura 17, foram identificados e quantificados 32,73% de albita, 27,15% de quartzo, 12,63% de zircônio e 27,41% de fase amorfa.

Figura 17 – Gráfico de difração de raios X do esmalto queimado.



Fonte: Autora

Ao observar a comparação das quantificações das fases cristalinas presentes, mostradas na Tabela 7, quando se compara esmalte, engobe e esmalto, percebe-se que a quantidade de fase amorfa é a principal diferença entre os insumos. O esmalte possui aproximadamente 58% de fase amorfa, enquanto o esmalto possui aproximadamente 27%. O quartzo, por sua vez tem aproximadamente 27% no esmalto, enquanto apenas aproximadamente 2% no esmalte. Tais diferenças na composição das fases cristalinas podem trazer resultados de características e propriedades diferentes nos vidrados formados após a queima.

Tabela 7 - Quantificação das fases cristalinas dos insumos utilizados.

Fase	Quantitativo (%)				
	Massa	Engobe	Esmalte	Cobertura	Esmaltobe
Quartzo	27,99	28,22	1,99	19,11	27,15
Albita high	12,29	21,22	35,69	51,32	32,73
Silicato de Zircônio		16,96	3,82		12,63
Mulita	5,05	2,28			
Amorfa	30,82	33,36	58,44	29,49	27,41
Qualidade do ajuste	2,2	2,1	4,1	5,0	2,2

Fonte: Autora

5.1.6 Retração linear

Os resultados da retração linear de queima dos insumos são apresentados na Tabela 8. Os resultados são referentes a média, após a medição e desvio padrão de 16 corpos de prova.

Tabela 8 – Retração linear dos insumos utilizados.

	Massa	Engobe	Esmalte	Cobertura	Esmaltobe
Retração de Queima (%)	6,88 ±0,22	8,13 ±0,29	14,70 ±0,24	9,18 ±0,55	8,35 ±0,33

Fonte: Autora

Analisando-se as retrações, observa-se que o engobe e o esmaltobe possuem retrações lineares bastante similares, nos valores de 8,13 e 8,35% respectivamente. Apesar de em sua composição química, o esmaltobe possuir em torno de 2% a menos de Al_2O_3 , 0,5% a mais que Na_2O e 2% a mais de CaO que o engobe, o que tornaria o composto mais fundente (PRACIDELLI, 2008) e com tendência a maior retração, isso não ocorre, pois, o tamanho médio de partículas do esmaltobe é em torno de 2 μm maior que o do engobe. A diferenciação neste tamanho de partículas se dá devido à diferença entre as faixas de resíduo, determinada pela unidade fabril, dos dois compostos.

Esta similaridade de retração também pode ser justificada, uma vez que os dois compostos possuem as mesmas fases cristalinas presentes após a

queima (albita, quartzo e zircônio) e com quantidades basicamente iguais, de acordo com a Tabela 6. O esmalto possui um pouco menos de fase amorfa, mas uma quantidade um pouco maior de albita.

A alta retração apresentada pelo esmalte pode ser explicada pela quantidade relativamente elevada de elementos modificadores de rede como o CaO, o Na₂O e o ZnO, que afetam a fusibilidade dos vidrados (PRACIDELLI, 2008). Além disso, de acordo com a quantificação de fase amorfas apresentada na Tabela 6, o esmalte é o composto com a maior quantidade desta fase, com quase 60% de fase amorfa.

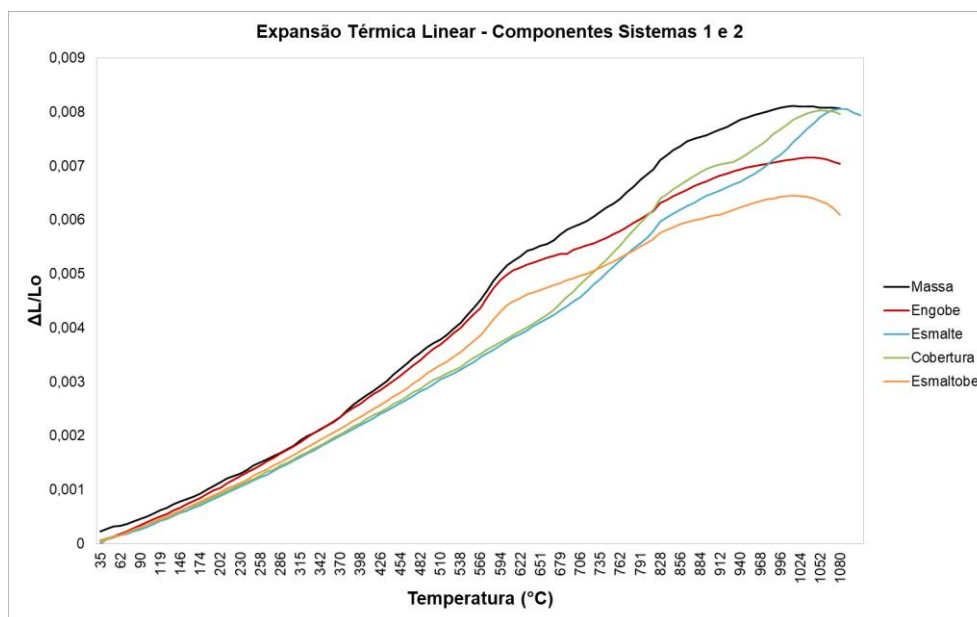
Considerando que a retração linear foi um dos fatores usados para fazer parte do planejamento experimental, mais especificamente, a retração linear do esmalto, o valor encontrado de retração para este composto, que foi de 8,35%, foi estabelecido como nível 0 para este fator. A partir disso, os valores de níveis +1 e -1 foram determinados, com variação de 2% aproximadamente entre os níveis 1 e o nível 0.

5.1.7 Expansão térmica linear

O ensaio de determinação do coeficiente de expansão térmica linear de um material é utilizado para a determinação da variação de dimensão de acordo com a variação de temperatura que o mesmo é submetido. O equipamento utilizado é o dilatômetro, que é capaz de fornecer curvas de dilatação, onde se pode relacionar a variação de tamanho e a temperatura em que a mesma ocorre (CARTER; NORTON, 2013; RICHERSON, 1992; BARBA *et al.*, 1997).

A Figura 18 demonstra a variação da expansão térmica de todos os componentes utilizados na produção de placas de porcelanato esmaltado deste trabalho.

Figura 18 – Gráfico dos valores de expansão térmica linear dos insumos utilizados.



Fonte: Autora

Observando-se a Figura 18, nota-se que o engobe e o esmaltobe possuem comportamentos similares, com a diferença que o esmaltobe possui uma menor variação de dimensão, o que resulta em um menor valor de α em relação ao mesmo coeficiente do engobe, fato este que pode ser observado na Tabela 9.

Os valores de α para cada componente da placa de porcelanato esmaltado apresentados na Tabela 9 são os avaliados na faixa de temperatura entre 25 e 325 °C.

Tabela 9 – Coeficiente de expansão térmica linear dos insumos utilizados.

	Massa	Engobe	Esmalte	Cobertura	Esmaltobe
Dilatação ($\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)	6,63	6,57	5,77	5,63	5,93

Fonte: Autora

A determinação dos coeficientes de expansão térmica dos insumos que são utilizados na produção da placa de revestimento cerâmico é importante para a previsão das tensões que se estabelecerão entre as camadas da peça quando o vidrado passa do estado de amolecimento para o

estado rígido, durante o resfriamento. As tensões podem ser de tração ou compressão e são causadas pelas diferenças de coeficientes de dilatação. Se o α do vidro for maior que o α da massa, o esmalte encontra-se sob tração, resultando em uma curvatura côncava da peça. Se o α do vidro for menor que o α da massa, o esmalte encontra-se sob compressão, resultando em uma curvatura convexa da peça. Como os esmaltes cerâmicos possuem resistência à compressão em torno de 15 vezes maior que a resistência à tração, o coeficiente de dilatação da massa deve ser superior ao coeficiente de dilatação do vidro (MATTHES, 1990; PRACIDELLI, 2008).

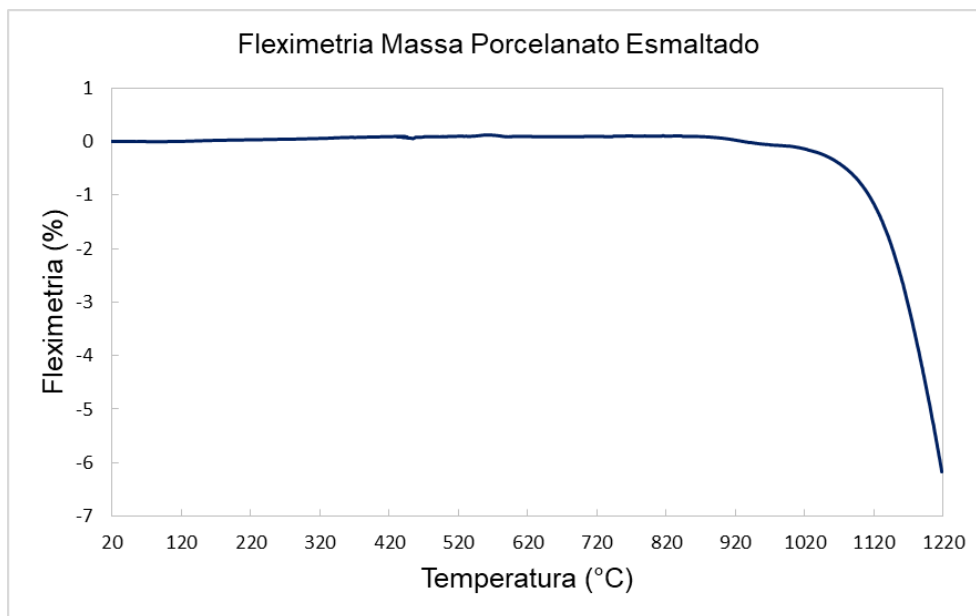
Considerando este exposto, pode-se dizer que os valores de coeficientes de expansão térmica linear dos insumos utilizados para a obtenção das placas de porcelanato esmaltado acetinado deste trabalho, conforme a Tabela 9, estão de acordo para resultar em um estado de compressão nas camadas de recobrimento, conseqüentemente apresentando uma curvatura convexa após a queima. Para as placas do sistema 1, massa e engobe, com valores similares, apresentam valores de α maiores que os valores de α do esmalte e cobertura. Já para as placas do sistema 2, a massa possui α maior que o α das camadas de recobrimento esmalto e cobertura.

5.1.8 Fleximetria óptica da massa

Na Figura 19, pode-se constatar a curva fleximétrica da massa de porcelanato. O valor de fleximetria encontrado para a temperatura de 1190 °C foi de -4,32%, para a temperatura de 1200°C foi de -4,96% e para a temperatura de 1210 °C foi de -5,66%.

A tendência é do ensaio é que, com o aumento da temperatura a deformação da massa fica mais acentuada no sentido da gravidade, uma vez que o corpo de prova fica sobre dois apoios laterais com o centro livre.

Figura 19 – Gráfico de fleximetria da massa de porcelanato esmaltado.



