

Estudo do acoplamento entre massas de porcelanato para produção de dupla carga

Marcela Silva de Almeida ¹, Vicente de Lorenzi ², José Eduardo Tavares Cordioli ^{3*}, Alexandre Zaccaron ²

¹ Departamento de Design de Produto, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, Santa Catarina, Brasil

² Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, Santa Catarina, Brasil

³ Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil

*e-mail: jose.cordioli@gmail.com

Resumo:

Este trabalho investigou o acoplamento entre duas massas cerâmicas no processo de prensagem por dupla carga, com o objetivo de avaliar sua compatibilidade térmica e o impacto nas propriedades finais do porcelanato técnico. Os resultados demonstraram que as formulações com dupla carga apresentaram, em geral, desempenho inferior às massas únicas, exceto na resistência mecânica à flexão, que foi favorecida pelas tensões internas geradas entre as camadas, resultando em maior rigidez. A análise dilatométrica revelou que a compatibilidade entre as massas, especialmente em termos de temperatura de amolecimento, é essencial para minimizar defeitos dimensionais. A formulação com dilatações mais semelhantes entre substrato e camada superior apresentou menor curvatura, indicando a viabilidade técnica da dupla carga quando há compatibilidade térmica entre as massas envolvidas. E por fim, pôde-se encontrar uma melhor formulação com curvaturas menos intensas, mostrando que a obtenção de materiais com duplo carregamento é possível, desde que as massas tenham dilatações semelhantes.

Palavras-chave: Dupla Carga, Porcelanato, Acoplamento.

1. INTRODUÇÃO:

A competitividade no mercado globalizado tem se intensificado, e o setor cerâmico não é exceção a essa realidade. A busca por melhorar a qualidade dos processos, reduzir a geração de produtos não conformes e aumentar a produtividade tem se mostrado essencial para a sustentabilidade das empresas [1,2]. Nesse contexto, um dos fatores determinantes para manter a competitividade é a produção de produtos de alta qualidade a um custo cada vez mais reduzido [3]. A redução de custo no processo cerâmico pode ser alcançada por meio de diferentes estratégias, e uma das mais eficazes é a adoção do método de prensagem por duplo carregamento (dupla carga), que visa otimizar a utilização dos materiais e reduzir os custos de produção [4]. A introdução da tecnologia de dupla camada (dupla carga) em porcelanatos surgiu como uma resposta às exigências crescentes do mercado por produtos cerâmicos com alto desempenho técnico e acabamento estético sofisticado, e com eficiência de produção. Esse processo consiste na prensagem simultânea de duas formulações distintas de pó atomizado: uma camada inferior, de menor custo e com função estrutural, e uma camada superior, composta por matérias-primas nobres e pigmentos cerâmicos que conferem a estética final do produto [5,6].

Contudo, a fabricação de cerâmica envolve um processo complexo, sujeito a uma série de variáveis, especialmente quando se utilizam métodos alternativos de fabricação, como o duplo carregamento [7]. Embora esse método traga benefícios econômicos, também apresenta desafios relacionados ao controle rigoroso das condições de processo. O revestimento cerâmico começa a adquirir suas características técnicas em cada etapa da fabricação, especialmente durante a queima, onde o resfriamento do material leva ao acoplamento efetivo do corpo cerâmico. Para porcelanatos isso ocorre a temperaturas superiores a 1200 °C, quando o material deixa de se comportar como um líquido viscoso e se torna um sólido [8,9].

A partir dessa temperatura, a diferença nas contrações entre a camada superficial e o substrato pode gerar tensões que resultam em defeitos [10,11], como curvaturas nas peças cerâmicas [12]. O entendimento e a caracterização desses defeitos são essenciais para classificar adequadamente os materiais, especialmente quando se busca a definição de porcelanato técnico, um tipo de revestimento com características superiores em termos de resistência e durabilidade.

A análise dessas questões, especialmente no que diz respeito à interação entre as camadas no processo de duplo carregamento, é fundamental para aprimorar as técnicas de fabricação e garantir a qualidade dos produtos cerâmicos, alinhando inovação com as demandas do mercado. Diante desse cenário, este trabalho tem como objetivo principal investigar a compatibilidade térmica entre as formulações cerâmicas utilizadas nas camadas inferior e superior de porcelanatos produzidos por prensagem com dupla carga. Para isso, foram avaliadas propriedades dilatométricas, retrações lineares e o comportamento dimensional após a queima, buscando identificar combinações de massas que minimizem a geração de tensões internas e deformações. A pesquisa também visa propor critérios técnicos para o desenvolvimento de composições cerâmicas mais estáveis, com base em matérias-primas disponíveis industrialmente, contribuindo para a melhoria do controle de qualidade e o aprimoramento do processo produtivo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

2.1. Materiais:

Para a realização do estudo foram selecionadas algumas massas de referência monocores, que posteriormente foram dosadas. Ao todo, utilizou-se uma massa base (DC) e outras quatro massas coloridas: WE (branca) e três derivadas de uma massa base pigmentada (BC), obtidas com a adição de corantes, resultando nas tonalidades cinza (CI), marrom (CH) e preta (NP). Essas formulações são típicas de porcelanato técnico, com adição de corantes e zircônio, visando compor uma paleta de cores adequada às demandas do mercado consumidor. A composição das matérias-primas utilizadas está apresentada na Tab.1.

