



Análises Físicas e Estruturais de Peças Cerâmicas Esmaltadas

Physical and Structural Analysis of Glazed Ceramic Pieces

Ana Beatriz da Silva Santos

Jair Dantas Nacre Junior

Verônica Cristhina de Souza Diniz

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Resumo: As propriedades de produtos cerâmicos dependem diretamente da composição e do comportamento físico e estrutural das matérias-primas utilizadas. Este trabalho avaliou a influência da aplicação de esmaltes nas propriedades físicas e estruturais de peças cerâmicas obtidas pelo processo de colagem. As peças cerâmicas foram divididas em quatro grupos e submetidas ao tratamento térmico em temperatura máxima de 1238 °C. As amostras foram caracterizadas por DRX e medidas físicas de densidade e porosidade aparente, absorção e retração. Os resultados indicaram a presença de fases majoritárias de caulinita e quartzo e variações mineralógicas associadas às distintas origens das matérias-primas. Como esperado, as amostras esmaltadas apresentaram melhor desempenho, obtendo uma menor absorção (8,14%), porosidade reduzida (16,08%) e maior densidade (1,98 g/cm³). No entanto, o grupo não esmaltado apresentou desempenho inferior, reforçando a eficácia do revestimento vítreo na melhoria das características físicas dos corpos cerâmicos. Os resultados evidenciam que tanto o esmalte quanto a procedência das matérias-primas influenciam diretamente as propriedades físicas dos corpos cerâmicos, contribuindo para a aprimoração de formulações e parâmetros de processamento cerâmico.

Palavras-chave: matérias-primas; argila; esmaltes cerâmicos; propriedades físicas.

Abstract: The properties of ceramic products are directly dependent on the composition and physical–structural behavior of the raw materials used. This study evaluated the influence of glaze application on the physical and structural properties of ceramic bodies produced by the slip casting process. The ceramic specimens were divided into four groups and subjected to thermal treatment at a maximum temperature of 1238 °C. The samples were characterized by X-ray diffraction (XRD) and physical measurements, including apparent density and porosity, water absorption, and firing shrinkage. The results indicated the presence of major phases such as kaolinite and quartz, as well as mineralogical variations associated with different raw material origins. As expected, the glazed samples exhibited superior performance, with lower water absorption (8.14%), reduced porosity (16.08%), and higher apparent density (1.98 g/cm³). In contrast, the unglazed group showed inferior performance, reinforcing the effectiveness of the vitreous coating in improving the physical properties of ceramic bodies. These findings demonstrate that both glaze application and raw material provenance directly influence the physical properties of ceramic bodies, contributing to the optimization of ceramic formulations and processing parameters.

Keywords: raw materials; clay; ceramic glazes; physical properties.

INTRODUÇÃO

O termo “cerâmica” deriva do grego *keramos* (κέραμος), que significa “sólido queimado”. A prática de produzir cerâmicas é uma das atividades mais antigas da humanidade, com registros de peças datadas do final do Período Neolítico (aproximadamente entre 26.000 e 5.000 a.C.). No Japão, foram encontrados artefatos com cerca de 8 mil anos. Desde então, a produção cerâmica espalhou-se amplamente, tornando-se um importante marco tecnológico e cultural em diversas sociedades (Kingery *et al.*, 1976).

Além de seu valor cultural, a cerâmica teve papel decisivo no desenvolvimento de diversas tecnologias, atuando como material refratário em fornos, isolante elétrico nos primeiros experimentos com eletricidade e elemento estrutural em sistemas hidráulicos e construtivos. Com o avanço da ciência dos materiais ao longo do século XX, a cerâmica tradicional deu origem às chamadas cerâmicas avançadas, atualmente aplicadas em setores como a engenharia aeroespacial, a biomedicina, a eletrônica, a indústria química e a fabricação de próteses médicas. Esses materiais apresentam propriedades superiores, como elevada dureza, resistência química, estabilidade térmica e controle microestrutural, ampliando significativamente suas possibilidades de uso e consolidando a cerâmica como um dos principais fundamentos da ciência dos materiais contemporânea (Webber *et al.*, 2024; Biesuz, 2020).

As cerâmicas são materiais inorgânicos e não metálicos, formados principalmente por combinações de elementos metálicos e não metálicos, como óxidos, carbonetos e nitretos. Elas têm ampla aplicação devido à combinação única de propriedades físicas, químicas e mecânicas, que variam conforme sua composição e processamento (Callister, 2016).

As principais matérias-primas utilizadas na produção cerâmica são argilas, quartzo e feldspatos. As argilas desempenham papel fundamental como componentes plásticos e aglutinantes, garantindo a moldabilidade da massa. O quartzo atua como componente refratário, contribuindo para o controle das retrações durante a etapa de queima. Os feldspatos funcionam como fundentes, responsáveis por reduzir a temperatura de sinterização e favorecer a vitrificação parcial do material. Além desses constituintes básicos, outros minerais como caulim, talco, alumina e carbonatos podem ser incorporados à formulação, de acordo com as características desejadas para o produto final (Correia *et al.*, 2024).