Fonte: Autora

5.2 CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE PORCELANATO OBTIDAS PELO SISTEMA 1¹ E SISTEMA 2²

Os resultados apresentados neste item são referentes às condições padrão das placas do sistema 1 e do sistema 2, de acordo com o processo produtivo da unidade fabril onde foram realizados os experimentos. O biscoito seco de massa de porcelanato foi fator comum entre os sistemas, sendo sempre coletado da mesma cavidade da prensa, no formato 60 cm x 60 cm. A cobertura também foi a mesma para ambos os casos, inclusive com a mesma camada de aplicação. Este insumo é utilizado em ambos os sistemas para evitar o desgaste das tintas de decoração digital, sendo responsável pelo desempenho de desgaste dos produtos e é o composto que confere a textura acetinada do produto.

Na Tabela 10 são apresentados os valores e tolerâncias utilizados para camada de aplicação, densidade e viscosidade dos insumos de recobrimento.

¹ Placas produzidas com massa/ engobe/ esmalte/ cobertura

² Placas produzidas com massa/ esmalto/ cobertura

Tabela 10 – Parâmetros de aplicação conforme padrão fabril das camadas de recobrimento utilizadas para a produção das placas de porcelanato esmaltado acetinado avaliadas.

Composto	Camada (g)	Tempo de escoamento (s)	Densidade (g/mL)
Engobe	110 ±2	48 ±5	1,82 ±0,03
Esmalte	90 ±2	45 ±5	1,83 ±0,03
Cobertura	65 ±2	50 ±5	1,80 ±0,03
Esmaltobe	190 ±2	45 ±5	1,83 ±0,03

Fonte: Autora

5.2.1 Análise visual da deformação de planaridade

A análise visual das placas pode ser observada na Figura 20, onde as peças do lado esquerdo correspondem as peças do sistema 1 e as do lado direito as peças do sistema 2.

Observa-se, contra o reflexo da luz, que as peças com engobe e esmalte (sistema 1) apresentam as bordas mais deformadas que as peças com esmaltobe (sistema 2). As peças do sistema 1 foram classificadas com deformação lateral média; as peças do sistema 2 com deformação lateral leve.

Figura 20 – Análise visual das peças do sistema 1 *versus* sistema 2



Observador

Fonte: Autora

Esta análise visual possibilita a constatação de que as camadas de recobrimento têm bastante influência na visualização da deformação de placas cerâmicas, uma vez que a massa dos dois sistemas é fator comum.

O fato de que as peças produzidas com esmaltoabe apresentam diminuição na percepção do defeito na observação visual faz com que seja necessário o entendimento do porque este fenômeno ocorre.

Uma característica importante pode ser percebida durante as análises e constatada na Figura 20: além da deformação propriamente dita das placas, o brilho também parece afetar, neste caso, a percepção de deformação.

5.2.2 Características dimensionais por meio de dataplucômetro

As características dimensionais medidas, que estão relacionadas com a planaridade da placa cerâmica, e que possuem especificações de acordo com a ABNT (2020) foram o empeno, a curvatura central e a curvatura lateral, cujos resultados são apresentados na Tabela 11. Os valores máximos e mínimos consideraram as leituras de 6 peças de cada sistema.

Tabela 11 – Características dimensionais das placas do sistema 1¹ e sistema 2².

	Empeno		Curvatura Lateral		Curvatura Central	
	Mín.(mm)	Máx.(mm)	Mín.(mm)	Máx.(mm)	Mín.(mm)	Máx.(mm)
Sistema 1	-0,29	0,63	-0,10	0,59	-0,07	1,25
Sistema 2	-0,33	0,55	0,04	0,46	0,44	0,87
Padrão ABNT (2020)	-2,00	2,00	-2,00	2,00	-2,00	2,00

¹ Placas produzidas com massa/ engobe/ esmalte/ cobertura

² Placas produzidas com massa/ esmaltoabe/ cobertura

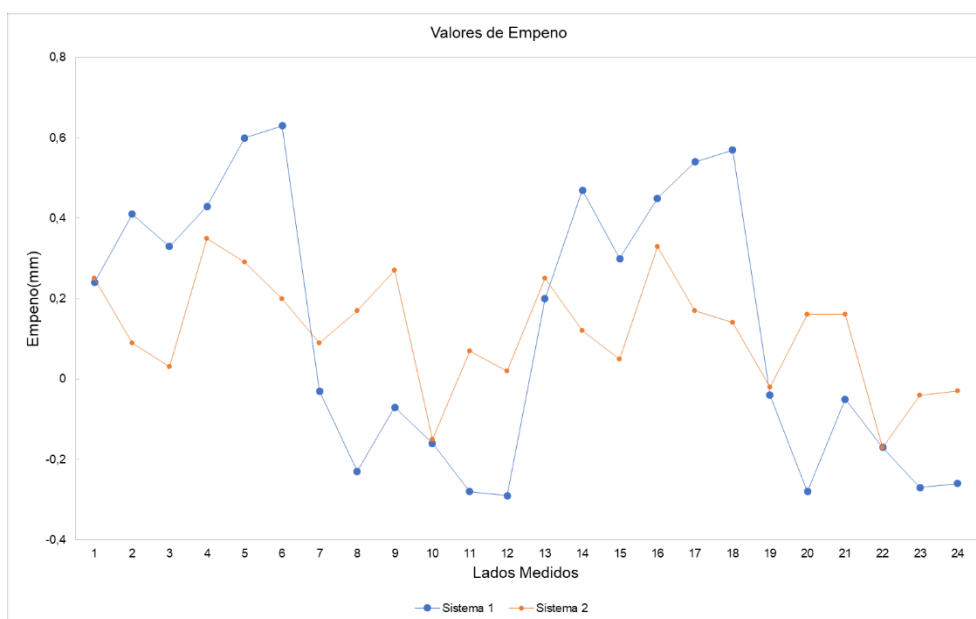
Fonte: Autora

Os resultados obtidos demonstram que ambas as condições estão de acordo com as especificações da ABNT (2000), com as placas do sistema 2

apresentando, no geral, resultados melhores que as placas do sistema 1, comparando-se os resultados individuais de valores máximos e resultados individuais de valores mínimos de cada uma das características avaliadas. Esta tendência também pode ser observada nas Figuras 21 a 23 que expõem os gráficos com todos os valores adquiridos nas medições dos relógios comparadores para cada característica.

A Figura 21 apresenta os valores de empeno encontrados para todos os lados de todas as peças ensaiadas. Nota-se que as placas do sistema 2 apresentam pontos com menor amplitude de variação, e com valores mais próximos de zero, o que indica que é deformação menor se comparado com as placas do sistema 1 no quesito empeno.

Figura 21 – Gráfico dos valores de empeno do sistema 1¹ e sistema 2².



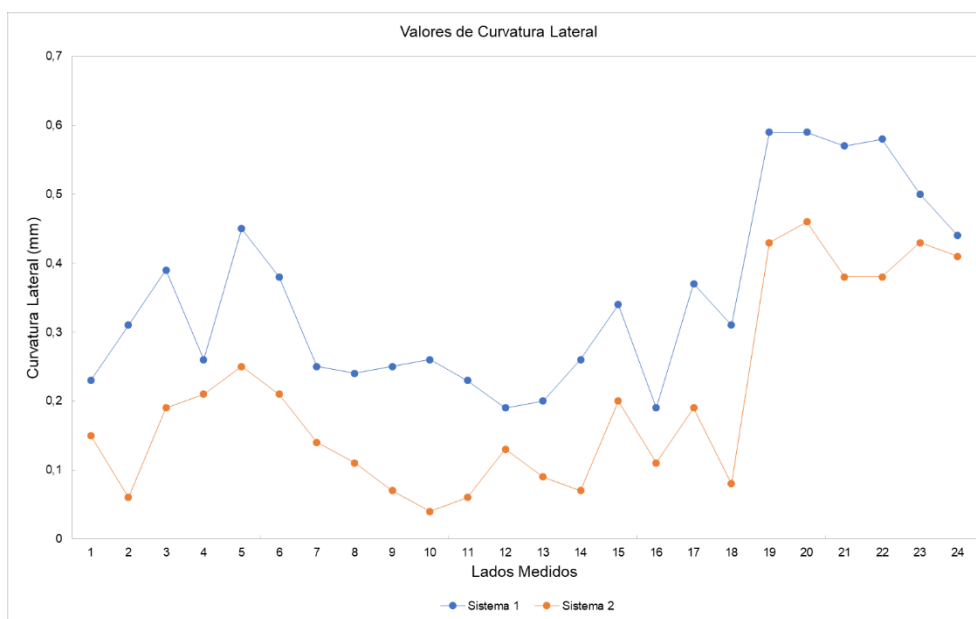
¹ Placas produzidas com massa/ engobe/ esmalte/ cobertura

² Placas produzidas com massa/ esmalto/ cobertura

Fonte: Autora

A Figura 22 mostra os valores de curvatura lateral determinados a partir da medida de todos os lados de todas as peças ensaiadas. Os dois sistemas apresentam os pontos com a mesma tendência de comportamento. A diferença é que os valores obtidos para as peças do sistema 2 ficaram mais próximos de zero, o que indica que estão com a curvatura lateral mais plana que as peças do sistema 1, sendo assim menos deformadas neste quesito.

Figura 22 – Gráfico dos valores de curvatura lateral do sistema 1¹ e sistema 2²



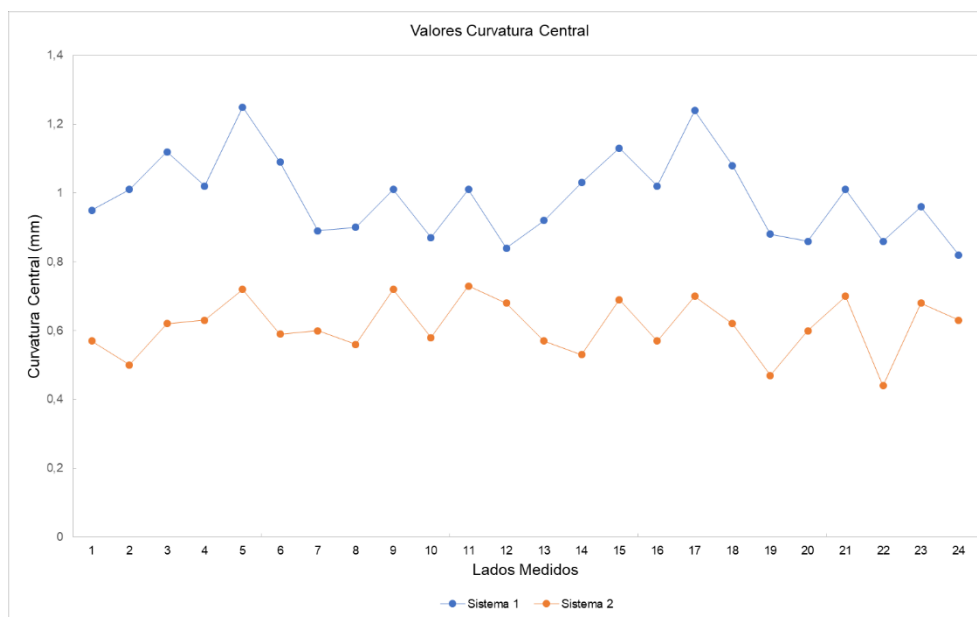
¹ Placas produzidas com massa/ engobe/ esmalte/ cobertura

² Placas produzidas com massa/ esmalto/ cobertura

Fonte: Autora

Na Figura 23 são apresentados os valores obtidos para a curvatura central. Os valores obtidos para as peças do sistema 2 ficaram mais próximos de zero, o que indica que estão com a curvatura central mais plana que as peças do sistema 1, sendo assim menos deformada neste quesito.