Tabela 1. Composição das matérias-primas das massas usadas no estudo

Matérias-primas	DC	WE	BC
Feldspato	32	58	51
Caulim	22	25	24
Argila	46	12,5	25
Zircônio	-	4,5	-

A composição química das massas foi realizada por espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda (WDXRF) em um equipamento Panalytical Axios Max. A análise térmica foi realizada por dilatometria em um dilatômetro de contato (Netzsch DIL 402 EP) a uma taxa de aquecimento de 10 °C/min até atingir 1100 °C, sob uma atmosfera de ar sintético, sem fluxo de gás, com corpos-de-prova de 52 mm. A caracterização térmica teve como principal finalidade a identificação das temperaturas de início de sinterização, permitindo avaliar o comportamento dilatométrico das diferentes massas e sua influência na estabilidade dimensional das formulações em dupla carga [13,14].

Após a seleção das massas, foi elaborada uma formulação padrão (STD), composta integralmente pela massa DC, com o objetivo de avaliar seu desempenho individual e utilizá-la como referência para comparação com as demais composições. Adicionalmente, foram desenvolvidas quatro formulações experimentais (F1, F2, F3 e F4), nas quais foram usadas 70% da massa base (DC) na camada inferior, de menor custo, e 30% de massas coloridas e nobres na camada superficial, conforme descrito na Tab.2. As cores desenvolvidas no estudo, com base nas massas utilizadas, são mostradas na Fig.1.

Tabela 2. Formulações desenvolvidas no estudo.

Massas	Formulações (%)				
	STD	F1	F2	F3	F4
DC	100	70	70	70	70
CH	-	30	-	-	-
CI	-	-	30	-	-
NP	-	-	-	30	-
WE	-	-	-	-	30

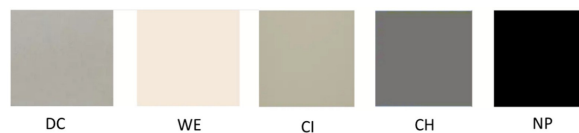


Figura 1. Representação das cores com base nas massas aplicadas no estudo.

2.2. Conformação dos corpos de prova:

A conformação dos corpos de prova foi realizada por prensagem uniaxial (pressão de compactação de 400 kgf/cm²) em uma prensa hidráulica laboratorial (GABRIELLI L4/110) com uma cavidade de 70 mm × 30 mm. Essa pressão foi mantida constante para todas as formulações, tanto para a formulação padrão (STD) quanto para os sistemas de dupla carga (F1 a F4), assegurando uniformidade na compactação. O carregamento do pó atomizado na caixa matriz foi de 25 g. com uma umidade de 6,5 ± 0,5%, e ao todo 5 amostras por formulação foram desenvolvidas, para posteriormente serem realizados os ensaios de caracterização.

Cada corpo de prova foi prensado em duas camadas, variando-se o tipo de massa de acordo com cada formulação testada, com exceção do corpo de prova de referência (STD), que foi conformado com apenas uma camada de pó atomizado, visando avaliar seu comportamento individual. A prensagem das amostras em dupla camada seguiu as práticas industriais aplicadas à produção de porcelanato técnico de dupla carga, sendo a camada inferior (DC) conformada com espessura média de 7 mm e a camada superior (massa pigmentada), com 3 mm, como pode ser observado de forma exemplificada na Fig.2. Nas formulações duplas (F1 a F4), foi adotado o critério de utilização de 70% da massa base (DC) na camada inferior, de menor custo, e 30% de massas coloridas e nobres na camada superior. As massas da camada superficial foram escolhidas dentre as formulações pigmentadas da fábrica, ricas em corantes e zircônio, com o objetivo de simular condições industriais típicas.



Figura 2. Exemplo de material prensado em dupla carga visto na transversal

Após a conformação, as amostras foram secas em estufa laboratorial a $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ e, em seguida, submetidas à queima em forno a rolos (SERVITECH CT094 / S150), a uma temperatura de 1210 °C , com ciclo total de 50 minutos.

2.3. Caracterização dos corpos de prova:

Os corpos de prova passaram por ensaios técnicos de acordo com a norma ABNT NBR ISO 13006 [15]. O ensaio de densidade aparente a seco e após a queima foi realizado conforme princípio de Arquimedes [16] e resistência mecânica à flexão após a queima foi realizado em um flexímetro CT101. Por fim, o ensaio de curvatura diferida foi realizado com auxílio de uma haste com relógio comparador.