As argilas, em particular, são formadas por misturas naturais compostas por argilominerais e minerais acessórios. Entre os argilominerais mais comuns destacam-se a caulinita, a illita e a montmorilonita, podendo ocorrer também, em menores proporções, haloisitas, cloritas, sepiolitas e paligorsquitas. Entre os minerais acessórios frequentemente presentes nas argilas encontram-se o quartzo, os feldspatos, os minerais de ferro, as micas, além de carbonatos, sulfatos e fluoretos (Santos, 1975; Barba *et al.*, 1997).

O esmalte cerâmico é um dos elementos essenciais no setor cerâmico, consistindo em um revestimento vítreo aplicado sobre o corpo de base, também chamado industrialmente de “biscoito”. Sua composição típica inclui uma matriz vítrea formada por óxidos de silício (SiO_2), que atuam como formadores de vidro, além de fundentes como óxidos alcalinos e alcalino-terrosos, que reduzem a temperatura de fusão, e estabilizadores como óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3), que conferem resistência química e mecânica. Corantes ou opacificantes, como óxidos de ferro, cobalto e zircônia, podem ser adicionados para conferir propriedades estéticas específicas. Dessa forma, os esmaltes desempenham uma dupla função: decorativa, conferindo brilho, cor e uniformidade, e funcional, garantindo impermeabilidade, resistência química e maior durabilidade ao produto final (Carvalho *et al.*, 2021; Pracidelli, 2008).

O processamento de materiais cerâmicos compreende diversas etapas sucessivas, que englobam de forma geral: a preparação das matérias-primas, conformação, secagem e sinterização. Dentre os métodos de conformação mais empregados destacam-se a prensagem, extrusão, colagem e moldagem por injeção. Essas técnicas têm como finalidade produzir um corpo verde com densidade e homogeneidade adequadas, garantindo o bom desempenho durante a etapa de queima (SENAI, 2017).

Para a conformação de corpos cerâmicos em escala laboratorial e industrial, um dos métodos mais utilizados é a colagem em moldes de gesso (slip casting). Nesse processo, prepara-se uma suspensão aquosa de partículas cerâmicas, denominada barbotina, que é vertida em moldes de gesso porosos. A estrutura porosa do gesso permite a absorção capilar de parte da água da suspensão, promovendo a deposição e compactação das partículas nas paredes internas do molde e favorecendo a solidificação gradual da camada cerâmica. Estudos demonstram que tanto a formulação da barbotina quanto a consistência do molde de gesso influenciam diretamente a qualidade do corpo cerâmico, afetando sua retração, porosidade e estabilidade dimensional (Issaoui *et al.*, 2019; Galvão, 2020).

Nesse contexto, o objetivo geral deste estudo é analisar e caracterizar peças cerâmicas revestidas com esmaltes, a fim de que sejam avaliadas suas propriedades físicas e estruturais, fornecendo informações relevantes sobre esses materiais.

METODOLOGIA

Preparo das Amostras

A matéria-prima utilizada neste trabalho foi uma argila, escolhida por sua elevada plasticidade (índice de plasticidade maior que 15%), característica que facilita a moldagem e confere maior coesão à massa cerâmica. A escolha dessa argila foi baseada nos resultados reportados por Silva (Silva, 2021), que demonstrou, no seu estudo, bom desempenho e estabilidade térmica em formulações de massas cerâmicas, para aplicação em revestimentos cerâmicos. Foram utilizados esmaltes

doados por uma empresa do setor cerâmico localizada no município do Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco, específicos para aplicação em louças sanitárias.

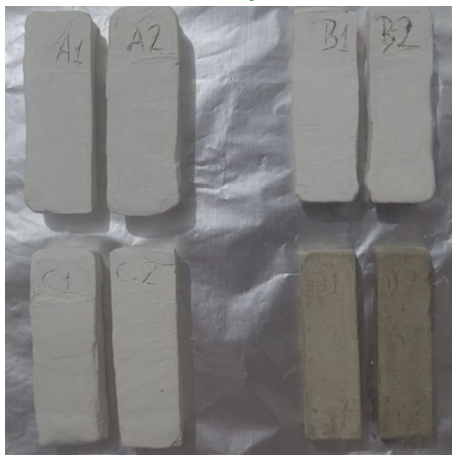
Para a preparação da barbotina (suspensão aquosa de pós cerâmicos), inicialmente foram pesados 70,0 g de argila previamente peneirada e 49 mL de água, utilizando uma proporção de 70% do peso seco de argila em relação ao volume de água. A mistura foi homogeneizada manualmente até a obtenção de uma barbotina uniforme, posteriormente vertida em moldes de gesso para conformação de peças cerâmicas retangulares com dimensões de $5,0 \times 1,5 \times 1,0$ cm, conforme a Figura 1. Foram produzidas oito peças cerâmicas: seis destinadas à aplicação de esmaltes e duas mantidas sem esmalte para fins de comparação. As peças esmaltadas foram divididas em três grupos: A, composto pelo esmalte padrão (referência), B e C, correspondentes a esmaltes com a mesma formulação nominal do padrão, porém de fabricantes distintos. O grupo D representou as peças cerâmicas sem aplicação de esmalte, utilizadas como referência de desempenho não esmaltado.

Figura 1 – Molde de gesso.



Fonte: Autoria Própria.