Figura 23 – Gráfico dos valores de curvatura central do sistema 1¹ e sistema 2².



¹ Placas produzidas com massa/ engobe/ esmalte/ cobertura

² Placas produzidas com massa/ esmalto/ cobertura

Fonte: Autora

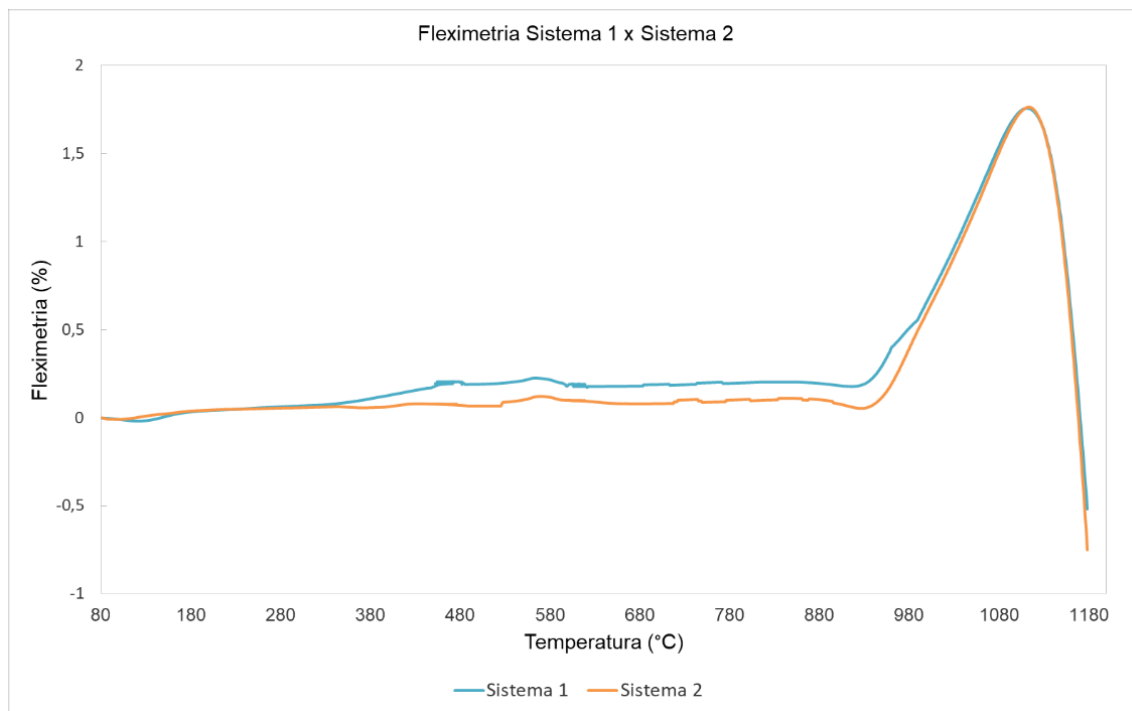
De qualquer forma, esta variação não é suficiente para dizer que um sistema é realmente menos deformado do que o outro. Isto porque o ensaio faz a leitura em somente 1 ponto da peça para cada característica avaliada, e esta quantidade de pontos é insuficiente para se fazer uma análise precisa da planaridade de peças com formatos acima de 60 cm x 60 cm. (DE MARCHI, 2019)

Apesar da conformidade em ambos os sistemas com a norma, esta avaliação, por vezes, não é suficiente para garantir a satisfação de clientes, que avaliam as peças de forma visual.

5.2.3 Fleximetria óptica dos sistemas

A Figura 24 mostra a comparação dos resultados obtidos no ensaio de fleximetria óptica para os sistemas 1 e 2.

Figura 24 – Gráfico de fleximetria óptica das peças do sistema 1¹ e sistema 2².



¹ Placas produzidas com massa/ engobe/ esmalte/ cobertura

² Placas produzidas com massa/ esmalto/ cobertura

Fonte: Autora

Pode-se observar que os dois sistemas possuem a mesma tendência de comportamento, porém com alguma diferença na curvatura durante o processo. Até a temperatura de 300 °C, aproximadamente, os dois sistemas possuem praticamente os mesmos valores de flexão. Porém, após essa temperatura até 900 °C, aproximadamente, o sistema 1 começa a apresentar uma curvatura convexa, enquanto o sistema 2 mantém-se relativamente alinhado. Entre 900 e 1000 °C, ambos os sistemas apresentam curvatura convexa, com o sistema 2 apresentando, ainda, menores deformações, ou seja, melhores resultados. Após 1000 °C, os dois sistemas continuam apresentando o mesmo comportamento e com resultados de flexão bastante próximos, e mudando sua curvatura para côncavo.

A curvatura convexa apresentada durante o ensaio está relacionada às diferenças dos valores de coeficiente de expansão térmica, onde as peças se apresentam sob compressão. Nas placas produzidas com engobe e esmalte, os coeficientes de expansão da massa ($6,63 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) e do engobe ($6,57 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) são similares e maiores que os coeficientes do esmalte ($5,77$

$\times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) e da cobertura ($5,63 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$). Nas placas com esmalto, a massa possui a dilatação maior que o esmalto ($5,93 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) e a cobertura. Portanto, os dois sistemas estão sob compressão, como previsto, apresentando curvaturas convexas, o que também foi verificado na medição das características dimensionais por meio do dataplucômetro.

No geral, ao longo de todo o procedimento, as placas produzidas com esmalto apresentam melhores resultados de flexão, coincidindo com a mesma avaliação das características dimensionais apresentadas no item 5.2.4.

5.2.4 Aferição de brilho superficial

A aferição do brilho superficial se deu com a medida de 9 pontos em cada uma de seis peças de cada sistema. A medida desta característica é importante de ser avaliada pois influencia diretamente na percepção do nível de deformação da peça. A Tabela 12 mostra os resultados obtidos em cada sistema.

Tabela 12 – Brilho superficial das peças do sistema 1¹ e sistema 2².

	Brilho (UB)
Sistema 1	11,34 \pm 0,43
Sistema 2	8,19 \pm 0,58

¹ Placas produzidas com massa/ engobe/ esmalte/ cobertura

² Placas produzidas com massa/ esmalto/ cobertura

Fonte: Autora

As placas das placas do sistema 1 apresentaram brilho maior que as placas do sistema 2. Considerando que a superfície ensaiada em ambos os sistemas é a cobertura, a diferença de brilho apresentada é influenciada pelas camadas inferiores a mesma. No sistema 1, o que influencia o desenvolvimento do brilho da cobertura é o esmalte e no sistema 2 é o esmalto. O esmalte é um composto mais fundente do que o esmalto, fato que pode ser comprovado pela sua retração linear maior e maior quantidade de fase amorfa, características já discutidas no item 5.1. A maior fundência do esmalte contribui

para que a cobertura funda mais, aumentando, conseqüentemente, o brilho do sistema.

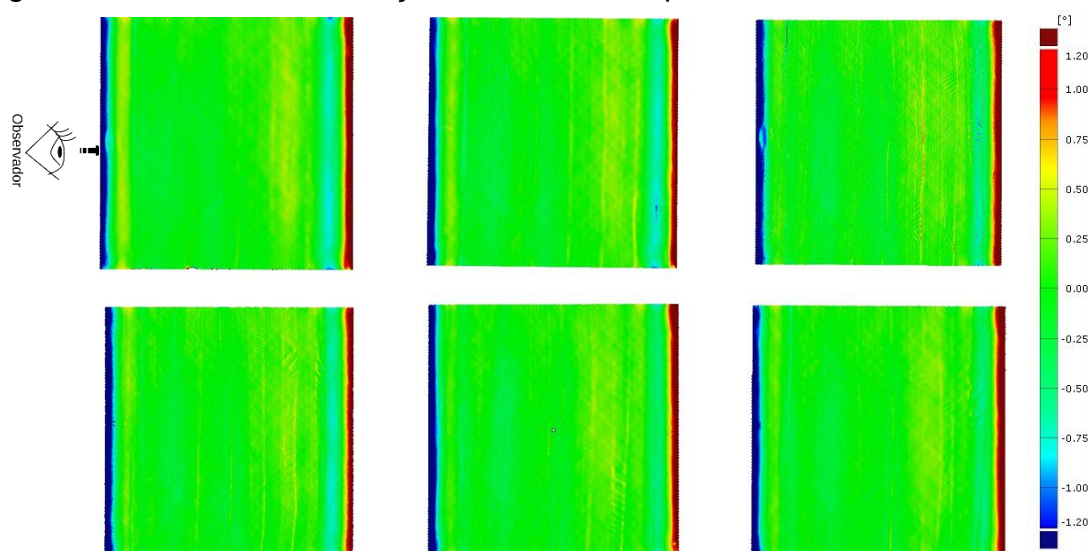
Relacionando-se o brilho com a análise visual das peças geradas dos dois sistemas, constata-se que o maior brilho das placas do sistema 1 faz com que sua avaliação de deformação visual seja ainda mais perceptível do que as placas do sistema 2, que possuem menor brilho.

5.2.5 Aferição da planaridade em BMC

As Figuras 25 e 26 mostram as imagens das medições feitas pelo BMC, tratadas no software *Gom Inspect Pro*. O tratamento das imagens visa à mensuração dos defeitos de planaridade na peça, apontando maior similaridade com a análise visual da mesma. Os tons quentes (vermelho e amarelo) representam curvaturas convexas, os tons frios (azuis) curvaturas côncavas, e o verde a parte plana da peça.

As imagens estão posicionadas de maneira que, em uma avaliação visual, o observador estaria à esquerda da imagem, posição considerando-se a observação das peças na saída do forno. A representação das cores é referente à vista superior das peças.

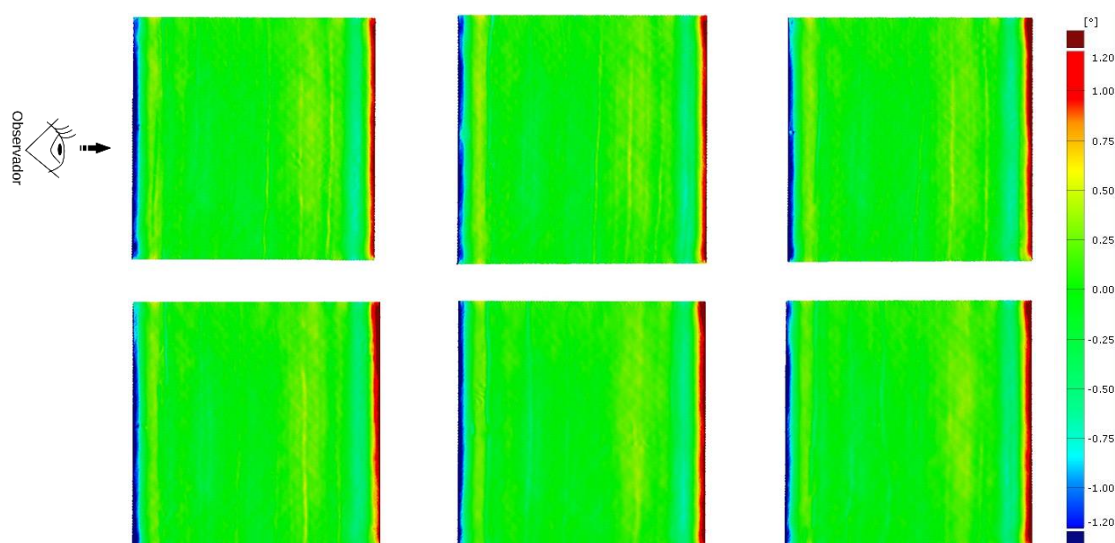
Figura 25 – Gráfico das medições em BMC das placas do sistema 1¹.