Após o preenchimento dos moldes, as amostras permaneceram no interior deles por 48 horas, permitindo a absorção da água pelo gesso e a consolidação inicial dos corpos. Posteriormente, as amostras foram cuidadosamente retiradas, identificadas individualmente e deixadas secar naturalmente em temperatura ambiente, conforme a Figura 2.

Figura 2 – Amostras identificadas após retirada do molde de gesso.

Fonte: Autoria própria.

Antes de serem encaminhadas para a etapa de sinterização, as dimensões das amostras foram verificadas com o auxílio de um paquímetro para registrar o tamanho inicial das peças cerâmicas. Além disso, todas as amostras foram pesadas para determinar sua massa inicial. Esses dados permitiram, posteriormente, comparar com as medidas após a queima e avaliar o grau de retração e a variação de massa das peças.

A queima dos corpos de prova foi conduzida em curva de aquecimento e resfriamento lenta, caracterizando um ciclo de monoqueima. O processo foi realizado em um forno estacionário da marca Alonso Schaub, operando com taxa de aquecimento de 1 °C/min até a temperatura máxima de 1238 °C, mantida por 88 minutos. Após o patamar térmico, o resfriamento também ocorreu de forma controlada, mantendo-se a taxa de 1 °C/min até a temperatura ambiente.

Técnicas de Caracterização

As propriedades físico-mecânicas das peças cerâmicas sinterizadas foram avaliadas por meio de ensaios físicos. A retração linear de queima (RI) foi determinada a partir da variação dimensional das peças, considerando as medidas do comprimento inicial (L_i), obtidas antes da queima, e do comprimento final (L_f), medido após a queima. O valor de retração foi calculado de acordo com a Equação (1).

$$R_l(\%) = \frac{L_i - L_f}{L_i} \times 100 \quad (1)$$

A absorção de água (AA), a porosidade aparente (PA) e a densidade aparente (DA) foram obtidas pelo método de imersão em água, fundamentado no princípio de Arquimedes. Para as medições, utilizou-se uma balança de precisão com quatro casas decimais, acoplada a um sistema para determinação da massa imersa. Para os cálculos, consideraram-se três condições: massa seca da amostra após a queima

(Ms), massa úmida após imersão em água por 24 horas (Mu) e massa da amostra imersa em água (Mi), todas expressas em gramas (g). A partir desses valores, os parâmetros AA, PA e DA foram calculados conforme as Equações (2), (3) e (4).

$$AA(\%) = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (2)$$

$$PA(\%) = \frac{Mu - Ms}{Ms} \times 100 \quad (3)$$

$$DA = \frac{Mu - Mi}{Mu - Ms} \quad (4)$$

A caracterização mineralógica da argila utilizada para moldagem das peças e dos esmaltes utilizados foi realizada por Difração de Raios X (DRX) em um difratômetro modelo D8 Advance da Bruker, utilizando radiação $K\alpha$ ($\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$). As análises foram conduzidas em temperatura ambiente, com varredura efetuada na faixa de 2θ de 10° a 60° , passos de $0,02^\circ$ e tempo de aquisição de 1,0 s por passo. A avaliação da coloração dos esmaltes foi realizada por inspeção visual criteriosa, com o objetivo de analisar a homogeneidade, tonalidade e uniformidade do acabamento superficial (Rosso, 2023). Após o processo de sinterização, as peças cerâmicas foram examinadas em ambiente devidamente iluminado, permitindo a identificação de variações cromáticas entre as amostras. Essa análise possibilitou determinar quais peças apresentaram tonalidade mais clara, evidenciando diferenças no desenvolvimento da cor após a queima.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta a composição química dos esmaltes A, B e C empregados neste trabalho. Todos os três esmaltes possuem a mesma formulação, sendo o esmalte A adotado como padrão, os esmaltes B e C correspondem à mesma composição, porém provenientes de fabricantes distintos. Essa padronização composicional permite isolar o efeito da procedência das matérias-primas empregadas pelos diferentes fornecedores, tornando possível avaliar se variações de origem influenciam o comportamento dos esmaltes e os resultados observados após a etapa de sinterização.

A análise dos dados possibilita compreender a participação de cada componente da matéria-prima na fusão, viscosidade e formação da fase vítrea do revestimento cerâmico, aspectos essenciais para o desempenho final do esmalte após a sinterização. Com base nos valores apresentados (Tabela 1), a formulação corresponde a proporções típicas de esmaltes empregados em revestimentos cerâmicos, compostos por formadores de rede, fundentes e modificadores de fusão. Essa configuração favorece a maturação adequada durante a sinterização, contribuindo para a formação de uma superfície homogênea, bem fundida e com propriedades compatíveis com o produto final (Pasiut, 2021).

A composição apresentada evidencia uma formulação balanceada entre os principais grupos de matérias-primas empregadas em esmaltes cerâmicos. O

feldspato (30,69%) e a albita (8,67%) atuam como fundentes, promovendo a fusão e formação da fase vítrea durante a sinterização.¹⁸ O quartzo (24,35%) e o caulim (4,61%) exercem papel de formadores de rede, conferindo estabilidade estrutural e resistência térmica à matriz vítrea (Matin, 2019).

A calcita (15,72%) e a dolomita (2,79%) funcionam como modificadores de fusão, reduzindo a temperatura de amolecimento e auxiliando na formação de uma superfície mais homogênea.²⁰ O óxido de zinco (1,00%) atua como agente estabilizante, contribuindo para o brilho e a adesão do esmalte à base cerâmica (Pasiut *et al.*, 2024). A presença de zircônio (7,91%) e do opacificante (3,96%) está relacionada à opacidade e ao aspecto estético do revestimento final, uma vez que esses componentes dificultam a passagem de luz e favorecem o desenvolvimento de esmaltes brancos e opacos (Aliu *et al.*, 2023).

Tabela 1 – Composição química dos esmaltes cerâmicos.

Matéria-prima	Quantidade (%)
Caulim	4,61
Calcita	15,72
Cola	0,20
Quartzo	24,35
Dolomita	2,79
Feldspato	30,69
Albita	8,67
Hexametáfosfato	0,10
Óxido de zinco	1,00
Zircônio	7,91
Opacificante	3,96

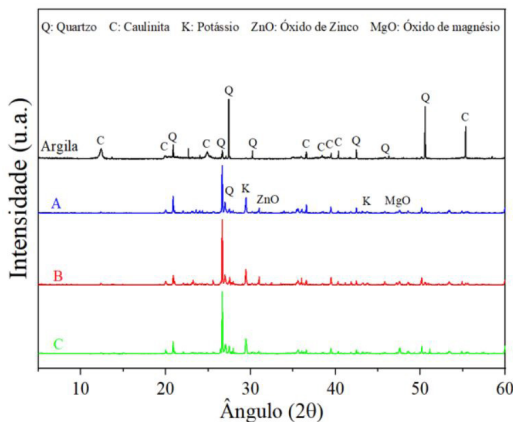
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 3 apresenta os difratogramas de DRX obtidos para a argila utilizada na moldagem das peças e para os esmaltes designados como A (padrão), B e C. As fases mineralógicas foram identificadas por comparação dos picos experimentais com padrões cristalográficos dos arquivos PDF-2 (ICDD). As fases identificadas incluem quartzo (nº 96-901-0147), caulinita (nº 00-005-0586), óxido de potássio/potássio associado (nº 96-901-1981), óxido de zinco (nº 96-210-7060) e óxido de magnésio (nº 96-901-3245).

O difratograma da argila evidencia as fases majoritárias da caulinita e do quartzo. Confirmando que a argila tem natureza caulínica. Essa fase é associada à plasticidade elevada e à formação de mulita após o aquecimento acima de 950–1000 °C, o que contribui para a resistência mecânica final (Sánchez-Soto *et al.*, 2022). A presença de quartzo é típica de argilas silicosas e influencia diretamente o controle da retração e a estabilidade térmica durante a sinterização (Lewicka *et al.*, 2020).

A ocorrência simultânea de quartzo em todos os esmaltes é esperada, pois esse mineral é incorporado como fase refratária e estabilizadora dimensional, reduzindo a retração e ajudando no controle da viscosidade da fase vítrea durante a queima. A presença de fases ricas em potássio (K) é associada à decomposição de feldspatos potássicos presentes na formulação dos esmaltes. Em temperaturas acima de 1100 °C ocorre fusão parcial dos feldspatos, promovendo formação de fase vítrea e cristalização residual de fases potássicas, que podem se manifestar no DRX como picos relativamente estreitos (Lewicka *et al.*, 2020).

Figura 3 – Difratogramas de raios- X.



Fonte: Autoria Própria.

O aparecimento de picos atribuídos ao ZnO e MgO indica que parte desses óxidos permanece cristalina após o processo de queima, sugerindo que não foram totalmente dissolvidos na matriz vítrea. O ZnO é particularmente relevante, pois atua como modificador de rede, aumentando a densidade da fase vítrea, promovendo opacidade e podendo reduzir a tensão superficial da fusão, favorecendo o nivelamento do esmalte (Al-Hindawi *et al.*, 2025).

A presença de MgO está associada à modificação estrutural da fase vítrea e ao aumento da estabilidade térmica. No entanto, a literatura aponta que esse comportamento é desfavorável, pois estudos recentes mostram que MgO tende a promover a formação de fases cristalinas secundárias e a reduzir a mobilidade estrutural do vidro, o que contribui para o endurecimento e a opacificação, demonstrando que a adição de MgO favorece a cristalização controlada e aumenta a rigidez da rede, justificando o aparecimento de picos residuais de MgO nos difratogramas (Pei *et al.*, 2023).

De modo geral, a mineralogia observada nos difratogramas confirma que os esmaltes possuem estrutura cristalina após sinterização, com quartzo como fase comum e óxidos modificadores (K, ZnO e MgO) modulando a viscosidade, o grau de vitrificação e a formação da fase vítrea. A intensidade relativa dos picos sugere níveis distintos de dissolução e cristalização, comportamento típico de esmaltes industriais formulados para operar em faixas estreitas de maturação.

A Tabela 2 apresenta os resultados dos ensaios de retração linear (RI), absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA).

Tabela 2 – Ensaios físicos: retração linear (RI), absorção de água (AA), porosidade aparente (PA) e densidade aparente (DA).

Amostra	Retração Linear (%)	Absorção de Água (%)	Porosidade Aparente (%)	Densidade Aparente (g/cm ³)
A	8,06	8,14	16,08	1,97
B	8,47	8,96	17,29	1,93
C	4,62	8,64	16,79	1,94
D	7,87	11,29	20,94	1,86

Fonte: Autoria Própria.