¹ Placas produzidas com massa/ engobe/ esmalte/ cobertura

Fonte: Autora

Figura 26 – Gráfico das medições em BMC das placas do sistema 2¹.



¹ Placas produzidas com massa/ esmalto/ cobertura

Fonte: Autora

Visualmente, pode-se notar que as peças do sistema 2 são mais planas que as peças do sistema 1, levando-se em consideração as áreas de cores vermelhas e azuis.

Numericamente, esta informação é comprovada pelo valor de planeza, calculado pelo programa *GOM Software*, das amostras, conforme Tabela 13.

Tabela 13 – Valores de planeza e deformação dos sistemas 1¹ e 2².

	Planeza (mm)	Deformação (%)
Sistema 1	1,54 ±0,10	9,72
Sistema 2	1,16 ±0,07	7,23

¹ Placas produzidas com massa/ engobe/ esmalte/ cobertura

² Placas produzidas com massa/ esmalto/ cobertura

Fonte: Autora

Dovica *et. al* (2006 apud ANDRADE, 2015) definem que tolerância de planeza serve para a determinação de valores limites para desvios de retilidade, utilizando um conjunto de linhas dispostas simetricamente em um plano ou superfície. Isto quer dizer que os pontos contidos na superfície analisada precisam estar entre dois planos especificados. A distância entre dois pontos deve ser a mínima possível. Desta forma, como o valor de planeza

das peças do sistema 2 é menor, este está mais plano que as peças do sistema 1.

Outra forma de se constatar que um sistema está menos deformado que o outro seria considerando-se o percentual de deformação, apresentado na Tabela 17, entendendo que deformadas são as áreas vermelhas e azuis. As peças do sistema 1 possuem 9,72% de deformação e as peças do sistema 2 possuem 7,23% de deformação. Desta forma, o sistema 2, quando comparamos a deformação em percentual medida por BMC, é menos deformado que o sistema 1 por possuir menos áreas em tons de vermelho e azul.

As técnicas de medição de deformação utilizadas confirmaram que o sistema 2, que utiliza o esmalto-be, possui menor deformação que o sistema 1, que utiliza engobe e esmalte. Conforme discutido, este bom resultado está relacionado às diferentes distribuições de tamanho de partícula, que implica diretamente na retração, que por sua vez implica na deformação e no brilho. A percepção do deformado até poderia ser relacionada aos diferentes brilhos se apenas análise visual fosse realizada, porém, tanto a fleximetria, quanto o BMC, técnicas mais sensíveis às diferenças de planaridade comprovam os resultados.

5.3 CARACTERIZAÇÃO DAS PLACAS DE PORCELANATO DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com base nos resultados apresentados na sessão 5.2, e sabendo que fatores como retração e espessura de camadas podem também influenciar na deformação da planaridade, um planejamento experimental foi elaborado utilizando o esmalto-be. O planejamento contou com a produção de 6 peças de cada uma das provas, enumeradas de P1 a P5, de acordo com a Tabela 3, exposta no item 4.3. Deve-se saber que os resultados da prova P5, que é o ponto central do planejamento, são os resultados apresentados para o sistema 2, expostos anteriormente no item 5.2, pois trata-se da condição padrão de aplicação do esmalto-be na unidade fabril em que as peças foram produzidas.

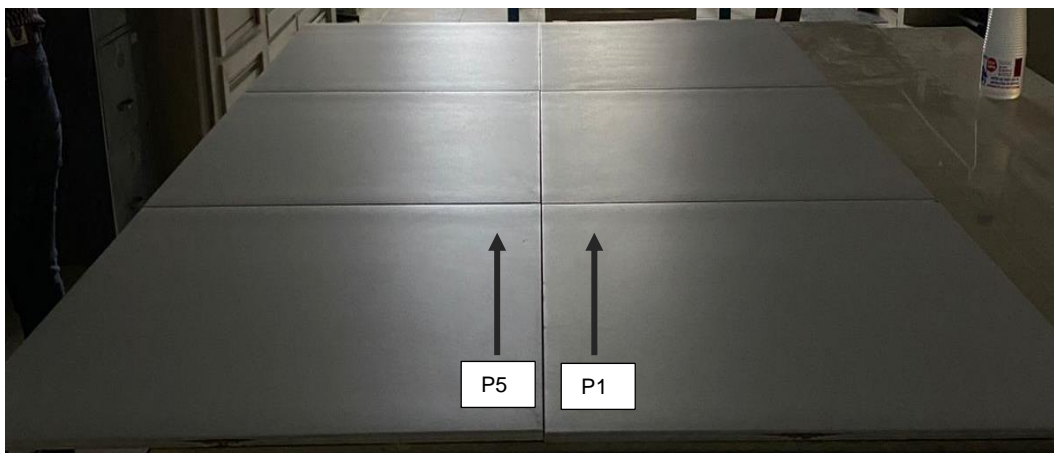
As placas das provas P1 a P5 foram confeccionadas e caracterizadas tal qual as placas dos sistemas 1 e 2, descrito no início do item

4.2. Vale lembrar que estas placas de prova são compostas de massa, esmalto e cobertura, sendo massa e cobertura fator comum entre todas elas.

5.3.1 Análise visual da deformação de planaridade

A análise visual das placas do planeamento experimental pode ser observada nas Figuras 27 a 30. As peças do lado esquerdo correspondem a prova P5 e as do lado direito as provas P1 a P4, separadamente.

Figura 27 – Análise visual das placas das provas P5 versus P1.



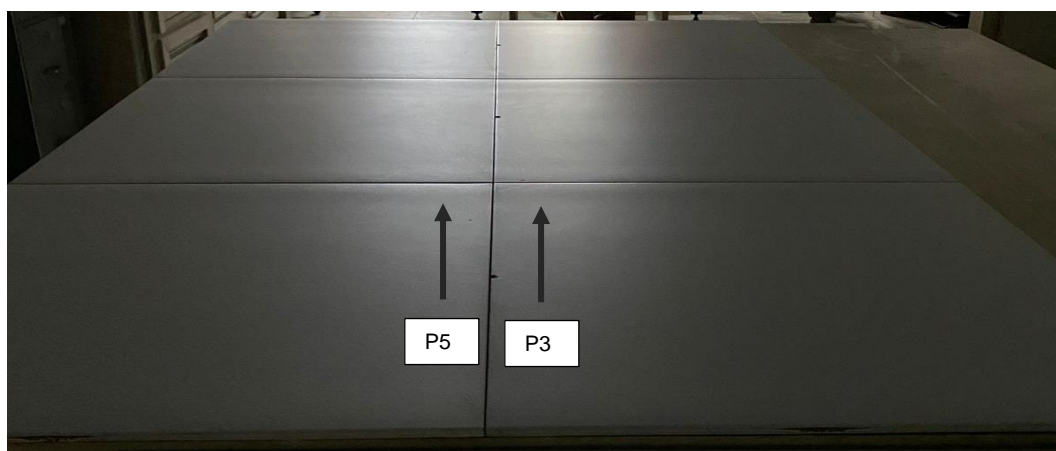
Fonte: Autora

Figura 28 – Análise visual das placas das provas P5 versus P2.



Fonte: Autora

Figura 29 – Análise visual das placas das provas P5 versus P3.



Fonte: Autora

Figura 30 – Análise visual das placas das provas P5 versus P4.



Fonte: Autora.

A avaliação visual indicou que todas as provas ficaram menos deformadas que o padrão P5. As provas P1 e P2 apresentaram comportamento similar, sendo que a P1 ficou ligeiramente menos deformada que a P2. Essas duas provas ficaram parecidas, uma vez que utilizaram o mesmo esmalto (com menor retração), variando-se somente a camada de aplicação. O mesmo ocorreu com as provas P3 e P4, que ficaram bastante similares, uma vez que utilizaram o mesmo esmalto, com maior retração, variando-se somente as camadas. As provas P1 e P2 ficaram com melhores aspectos visuais que as provas P3 e P4.

5.3.2 Características dimensionais por meio de dataplucômetro

Os resultados das características dimensionais medidas estão descritos na Tabela 14 a seguir, considerando os valores máximos e mínimos das leituras de 6 peças de cada prova.

Tabela 14 – Características dimensionais das placas das provas P1 a P5 em mm.

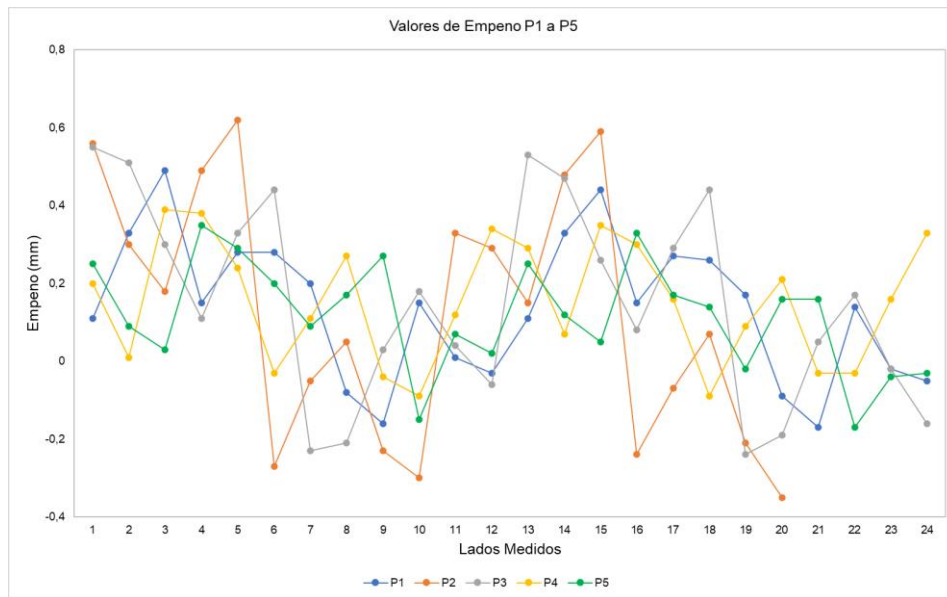
	Empeno		Curvatura Lateral		Curvatura Central	
	Mín.(mm)	Máx.(mm)	Mín.(mm)	Máx.(mm)	Mín.(mm)	Máx.(mm)
P1	-0,17	0,49	0,05	0,43	0,49	0,76
P2	-0,35	0,62	0,07	0,42	0,50	0,80
P3	-0,24	0,55	0,00	0,43	0,42	0,75
P4	-0,09	0,39	-0,02	0,40	0,48	0,69
P5	-0,33	0,55	0,04	0,46	0,44	0,87
Padrão ABNT (2020)	-2,00	2,00	-2,00	2,00	-2,00	2,00

Fonte: Autora

Analisando-se a Tabela 14, constata-se que todas as provas apresentaram valores de características dimensionais dentro dos padrões estabelecidos pela ABNT (2020).