A retração linear média após a sinterização evidenciou diferenças significativas entre os grupos de amostras. O maior valor médio foi observado para o grupo B (8,47%), no entanto, o grupo C apresentou a menor retração média (4,62%), caracterizando um comportamento distinto e menos suscetível à variação dimensional no processo de sinterização. Os grupos A (8,06%) e D (7,87%) exibiram retrações elevadas e mutuamente próximas, situando-se em um patamar semelhante ao do grupo B. Esses três grupos compõem o conjunto de materiais com maior tendência à retração após a queima. Já o grupo C, com retração significativamente inferior, destaca-se como o sistema menos afetado pela sinterização, reforçando sua diferença em relação aos demais.

As retrações elevadas estão relacionadas à perda de massa associada à eliminação de água estrutural, queima de compostos orgânicos, decomposição de carbonatos e reorganização estrutural das partículas, promovendo fechamento de poros e densificação intensa. O comportamento observado no grupo B sugere maior participação desses fenômenos, possivelmente influenciada pela microestrutura inicial do corpo, variações de compactação e maior proporção de fases que passam por transformações volumétricas durante o aquecimento, como quartzo e minerais carbonáticos (Jayaweera *et al.*, 2024).

Por outro lado, o menor valor médio registrado para o grupo C (4,62%) indica restrição significativa à contração durante a queima. Esse comportamento pode ser explicado pela formação antecipada de fase vítrea na sinterização, que reduz a mobilidade das partículas e estabiliza dimensionalmente o corpo cerâmico. A presença de óxidos fundentes na superfície, provenientes do tipo de esmalte utilizado, atua limitando as tensões de retração e controlando o colapso estrutural dos poros (Modesto *et al.*, 2023).

A absorção de água média das amostras revelou diferenças relevantes entre os grupos, refletindo possíveis diferenças na porosidade aberta e no grau de sinterização alcançado. O maior valor médio foi observado no grupo D (11,29 %), indicando menor densificação e maior quantidade de poros interconectados. Por outro lado, grupo A apresentou a menor absorção média (8,14%), sugerindo melhor adensamento e menor porosidade residual após a queima. Os grupos B (8,96%) e

C (8,64%) posicionaram-se em uma faixa intermediária, exibindo comportamentos semelhantes entre si e indicando níveis moderados de sinterização.

Os maiores valores de absorção observados no grupo D, constituído pelas amostras sem aplicação de esmalte, indicam presença de maior volume de poros interconectados, característica de corpos cerâmicos submetidos a sinterização menos efetiva, possivelmente devido à menor quantidade de fases fundentes, distribuição granulométrica menos favorável ou menor densificação durante a queima. Uma microestrutura mais aberta permite maior penetração de água e está diretamente associada à menor retração linear e ao menor fechamento de poros, fenômenos frequentemente discutidos em processos de sinterização cerâmica (Jayaweera *et al.*, 2024; Modesto *et al.*, 2023).

Os valores médios de porosidade aparente variaram entre 16,08% e 20,94%, refletindo diferenças significativas entre as formulações. O grupo A apresentou a menor porosidade média (16,08%), indicando maior eficiência na formação de fase vítrea e no fechamento de poros durante a sinterização. Essa quantidade reduzida de vazios acessíveis está diretamente associada aos menores valores de absorção de água observados para esse grupo, comportamento típico de massas com boa mobilidade da fase líquida e maior densificação (Silva, 2010).

O grupo B apresentou porosidade intermediária (17,29%), aproximadamente 1 ponto percentual acima do grupo A. Essa maior fração de poros conectados se refletiu em absorções de água mais elevadas, compatíveis com a relação direta entre porosidade aberta e capacidade de absorção, amplamente discutida na literatura. O grupo C, com porosidade média de 16,79%, mostrou comportamento semelhante ao do grupo A. Essa proximidade se refletiu também nos valores intermediários de absorção de água, sugerindo boa formação de fase vítrea e estabilidade microestrutural adequada.

Por sua vez, o grupo D, composto pelas amostras sem aplicação de esmalte, apresentou a maior porosidade média (20,94%). Essa microestrutura mais aberta resulta diretamente nos maiores valores de absorção de água registrados. A ausência de esmalte impede a formação de uma camada fundente adicional na superfície, reduzindo a mobilidade da fase líquida durante a sinterização, dificultando o fechamento dos poros e limitando a densificação do corpo cerâmico. Como a absorção de água depende essencialmente da quantidade de poros interconectados, o comportamento das amostras D confirma a relação direta entre porosidade aparente e absorção observada em cerâmicas de revestimento.

Assim, a ordem crescente de porosidade aparente, $A < C < B < D$, corresponde plenamente ao padrão da absorção de água, $A < C < B < D$, evidenciando a coerência entre ambos os resultados e reforçando a influência da composição e da presença do esmalte na eficiência da sinterização.