A prova P4 pode ser considerada a melhor, ou seja, possui a menor deformação no quesito empeno, quando avaliamos os valores máximos e mínimos que ficam mais próximos de zero, ou seja, menos empenadas. A prova P4 apresentou valor mínimo de -0,09 mm e valor máximo de 0,39 mm, valores mais próximos de zero identificados. O inverso ocorre com a prova P2, que possui os valores mínimo, -0,33 mm, e máximo, 0,62 mm, mais afastados de zero, ou seja, mais empenadas. A Figura 40 expõe o gráfico com todos os valores de empeno obtidos nas medições dos relógios comparadores.

Figura 31 – Gráfico dos valores de empeno das provas P1 a P5.

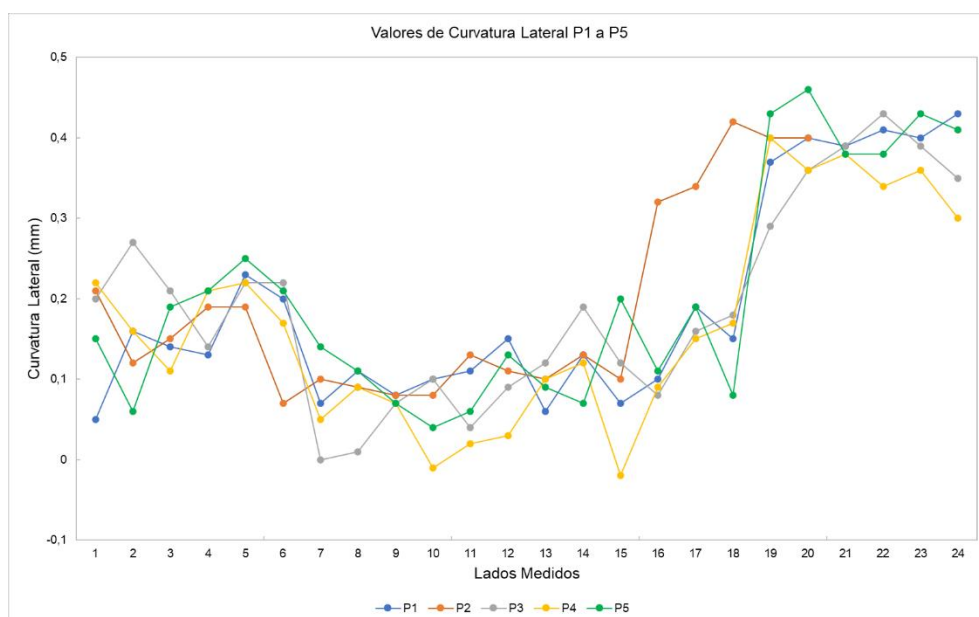


Fonte: Autora

Observando-se a Figura 31, nota-se que a prova P4 é aquela cujos pontos estão mais próximos de zero, indicando menor empeno. Já a prova P2 é aquela que apresenta os pontos com maior afastamento de zero, estando mais empenada.

A Figura 32 mostra o gráfico com os valores de curvatura lateral das peças do planejamento experimental.

Figura 32 – Gráfico dos valores de curvatura lateral das provas P1 a P5.

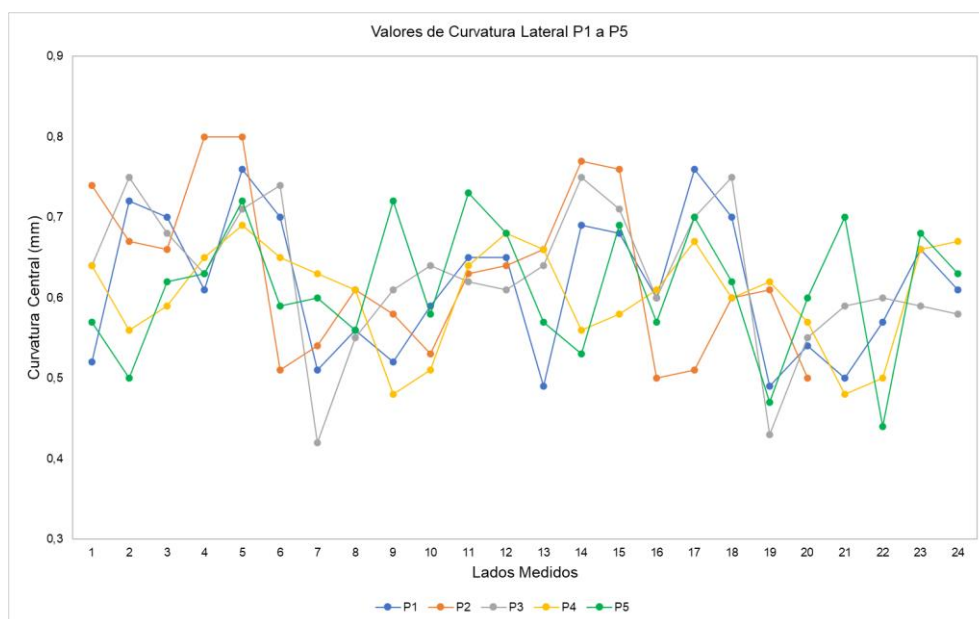


Fonte: Autora

Considerando-se os valores da Tabela 20 para a curvatura lateral, na tentativa de determinar-se os valores máximos e mínimos mais próximos de zero, não se tem um consenso em qual a melhor prova, pois nenhuma delas possui os dois valores mais próximos de zero, como aconteceu com a prova P4 quanto ao empeno. Constata-se que todas as provas estão muito similares no quesito curvatura central, fato que também pode ser observado na Figura 41.

Os valores de curvatura central de cada um dos lados das peças do planejamento experimental estão contidos na Figura 33.

Figura 33 – Gráfico dos valores de curvatura central das provas P1 a P5.



Fonte: Autora

Avaliando-se a curvatura lateral por meio da Tabela 20, da mesma forma que com o quesito curvatura central, não se tem um consenso em qual a melhor prova na tentativa de se determinar os valores máximos e mínimos mais próximos de zero, pois nenhuma delas possui os dois valores mais próximos de zero, como aconteceu com a prova P4 quanto ao empeno. Constata-se que todas as provas estão muito similares no quesito curvatura central, como observado na Figura 33.

Mais uma vez, devido à natureza do ensaio realizado, com poucos pontos de medições coletados, não é possível afirmar com certeza qual o

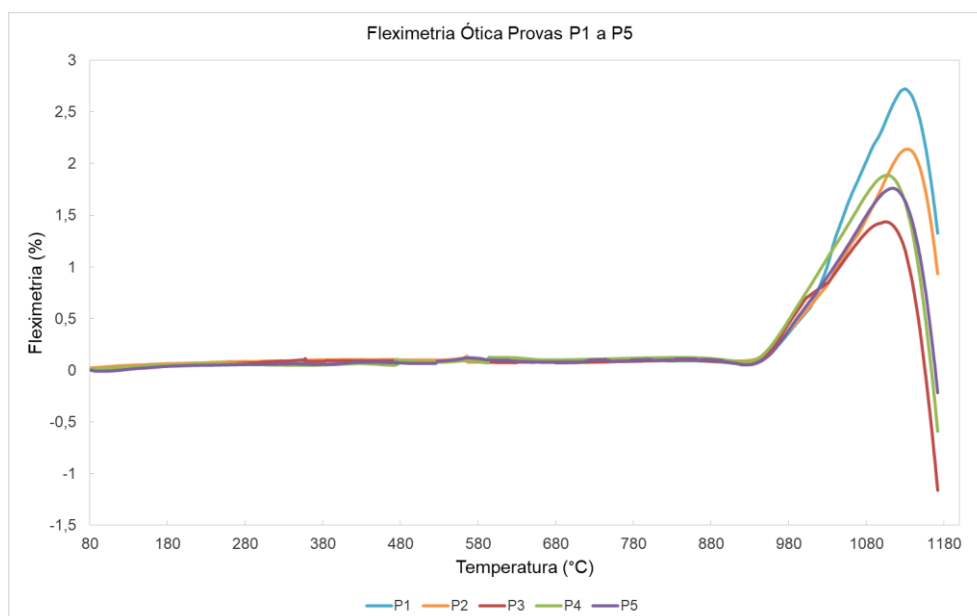
melhor sistema, pois os pontos avaliados estão, nos três gráficos, sempre concentrados nas mesmas regiões, sem significativas variações.

Apesar da conformidade com a norma de todas as provas testadas, esta avaliação, por vezes, não é suficiente para garantir a satisfação de clientes, que avaliam as peças de forma visual.

5.3.3 Fleximetria óptica dos sistemas

A Figura 34 mostra a comparação dos resultados obtidos com todas as provas propostas.

Figura 34 – Gráfico de fleximetria óptica das provas P1 a P5.



Fonte: Autora

Todas as provas, de P1 a P5 possuem a mesma tendência na Figura 34: seguem sem deformação até a temperatura aproximada de 900 °C; a partir de 900 °C até 1120 °C, aproximadamente, vão desenvolvendo uma curvatura convexa e após esta temperatura, começam a ficar mais côncavas que anteriormente.

A Tabela 15 mostra os valores de fleximetria para a temperatura de 1170°C.

Tabela 15 – Valores de fleximetria das provas P1 a P5 em 1170 °C.

Prova	Fleximetria - 1170°C (%)
P1	1,45
P2	1,05
P3	-1,00
P4	-0,44
P5	-0,08

Fonte: Autora

Os valores de fleximetria apresentados na Tabela 15 demonstram, que na temperatura de 1170 °C, a prova que menos deforma é o ponto central P5, seguida de P4, P3, P2, e com o maior desvio de deformação, a prova P1.

A análise de variância (ANOVA) aplicando-se os valores de fleximetria do produto na temperatura de 1170 °C, com relação aos fatores camada de aplicação e a retração do esmalto, pode ser observada na Tabela 16.

Tabela 16 – Análise de variância (ANOVA) para fleximetria das provas P1 a P5 em 1170 °C.

	Desvio Padrão	Df	MS	Teste F	Teste p
(1) Retração do esmalto	3,877732	1	3,877732	56,24191	0,004912
(2) Camada de aplicação	0,007227	1	0,007227	0,10482	0,767382
1 x 2	0,229378	1	0,229378	2,30447	0,165663
Erro	0,206842	3	0,068947		
Desvio Padrão Total	4,321179	6			

$\alpha = 0,05$ e $R^2 = 90,43\%$

Fonte: Autora

De acordo com a análise de variância, para os valores de fleximetria em 1170 °C (a máxima atingida pelo equipamento), o fator retração do esmalto possui influência significativa, com um nível de confiança de 95%. Nem o fator camada de aplicação e nem mesmo a interação os dois fatores tendem a interferir significativamente de fleximetria das provas. O valor de $R^2 = 90,43\%$ significa que o modelo está bastante ajustado aos dados.