Os valores médios de densidade aparente variaram de 1,86 g/cm³ a 1,97 g/cm³, evidenciando diferenças estruturais entre os grupos analisados. O grupo A apresentou a maior densidade média (1,97 g/cm³), indicando elevado grau de compactação e maior eficiência na densificação durante a sinterização. Esse

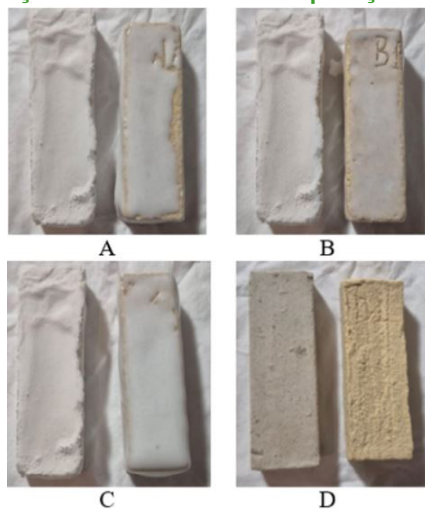
comportamento é coerente com os menores valores de porosidade e absorção de água associados a esse grupo, reforçando a formação mais efetiva de fase vítrea e o fechamento dos poros (Silva, 2010).

O grupo C apresentou densidade média de $1,94 \text{ g/cm}^3$, muito próxima à registrada para o grupo A. Essa similaridade sugere que ambas as formulações atingiram eficiência comparável no processo de densificação, resultando em microestruturas consolidadas e com baixo volume de poros interconectados. O grupo B exibiu densidade média ligeiramente inferior ($1,93 \text{ g/cm}^3$), compatível com uma microestrutura intermediária, onde ainda se observa uma fração maior de poros abertos.

No entanto, o grupo D, composto pelas amostras sem aplicação de esmalte, apresentou a menor densidade média do estudo ($1,86\%$). A ausência de esmalte reduz a mobilidade da fase líquida na superfície do corpo cerâmico, dificultando o fechamento dos poros e limitando o processo de densificação. Esse resultado é coerente com os maiores valores de porosidade e absorção de água registrados para esse grupo, reforçando a relação direta entre densidade aparente, porosidade aberta e presença do esmalte nos corpos cerâmicos.

A Figura 4 ilustra a comparação dimensional entre um corpo de prova no estado verde e após a sinterização, evidenciando a retração linear característica do processo cerâmico. Essa observação, corrobora a quantificação da retração linear para todas as amostras, com os valores já apresentados e discutidos.

Figura 4 – Comparação da retração linear entre as amostras: A, B e C com aplicação de esmalte e D sem aplicação de esmalte.

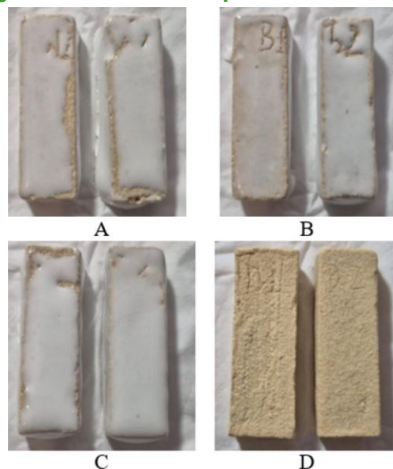


Fonte: Autoria Própria.

A Figura 5 ilustra o conjunto de amostras após a etapa de sinterização, permitindo observar diferenças de coloração, uniformidade superficial e possíveis defeitos visíveis, como microfissuras, empenamento ou variações de tonalidade.

Essas observações complementam as análises físico-químicas realizadas anteriormente e auxiliam visualmente na interpretação dos resultados de retração, porosidade e densidade.

Figura 5 – Amostras após a sinterização.



Fonte: Autoria Própria.

De modo geral, as amostras revestidas apresentam superfície esmaltada branca, com brilho moderado e relativa homogeneidade. Entretanto, algumas amostras exibem regiões de ausência de esmalte nas bordas, deixando o substrato cerâmico exposto e revelando uma transição abrupta entre o revestimento e o corpo do material. Já as amostras não esmaltadas mantêm a cor natural bege-claro, com textura áspera e porosa típica de materiais sinterizados sem cobertura vítrea.

Quanto à integridade física, todas as peças permanecem estruturalmente íntegras, sem quebras, fraturas visíveis ou deformações pronunciadas. Em algumas amostras, observam-se apenas pequenas irregularidades nas extremidades, possivelmente decorrentes da retração térmica ou do manuseio prévio ao processo térmico.

Em relação às diferenças de superfície, parte das amostras esmaltadas mostra variações discretas de brilho ou espessura do esmalte, formando áreas mais opacas ou levemente translúcidas que sugerem heterogeneidade no fluxo do revestimento durante a fusão. As amostras sem revestimento continuam apresentando superfície rugosa e de alta porosidade aparente, características de corpos cerâmicos não vitrificados.

A análise de cor também revela contrastes entre os grupos. Nas amostras revestidas, a superfície predominantemente branca apresenta, em alguns casos, zonas ligeiramente amareladas ou mais claras justamente onde o esmalte não se depositou, revelando o tom natural do corpo cerâmico. Já as amostras não esmaltadas exibem coloração uniforme, sem manchas escuras ou variações que indiquem uma queima irregular.

No que diz respeito aos defeitos visíveis, não foram identificadas trincas evidentes nem empenamentos significativos. Algumas peças esmaltadas, entretanto, apresentam pequenas bolhas superficiais, possivelmente decorrentes do aprisionamento de gases ou da volatilização de componentes do esmalte durante a sinterização.

Além disso, é importante destacar que, no contexto industrial, a análise visual desempenha papel essencial no controle de qualidade, sendo amplamente utilizada para detectar defeitos superficiais, avaliar a uniformidade estética e assegurar que o produto final atenda aos padrões comerciais e normativos exigidos. A inspeção visual, embora simples e de baixo custo, permite a identificação imediata de irregularidades que podem comprometer tanto o desempenho quanto o valor estético dos revestimentos cerâmicos.

Por fim, com base na avaliação visual realizada, observa-se que os três esmaltes testados apresentaram comportamento bastante semelhante, especialmente no que diz respeito à coloração branca obtida após a queima. Assim, recomenda-se a aplicação de qualquer um dos três sistemas em revestimentos cerâmicos, uma vez que, mesmo utilizando matérias-primas de fornecedores distintos, todos demonstraram desempenho satisfatório e compatível para uso industrial.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A argila utilizada apresentou características compatíveis com matérias-primas caulínicas adequadas à conformação cerâmica. Embora os esmaltes possuíssem a mesma formulação nominal, verificou-se que diferenças na procedência de quartzo e feldspato influenciaram o comportamento sinterizante e as propriedades finais. Os resultados físicos confirmaram a eficácia do esmalte na densificação: o grupo A apresentou os melhores indicadores (absorção de 8,14%, porosidade de 16,08% e densidade de 1,97 g/cm³), enquanto o grupo não esmaltado exibiu menor desempenho, evidenciando o papel da cobertura vítrea na redução de poros e na mobilidade da fase líquida durante a queima. As variações de retração linear, entre 4,62% (grupo C) e 8,47% (grupo B), reforçam que a mineralogia de origem afeta a reorganização volumétrica no processamento térmico. O DRX confirmou fases caulínicas e a presença de minerais acessórios, relacionáveis à formação de poros e ao desenvolvimento de fases refratárias. A inspeção visual corroborou os resultados, indicando superfícies esmaltadas homogêneas, com apenas pequenas imperfeições pontuais. O esmalte melhora significativamente a densificação e reduz porosidade e absorção; a procedência das matérias-primas afeta propriedades críticas; e esses fatores devem ser considerados na otimização de formulações e parâmetros de queima em processos cerâmicos.

REFERÊNCIAS

- AJADI, Michael Olaniyi. Physicochemical analyses of feldspar ceramic glazes produced with borax and potash. **International Journal of Advances in Engineering and Management**, v. 3, n. 7, p. 2326-2331, 2021. Disponível em: https://ijaem.net/issue_dcp/Physicochemical%20Analyses%20of%20Feldspar%20Ceramic%20Glazes%20Produced%20with%20Borax%20and%20Potash.pdf. Acesso em: 05 nov. 2025.
- AL-HINDAWI, A. H. *et al.* Effect of (ZnO–CaO) system on the opacity properties of low-temperature ceramic glaze. **Journal of College of Fine Arts**, v. 29, p. 29-38, 2025. DOI: <https://doi.org/10.35560/jcofarts1578>. Disponível em: <https://jcofarts.uobaghdad.edu.iq/index.php/jcofarts/article/view/1578>. Acesso em: 01 dez. 2025.
- ALIU, Ebenezer Tayo; OGUNLEYE, T. Christopher; ADEWUSI, F. Oluwaseun. Development of zirconia-based opaque glazes using mid-temperature glaze using raw materials from Kogi State, Nigeria. **Journal of Materials Science Research and Reviews**, v. 6, n. 3, p. 638–648, 2023. Disponível em: <https://journaljmsrr.com/index.php/JMSRR/article/view/274>. Acesso em: 05 nov. 2025.
- BARBA, J.; *et al.* **Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas**. 1. ed. Castellón, España: Instituto de Tecnología Cerámica – AICE, 1997. 291 p.
- BIESUZ, M. What's new in ceramics sintering? A short report on the latest trends and prospects. **Ceramics International**, v. 46, n. 14, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2020.100868>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359028620300668?via%3Dihub>. Acesso em: 24 out. 2025.
- CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/8800475/mod_resource/content/1/473965973-Ciencia-e-Engenharia-de-Materiais-CALLISTER-9%C2%AA-Edicao-pdf.pdf. Acesso em: 22 set. 2025.
- CORREIA, G. S. *et al.* **Evaluation of clayey raw materials and ceramic masses from ceramic building material companies located in northeastern Brazil**. *Minerals*, v. 14, n. 11, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/14/11/1062>. Acesso em: 22 out. 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.finmec.2024.100274>. Acesso em 28 nov. 2025.
- GALVÃO, D. F. **Influência da consistência do molde de gesso nas propriedades de peças produzidas por colagem de barbotina**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <https://repositorio.cefetmg.br/items/545defe7-5d78-4b1b-95f5-d424432be201>. Acesso em: 22 set. 2025.

ISSAOUI, M.; LIMOUSY, L. Low-cost ceramic membranes: Synthesis, classifications, and applications. **Comptes Rendus Chimie**, v. 22, n. 2-3, p. 175–187, 2019. DOI: 10.1016/j.crci.2018.09.014. Disponível em: <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/chimie/articles/10.1016/j.crci.2018.09.014/>. Acesso em: 23 set. 2025.