O valor de R^2 elevado mostra que a variável resposta, no caso a fleximetria, pode ser prevista com precisão por meio das variáveis estudadas, retração e camada, considerando os níveis testados.

5.3.4 Aferição de brilho superficial

A aferição do brilho superficial se deu com a medida de 9 pontos em cada uma de seis peças de cada sistema. A Tabela 17 mostra os resultados obtidos para cada prova realizada.

Tabela 17 – Brilho superficial das provas P1 a P5.

Prova	Brilho (UB)
P1	6,33 ± 0,27
P2	6,17 ± 0,3
P3	9,69 ± 0,55
P4	9,47 ± 0,47
P5	8,34 ± 0,57

Fonte: Autora, 2022.

As provas P1 e P2, que foram feitas com o esmalto de menor retração, consequentemente, mais refratário, foram as provas que apresentaram menos brilho.

Aplicadas com o esmalto de menor resíduo, sendo desta maneira mais fundentes, as provas P3 e P4 apresentaram os maiores valores de brilho.

Relacionando-se a análise visual com o brilho medido, constata-se que quanto menor o brilho da superfície da prova, menos deformação é visualizada. Na avaliação visual P1 e P2 foram as provas com menos deformação percebida, sendo que as mesmas apresentaram os menores valores de brilho medido.

O mesmo é válido para os resultados do ensaio de fleximetria óptica, onde as provas que mais sofreram deformação foram as provas P1 e P2, mas mesmo assim a maior deformação não foi percebida devido ao menor brilho das provas. As provas P3 e P4, apesar de apresentarem menores valores de

deformação na fleximetria, foram percebidas como mais deformadas pois possuem brilho maior.

A análise de variância (ANOVA) analisando-se os valores de brilho das provas com relação aos fatores camada de aplicação de aplicação e retração do esmalto pode ser observada na Tabela 18.

Tabela 18 – Análise de variância (ANOVA) para brilho superficial das provas P1 a P5.

	Desvio Padrão	Df	MS	Teste F	Teste p
(1) Retração do esmalto	566,3651	1	566,3651	2376,244	0,000000
(2) Camada de aplicação	1,6308	1	1,6308	6,235	0,012963
1 x 2	0,0925	1	0,0925	0,354	0,552445
Erro	95,4638	365	0,2615		
Desvio Padrão Total	663,8875	368			

$\alpha = 0,05$ e $R^2 = 85,5\%$

Fonte: Autora

Pode-se afirmar que os fatores retração do esmalto e camada de aplicação possuem influência significativa, com um nível de confiança de 95%, no resultado de brilho das peças. A interação entre os dois fatores não tende a interferir significativamente na deformação das provas.

De acordo com o teste F, pode-se afirmar, ainda, que a influência do fator retração do esmalto no brilho final da amostra é muito maior que a influência do fator camada de aplicação e da interação entre os dois fatores, pois o valor de F é muito maior para a variável retração.

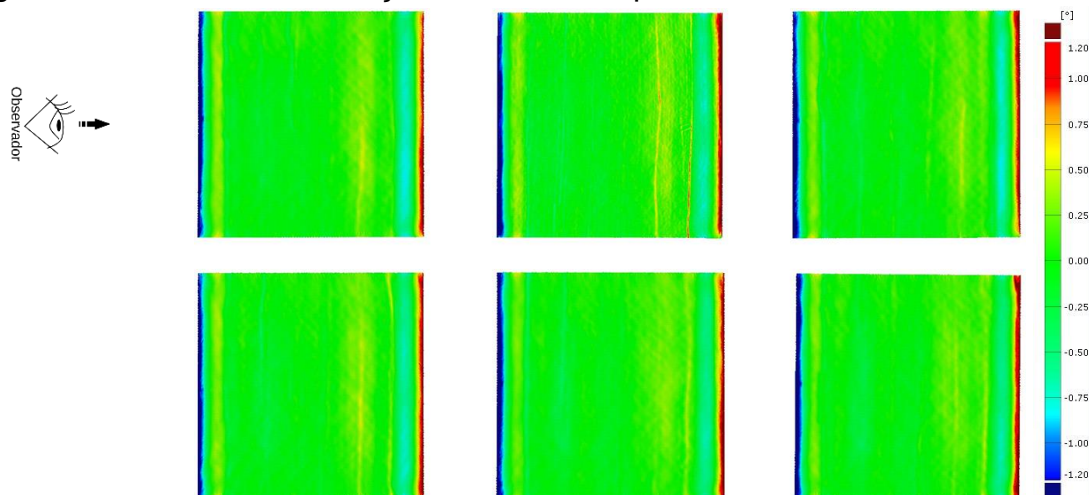
O valor de R^2 elevado mostra que a variável resposta, pode ser prevista com precisão por meio das variáveis estudadas, considerando os níveis testados.

5.3.5 Aferição da planaridade em BMC

As Figuras 35 a 38 mostram as imagens das medições feitas pelo BMC das provas P1 a P4.

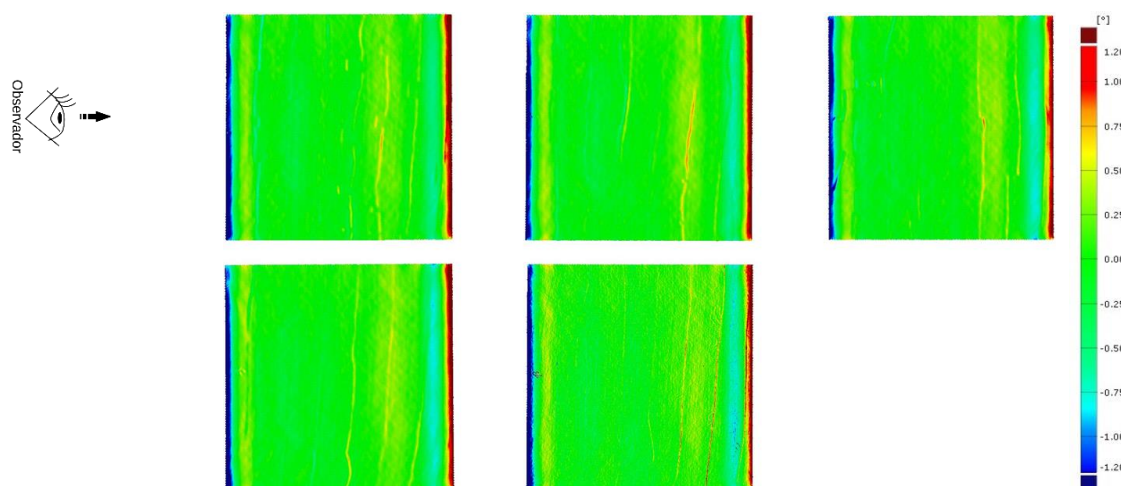
As imagens estão posicionadas de maneira que, em uma avaliação visual, o observador estaria à esquerda e a representação seria a vista superior das peças. Seis peças de cada sistema foram inspecionadas. Para a prova P2, somente 5 peças foram avaliadas.

Figura 35 – Gráfico das medições em BMC da prova P1.



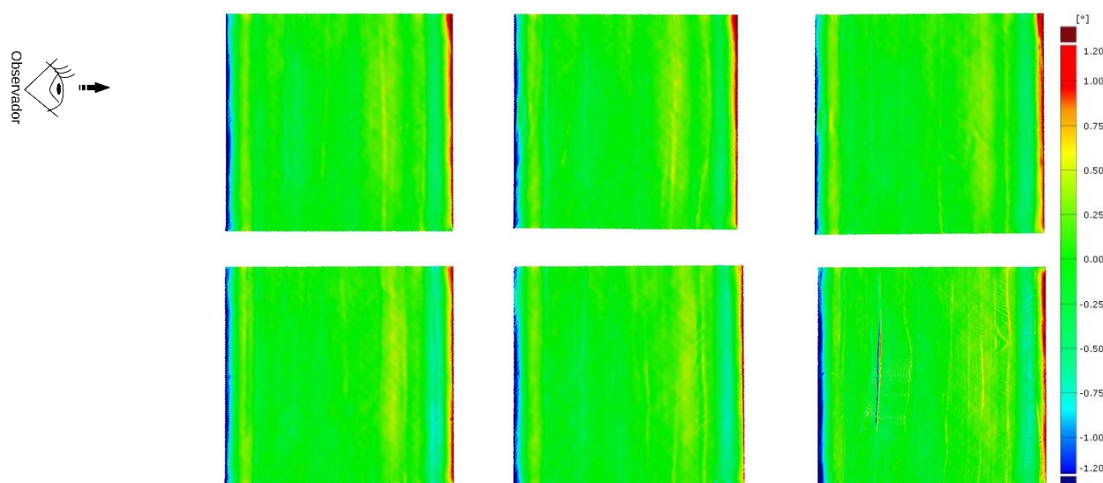
Fonte: Autora

Figura 36 – Gráfico das medições em BMC da prova P2.



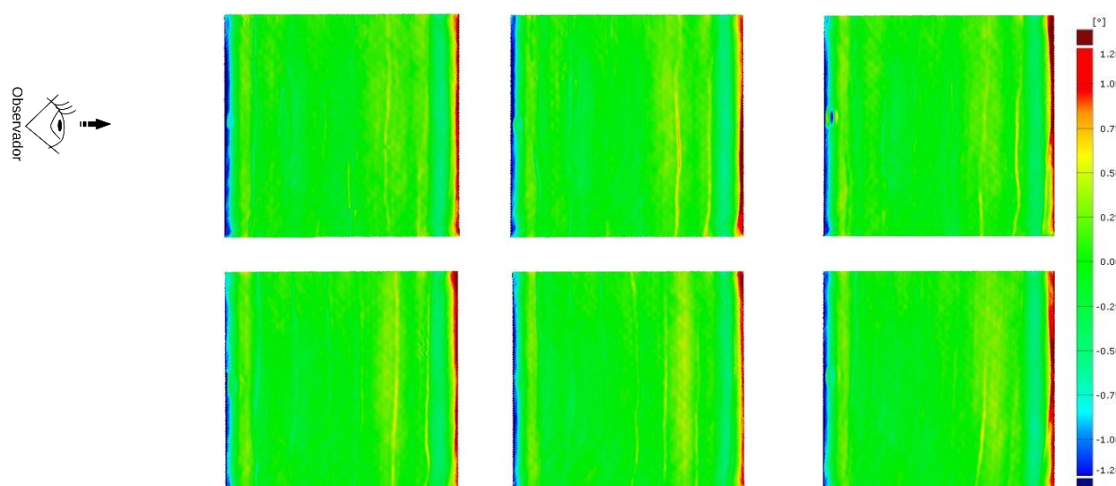
Fonte: Autora

Figura 37 – Gráfico das medições em BMC da prova P3.



Fonte: Autora

Figura 38 – Gráfico das medições em BMC da prova P4.



Fonte: Autora

Classificando-se, visualmente, mas seguindo o critério de cores, por ordem da prova identificada como menos deformada para a prova mais deformada, pode-se dizer que $P4 < P3 < P1 < P5 < P2$ (o sinal “<” corresponde a menos deformada).

A Tabela 19 mostra os valores de deformação considerando-se o percentual de áreas coloridas, entendendo que deformadas são as áreas vermelhas e azuis, considerando as imagens geradas pelo BMC.