JAYAWEERA, J. M. N.; NARAYANA, M.; ADIKARY, S. U. **Modeling and simulation of ceramic tiles linear shrinkage variation during the sintering process**. Forces in Mechanics, v. 15, 2024, 100274. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.finmec.2024.100274>.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R. **Introduction to Ceramics**. 2. ed. New York: Wiley-Interscience, 1976.

LEWICKA, E.; TRENCZEK-ZAJĄC, A. **Investigations of feldspar–quartz raw materials after firing: effect of various Na₂O/K₂O ratio and synthetic pigments addition**. Minerals, v. 10, n. 7, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/min10070646>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/10/7/646>. Acesso em: 01 dez. 2025.

MATIN, Moujan. **Tin-based opacifiers in archaeological glass and ceramic glazes: a review and new perspectives**. Archaeological and Anthropological Sciences, v. 11, p. 1155–1167, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12520-018-0735-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12520-018-0735-2>. Acesso em: 05 nov. 2025.

MODESTO, C. O. *et al.* **Deformação pirolástica em porcelanatos: uma breve revisão**. Cerâmica Industrial, v. 28, n. 1, e152801, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4322/cerind.2024.024>. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/cerind.2024.024>. Acesso em: 28 nov. 2025.

PASIUT, Katarzyna *et al.* Raw glass-ceramics glazes from SiO₂–Al₂O₃–CaO–MgO–Na₂O–K₂O system modified by ZrO₂ addition – Changes of structure, microstructure and surface properties. **Open Ceramics**, v. 8, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100188>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666539521001346>. Acesso em: 25 nov. 2025.

PASIUT, Katarzyna; PARTYKA, Janusz. Thermal properties of glass-ceramic glazes with zirconium oxide added to multicomponent system SiO₂–Al₂O₃–CaO–MgO–Na₂O. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 148, p. 1867–1874, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11869-5>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10973-022-11869-5>. Acesso em: 05 nov. 2025.

PEI, Z. *et al.* Preparation and Properties of MgO–Al₂O₃–SiO₂ Glass–Ceramics with Controllable Crystalline Phases. **Crystals**, v. 13, n. 8, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst13081261>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4352/13/8/1261>. Acesso em: 01 dez. 2025.

PRACIDELLI, Sebastião. **Estudo dos esmaltes cerâmicos e engobes**. Cerâmica Industrial, v. 13, n. 1/2, p. 9-16, jan./abr. 2008. Disponível em: <https://>

www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657347f8c9d6e028b4732/pdf/ci-13-1-587657347f8c9d6e028b4732.pdf. Acesso em: 24 out. 2025.

ROSSO, L. S. *et al.* **Estudo da influência das condições de queima na variação de tonalidade em monoporosas.** *Cerâmica Industrial*, v. 28, n. 1, e212801, 2023. DOI: <https://doi.org/10.4322/cerind.2024.030>. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/doi/10.4322/cerind.2024.030>. Acesso em: 27 nov. 2025.

SÁNCHEZ-SOTO, P. J. *et al.* **Study of a waste kaolin as raw material for mullite ceramics and mullite refractories by reaction sintering.** *Materials*, v. 15, n. 2, p. 583, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma15020583>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/2/583>. Acesso em: 01 dez. 2025.

SANTOS, P. S. Fundamentos. In: SANTOS, P. S. **Tecnologia de argilas aplicada às argilas brasileiras.** São Paulo: Edgard Blücher, 1975. v. 1. 340 p.

SERVIÇO NACIONAL DE APRENDIZAGEM INDUSTRIAL. **Processos produtivos de materiais cerâmicos.** São Paulo: SENAI-SP, 2017. Disponível em: <https://www.livros1.com.br/pdf-read/livar/PROCESSOS-PRODUTIVOS-DE-MATERIAIS-CER%C3%82MICOS.pdf>. Acesso em: 24 out. 2025.

SILVA, P. L. B. *et al.* **Formação de fase vítrea e densificação em cerâmicas: sinterização por fase líquida.** 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/28836/000768734.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2025.

SILVA, Renata Arcelino da. **Efeitos da temperatura no comportamento mecânico de matérias-primas utilizadas na produção de cerâmicas de revestimento na indústria do Cabo de Santo Agostinho – PE.** 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. Disponível em: <https://repository.ufrpe.br/handle/123456789/2712>. Acesso em: 11 nov. 2025.

TEIXEIRA, S. R.; SOUZA, S. A. de; MOURA, C. A. I. **Mineralogical characterization of clays used in the structural ceramic industry in the west of São Paulo State, Brazil.** *Cerâmica*, v. 47, n. 304, p. 204–207, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132001000400007>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ce/a/zmPqN4t5qWTSf4TFcK7McLJ/?lang=en>. Acesso em: 28 nov. 2025.

WEBBER, K. G.; CLEMENS, O.; BUSCAGLIA, V.; MALIČ, B.; BORDIA, R. K.; FEY, T.; ECKSTEIN, U. Review of the opportunities and limitations for powder based high throughput solid state processing of advanced functional ceramics. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 44, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116780>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0955221924006538?via%3Dihub>. Acesso em: 24 out. 2025.