Tabela 19 – Deformação percentual segundo imagens do BMC para as provas P1 a P5.

Prova	Deformação (%)
P1	8,53 ±1,40
P2	9,38 ± 1,36
P3	6,15 ±1,11
P4	5,78 ±0,35
P5	7,23 ±0,93

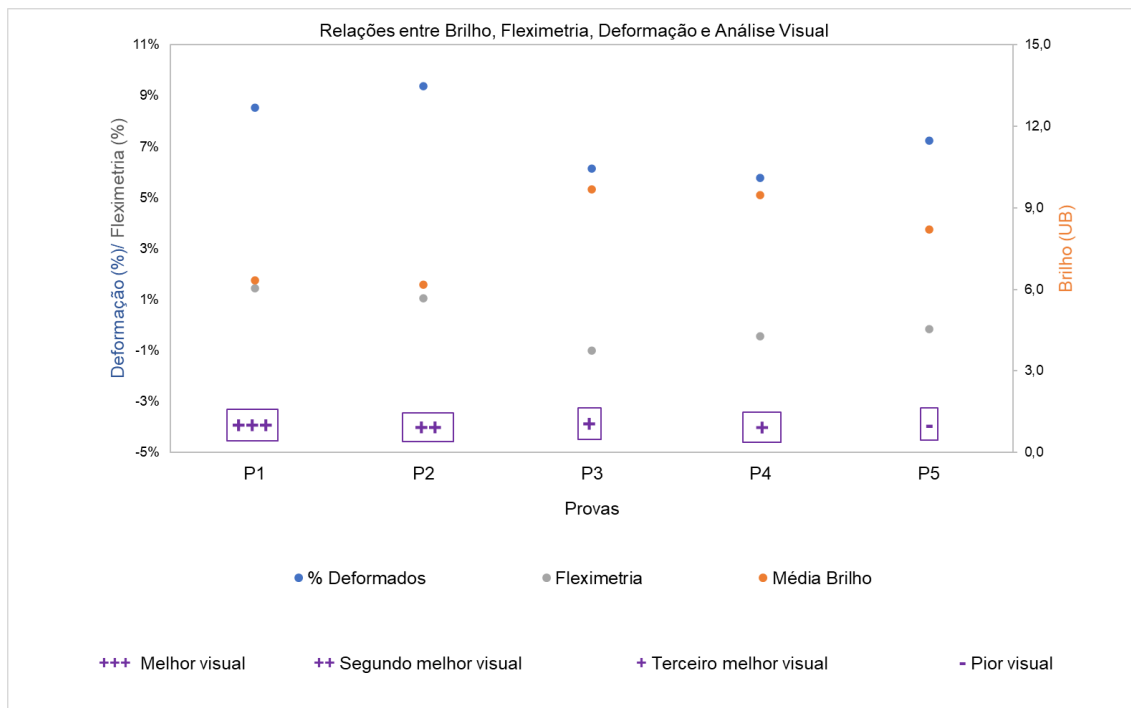
Fonte: Autora

Observando-se os valores de deformação da Tabela 19, por ordem da prova menos deformada para a mais deformada, onde a menos deformada é aquela que apresenta o menor percentual de deformação, pode-se dizer que $P4 < P3 < P5 < P1 < P2$, avaliação bastante similar à visual, onde nesta somente inverte-se a ordem de P1 e P5. Desta maneira, pode-se dizer que as imagens geradas pelo BMC mostram uma percepção de avaliação bastante próxima da realidade do estado de deformação das peças.

Por outro lado, quando se trata da fleximetria, as provas com os maiores valores deste ensaio, P1 (1,45%) e P2 (1,05%) também foram as provas que mais apresentaram valores de percentual de deformação. Quanto maior o valor da fleximetria, mais convexa fica a peça durante o processo de queima do produto. Quanto mais convexa estiver a peça, menos área de contato ela possui com os rolos do forno. A peça fica suspensa somente pelas pequenas áreas que ficam em contato com os rolos, até o momento em que o peso não é mais suportado e forma-se a flecha de deformação, que acaba acompanhando o formato dos rolos (SACMI, 2003; HENRIQUE, 2013). Desta forma, quanto mais convexa fica a peça, mais deformada será. Mesmo assim, as provas P1 e P2, possuindo menos brilho, não foram percebidas como mais deformadas. E esse resultado é atribuído ao brilho.

A Figura 39 ilustra as relações entre brilho, fleximetria, percentual de deformação e análise visual das provas propostas.

Figura 39 - Relações entre brilho, fleximetria, deformação e análise visual das provas P1 a P5.



Fonte: Autora

Com a observação da Figura 39, nota-se que a prova com a menor percepção visual de deformação, P1, foi aquela que apresentou um dos maiores níveis de percentual de deformação de acordo com as imagens geradas pelo BMC e um dos maiores valores de fleximetria. Todavia, foi considerada menos deformada visualmente pois possui um dos menores valores de brilho.

A prova P4, que apesar de apresentar o menor percentual de deformação pela medição em BMC e um dos menores valores de fleximetria, não teve uma avaliação visual tão boa quanto a prova P1, pois apresenta um dos maiores valores de brilho das provas confeccionadas.

A análise de variância (ANOVA) analisando-se os valores de deformação percentual baseado nas imagens do BMC das peças com relação aos fatores camada de aplicação e retração do esmalto pode ser observada na Tabela 20.

Tabela 20 – Análise de variância (ANOVA) para deformação percentual segundo imagens do BMC das provas P1 a P5.

	Desvio Padrão	Df	MS	Teste F	Teste p
(1) Retração do esmalto	0,005081	1	0,005081	49,11914	$2,76 \times 10^{-8}$
(2) Camada de aplicação	0,000032	1	0,000032	0,30732	0,582666
1 x 2	0,000205	1	0,000205	1,98636	0,167072
Error	0,003827	37	0,000103		
Desvio Padrão Total	0,009032	40			

$\alpha = 0,05$ e $R^2 = 54,19\%$

Fonte: Autora

De acordo com a análise de variância, para os valores de deformação percentual baseado nas imagens do BMC, o fator retração do esmalto possui influência significativa, com um nível de confiança de 95%. Nem o fator camada de aplicação e nem mesmo a interação os dois fatores tendem a interferir significativamente na deformação das provas.

De acordo com o teste F, pode-se afirmar que a influência do fator retração do esmalto no percentual de deformação segundo as imagens do BMC da amostra é maior que a influência da camada de aplicação e da interação entre os dois fatores, pois o valor de F é maior para a variável retração.

Outra variável possível de ser avaliada por meio das imagens geradas pelo BMC é a planeza. A Tabela 21 demonstra os valores de planeza para todas as provas do experimento.

Tabela 21 – Valores de planeza para provas P1 a P5.

	Planeza (mm)
P1	1,12 ±0,10
P2	1,13 ±0,06
P3	1,15 ±0,09
P4	1,07 ±0,05
P5	1,16 ±0,07

Fonte: Autora

Numericamente, conforme Tabela 21, comprova-se que a prova P4 é a melhor prova, como foi na análise das cores das imagens do BMC, pois possui o menor número de planeza. A prova P3 é visualmente melhor que P1, mas não de acordo com a planeza, onde o inverso foi verdadeiro. O mesmo ocorre com P5 e P2.

Para se verificar a significância do valor de planeza para as provas propostas, a análise de variância (ANOVA) analisando-se os valores de planeza das peças com relação à camada de aplicação e a retração do esmalto pode ser observada na Tabela 22.

Tabela 22 – Análise de variância (ANOVA) para planeza das provas P1 a P5.

	Desvio Padrão	Df	MS	Teste F	Teste p
(1) Retração do esmalto	0,001783	1	0,001783	0,335644	0,565962
(2) Camada de aplicação	0,006606	1	0,006606	1,243161	0,272251
1 by 2	0,011231	1	0,011231	2,113637	0,154655
Erro	0,191291	36	0,005314		
Desvio Padrão Total	0,234044	40			

$\alpha = 0,05$ e $R^2 = 1,61\%$

Fonte: Autora

Pode-se afirmar que o fator retração do esmalto, o fator camada de aplicação e a interação entre os fatores não possuem influência significativa, tendo em vista um nível de confiança de 95%, no resultado de planeza das peças. O baixo valor de $R^2 = 1,61\%$, significa que o modelo está pouco ajustado aos dados.

Considerando os valores de planeza e seus valores de desvio padrão, não é possível determinar com certeza qual a prova com o melhor resultado, com a menor deformação, pois os valores são muito próximos. A falta de significância dos fatores avaliados sobre a característica avaliada, também demonstram este fato.

Nas análises de variância (ANOVA) executadas, com exceção da planeza, o fator retração do esmalto apresentou influência significativa, com nível de confiança de 95%, para todos eles e altos valores do teste F. Esta constatação é pertinente, uma vez que a retração do composto está

diretamente ligada ao seu grau de refratariedade, e conseqüentemente ao seu nível de brilho. Quanto mais refratário o material, menor sua retração e menor seu brilho. As provas P1 e P2, sendo aplicadas com o esmalto de menor retração, conseqüentemente menor brilho, apesar de serem as provas que mais deformaram de acordo com as análises de fleximetria e análises realizadas com o BMC, foram as provas menos deformadas na análise visual das placas.

Tendo em vista todos os resultados obtidos, pode-se constatar que as provas P3 e P4, produzidas com o esmalto de maior retração, são as melhores provas em termos de deformação, apresentando os menores valores de percentual de deformação segundo o BMC e baixos valores de fleximetria. Porém, não foram as provas menos deformadas visualmente, uma vez que apresentaram os maiores valores de brilho superficial. Desta forma, o brilho se mostrou como sendo uma característica determinante na percepção do nível de deformação das peças.

6 CONCLUSÃO

Foi possível avaliar a influência da camada de aplicação e retração do esmalto na deformação da planaridade de placas de porcelanato esmaltado com acabamento acetinado.

Na comparação entre peças do sistema 1 (massa/ engobe/ esmalte/ cobertura) e do sistema 2 (massa/ esmalto/ cobertura) pode-se afirmar que o sistema 2 possui melhor comportamento que o sistema 1 no quesito deformação da planaridade de sua superfície.

A análise visual mostra que aparentemente o sistema 2 é menos deformado que o sistema 1. Os resultados de fleximetria indicam que os dois sistemas têm comportamentos similares, mas o sistema 2 tem valores ligeiramente melhores. Como o brilho do sistema 2 (8,19 UB) é menor que o do sistema 1 (11,34 UB), esse sai em vantagem, uma vez que menores valores de brilho amenizam a percepção da deformação superficial. Por fim, considerando-se as imagens obtidas por meio do braço de medição por coordenadas – BMC, observou-se visualmente, pelo valor de planeza (1,16 mm) e percentual de deformação segundo as cores geradas (7,23%) que sistema 2 é mais plano que o sistema 1 (1,54 mm de planeza e 9,72% de deformação). Desta maneira, o conjunto desses resultados, prova que o sistema 2 é menos deformado.

Em se tratando das provas do planejamento experimental, quanto menor o brilho da superfície, menor é a percepção da deformação da planaridade. Na análise visual das peças, a prova P1 é a prova menos deformada, sendo a que apresenta menor valor de brilho, considerando o desvio padrão. Na fleximetria, as provas que mais sofreram deformação durante o ensaio foram as provas P1 e P2, mas esta deformação é camuflada pelo baixo brilho das peças.

De acordo com os resultados das análises realizadas com as imagens tratadas do BMC, a prova P4 é a melhor tanto na observação das imagens, quanto no percentual de deformação (5,78%) e na planeza (1,07 mm), mas este resultado é o inverso da análise visual, onde esta prova é uma das provas mais deformadas. Este fato ocorre uma vez que a prova P4 possui um dos maiores valores de brilho (9,47 UB).

Desta forma, foi possível obter peças com nível de deformação melhores que do que a já atual condição de produção com o esmalto, representada pela prova P5, constatadas pelo BMC, mas isto não pode ser evidenciado na análise visual, devido ao alto brilho da superfície, característica que possui maior influência na percepção das deformações de planaridade da peça.

A retração do esmalto foi o fator que apresentou maior influência significativa nos resultados da análise de variância (ANOVA) da fleximetria, brilho e percentual de deformação por meio do tratamento das imagens obtidas por BMC.

Por fim, conclui-se que as técnicas que possuem maior sensibilidade para detecção de desvios de planaridade são o percentual de deformação obtido pelo BMC e a fleximetria. Porém, a associação destas com o resultado de brilho é ideal para se garantir uma boa análise visual.

7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a análise dos resultados do presente trabalho, sugere-se alguns trabalhos que podem ser desenvolvidos no futuro:

- Desenvolver um esmalte que possua retração menor do que a retração do esmalte padrão, mas que tenha o mesmo brilho que o padrão e verificar os resultados na constatação da planaridade da superfície;
- Verificar se os valores de planeza podem vir a ser significativos para uma mesma composição, possibilitando a adoção deste critério na classificação dos produtos;
- Verificar se os produtos com acabamentos brilhantes e polidos também possuem relação entre a análise visual da gráfica do BMC com os resultados de percentual de deformação encontrados com as mesmas imagens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALBERO, J. L. Amorós *et al.* **Defectos de fabricación de pavimentos y revestimientos cerámicos**. València: AICE-ITCE, 1991. 169 p.
- AMORÓS, J.L. *et al.* Acuerdo esmalte-soporte [1]. Causas y factores de los que depende. **Técnica Cerámica**, 178, 582-592, 1989.
- AMORÓS, J.L.; Blasco, A.; Carceller, J.V., *et al.* Acuerdo esmalte-soporte [II]. Expansión térmica de soportes y esmaltes cerámicos. **Técnica Cerámica**, 179, 644-657, 1989.
- ANDRADE, Joab Sobreira de. **Medição e análise de superfícies metrológicas usando nível eletrônico e os métodos de Moody e malha retangulas**. 2015. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015. Cap. 3. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/8970/2/arquivototal.pdf>. Acesso em: 31 jul. 2022.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES - ANFACER (Brasil). **Números do setor cerâmico**. 2021. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/numeros-do-setor>. Acesso em: 07 fev. 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10545-2: Placas Cerâmicas Parte 2: Determinação das dimensões e qualidade superficial**. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 14 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 13006: Placas cerâmicas - Definições, classificação, características e marcação**. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2020. 65 p.
- BARBA, Antonio *et al.* **Materias primas para la fabricación de suportes de baldosas cerámicas**. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica, 1997. 291 p.
- BAUCIA JUNIOR, J. A. *et al.* Estudo de fundentes alternativos para uso em formulações de porcelanato. **Cerâmica**, v. 56, n. 339, p. 262-272, jul. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0366-69132010000300009>.
- BERNARDIN, Adriano Michael *et al.* Pyroplasticity in porcelain tiles. **Materials Science And Engineering**, [S.L.], v. 427, n. 1-2, p. 316-319, jul. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.073>.
- BRESCIANI, A., SPINELLI, B. Porcelain tile pyroplastic deformation during firing and post-firing variations of planarity. **CFI Ceramic Forum International**, 89, E41-E45, 2012.

CARTER, C. Barry; NORTON, M. Grant. **Ceramic Materials: science and engineering**. 2. ed. Nova York: Springer, 2013. 775 p.

CONSERVA, Lisandra Rafaela dos Santos. **Deformação piropiástica em porcelanatos**. 2016. 153 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

DAL BÓ, Marcelo et al. Effect of glaze and engobe properties on the curvature of ceramic tiles. *Cerâmica*, São Paulo, v. 58, n. 345, p.118-125, mar. 2012.

DE MARCH, Jean Morona. **Validação de um método de medição para a detecção de deformações em placas cerâmicas**. 2019. 33 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, SATC, Criciúma, 2019.

FARO. **FARO® 8-Axis QuantumS FaroArm® V2**. 2020. Folha Técnica. Disponível em: <https://www.faro.com/pt-BR/Resource-Library/Tech-Sheet/techsheet-faro-8-axis-quantum-s-faroarm-scanarm-v2>. Acesso em: 21 fev. 2020.

GENNARI, Ronaldo Crossio *et al.* A influência das características do engobe na curvatura central das placas cerâmicas parte I: desenvolvimento dos engobes. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 16, n. 5-6, p. 12-14, 2011.

GENNARI, Ronaldo Crosio *et al.* A influência das características do engobe na curvatura central das placas cerâmicas parte II: a curvatura central. **Cerâmica Industrial**, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 14-19, 2012. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2014.002>.

GERMAN, Randall M. **Sintering theory and practice**. New York, USA: Wiley, 1996. 550 p.

HENRIQUE, Patrick. **Fleximetria térmica como técnica para medição de planaridade de revestimentos cerâmicos durante a queima**. 2013. 87 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2013.

KANG, Suk-Joong L. **Sintering: densification, grain growth, and microstructure**. New York, USA: Elsevier, 2005. 265 p.

LÓPEZ, Purificación Escribano *et al.* **Colección Enciclopedia Cerámica: esmaltes y pigmentos cerâmicos**. Castellón: Faenza Editrice Iberica, 2001. 300 p.

MADRUGA, Daniel González. **Desarrollo de técnicas de mejora de la fiabilidad en la medición con brazos portátiles de medir por coordenadas**. 2013. 231 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ingeniería Mecánica, Informática y Aeroespacial, Universidad de León, León, 2013. Cap. 2.

MARUCHIN, Simone. **Influência do talco nas propriedades de composição tipo porcelanato**. 2007. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências de Materiais, Setor de Ciências Agrárias e de Tecnologia, Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2007.

MATTHES, Wolf E.. **Vidriados cerâmicos**: fundamentos, propriedades, receitas, métodos. Barcelona: Omega, 1990. 522 p. Tradução de Ingeborg Trowsky.

MELCHIADES, Fábio G. *et al.* Relação entre a Curvatura de Revestimentos Cerâmicos e as Características da Camada de Engobe. **Cerâmica Industrial**, v. 5, n. 2, 2000.

MELCHIADES, Fábio G.; BOSCHI, Anselmo O. **Dilatação Térmica e Acoplamento Massa-Engobe-Esmalte**. Rio Claro: Centro de Revestimentos Cerâmicos, 2016. 165 slides, color.

MELCHIADES, Fábio G. *et al.* Glaze coupling in porcelain tiles: effects of the nature of the glazes on the tensions developed during firing. In: QUALICER, 2020, Castellon. **Papers C**. Disponível em: <https://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/ponencias.php?valor=&titulo=1&autorvalor=&tipovalor=0&tipo=1&ano=2020&tipoano=1&enviado=&idioma=en>. Acesso em: 09 ago. 2022.

NORTON, Frederick Harwood. **Cerâmica fina: tecnología y aplicaciones**. Barcelona: Omega S.A., 1975.

NORTON, Frederick Harwood. **Introdução à tecnologia cerâmica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1973. 324 p. Tradução de Jefferson Vieira de Souza.

OLIVEIRA, Antonio Pedro Novaes de. Grês Porcelanato: aspectos mercadológicos e tecnológicos. **Cerâmica Industrial**, v. 3, n. 3, p. 34-41, 1998. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587656ff7f8c9d6e028b45f8/pdf/ci-3-3-587656ff7f8c9d6e028b45f8.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2021.

OLIVEIRA, Antonio Pedro Novaes de; HOTZA, Dachamir. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 2015. 118 p.

PADILHA, Angelo Fernando. **Materiais de Engenharia**: microestrutura e propriedades. Curitiba: Hemus, 2000. 349 p.

PRACIDELLI, Sebastião. Estudo dos esmaltes cerâmicos e engobes. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 13, n. 1/2, p. 8-20, 2008.

PETERSON, Michael. **Avaliação do método Steger na determinação do acoplamento esmalte/suporte cerâmico**. 2002. 69 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

RAHAMAN, M. N. **Ceramic processing and sintering**. 2nd ed. New York, USA: Taylor & Francis, 2003. 875 p.

RESTREPO, J.J.; DINGER, D.R.. Controle da Deformação Piroplástica em Massas de Porcelanas Triaxiais usando a Análise Dilatométrica. **Cerâmica Industrial**, v. 4, n. 8, p. 37-48, 2003.

RICHERSON, David W. *Modern ceramic engineering: properties, processing, and use in design*. 2.ed. New York, USA: Marcel Dekker, 1992. 860 p.

RODRIGUES, Bruno Caio *et al.* Estudo da curvatura central das placas cerâmicas para revestimentos: a influência da fusibilidade e coeficiente de expansão térmica da camada de engobe nas curvaturas desenvolvidas durante e após a queima. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 22, n. 3, p. 18-28, 2017. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2017.023>.

SACMI (Castellón). **Tecnología cerámica aplicada**: volume 2. Castellón: Faenza, 2004. 432 p.

SACMI (Itália). **Tecnologia ceramica applicata**: volume 1. Imola: La Mandragora, 2001. 444 p.

SÁNCHEZ, E. *et al.* Deformação de queima em grés porcelanato de grande formato: efeito das variáveis de composição e de processo. **Cerâmica Industrial**, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 7-16, 2018. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2018.011>.

SÁNCHEZ, E. *et al.* Porcelain tile: almost 30 years of steady scientific-technological evolution. **Ceramics International**, [S.L.], v. 36, n. 3, p. 831-845, abr. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2009.11.016>.

SANTOS, Geocris R. dos *et al.* Desenvolvimento de uma Metodologia para o Acompanhamento da Evolução do Amadurecimento de Engobes Durante a Queima. **Cerâmica Industrial**, São Paulo, v. 12, n. 5, p. 22-27, 2007.

SANTOS, Lisandra R. dos *et al.* A evolução da deformação piropilástica de porcelanatos durante a queima. **Cerâmica Industrial**, [S.L.], v. 24, n. 3, p. 27-34, 2019. Editora Cubo. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2019.015>.

STEFANOV, Stefano; BATSCHWAROV, Svetlan. **Smalti Ceramici**. Castellón: Faenza Editrici S.P.A, 1991. 263 p. Tradução de Vittorio Emiliani.

ZANELLI, Chiara *et al.* Sinterização de porcelanatos com fluxo viscoso: Uma revisão. **Cerâmica Industrial**, [S.L.], v. 24, n. 2, p. 7-12, 2019. Editora Cubo. <http://doi.org/10.4322/cerind.2019.007>.