3. RESULTADOS:

3.1. Caracterização dos materiais:

A sílica (SiO_2) e a alumina (Al_2O_3) constituem os principais óxidos presentes nas massas cerâmicas usadas no estudo (Tab.3), estando associadas predominantemente a presença de aluminossilicatos hidratados (argilominerais), aluminossilicatos (feldspatos) e quartzo [17–19]. Os óxidos alcalinos ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) e os óxidos alcalino-terrosos ($\text{MgO} + \text{CaO}$) desempenham papel de fundentes, promovendo a formação de fase líquida durante a queima e, conseqüentemente, elevando a retração linear [20]. Por fim, a perda ao fogo é atribuída à desidroxilação dos argilominerais e à liberação de compostos voláteis [21].

Tabela 3. Composição das matérias-primas das massas usadas no estudo

Óxidos	DC	WE	BC
SiO_2	63,4	64,1	67,3
Al_2O_3	22,0	18,5	20,5
TiO_2	0,2	0,1	0,3
Fe_2O_3	0,9	0,4	0,6
CaO	1,7	0,3	1,0
MgO	1,0	0,5	0,5
Na_2O	1,8	3,3	3,2
K_2O	1,9	1,1	1,6
Li_2O	0,1	0,1	0,2
Perda ao fogo	6,7	4,1	5,0

A Fig.3 apresenta as curvas de dilatação térmica das amostras estudadas, permitindo a comparação entre a massa base (DC) e as massas coloridas utilizadas nas formulações. A Tab.4 mostra os valores de temperatura de amolecimento (T_m) e coeficiente de dilatação (α) de cada massa. A análise dilatométrica evidenciou, inicialmente, a transição de fase do quartzo α para quartzo β por volta de 573 °C [22]. Acima de 900 °C , observou-se o início da retração térmica em algumas massas, sendo esse fenômeno mais acentuado na massa NP, enquanto a massa DC apresentou comportamento mais estável ao longo do intervalo de temperatura avaliado.

Tabela 4. Temperatura de amolecimento (T_m) e coeficiente de dilatação (α) das massas estudadas

Massas	T_m (°C)	Coef. dilatação α (10^{-7})
DC	>1100	61,6
CI	980	61,1
CH	950	65,9
NP	950	64,9
WE	1000	54,9

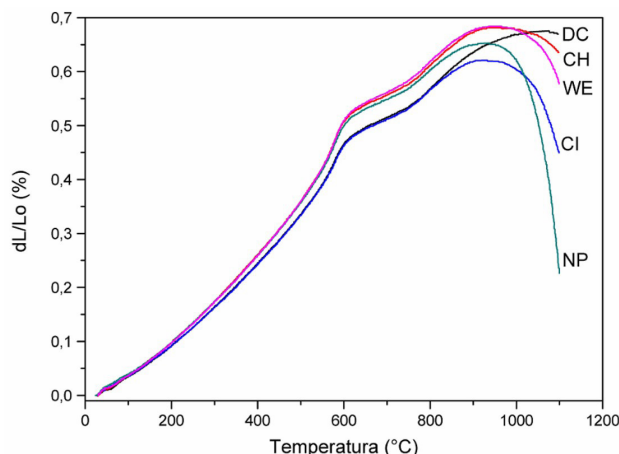


Figura 3. Dilatação térmica das massas estudadas, comparando a massa base (DC) com as massas coloridas: (a) CI, (b) CH, (c) NP, e (d) WE

O coeficiente de dilatação linear (α) fornece uma medida da variação dimensional da massa em função da temperatura. Entre as massas avaliadas, CH (65,9) e NP (64,9) apresentaram os maiores valores de α , indicando maior propensão à expansão térmica, o que pode intensificar a geração de tensões internas no sistema de dupla carga. Por outro lado, a massa WE apresentou o menor coeficiente (54,9), sugerindo um comportamento dimensional mais estável. A massa DC, usada como base em todas as formulações, apresentou valor intermediário (61,6), próximo ao da massa CI (61,1), o que favorece o acoplamento entre essas duas camadas.

Esses resultados mostram que uma maior compatibilidade entre os coeficientes de dilatação das massas utilizadas nas diferentes camadas é fundamental para minimizar tensões residuais e reduzir a ocorrência de curvaturas nas peças após a queima. Nesse contexto, a formulação que combinou DC e CI apresentou o melhor comportamento térmico entre as opções avaliadas.

Durante o resfriamento, após a queima, as camadas com diferentes dilatações térmicas sofrem contrações em intensidades distintas. Se a camada superficial (superior) tem um coeficiente de dilatação maior que a base, ela tende a se contrair mais ao esfriar. Nesse cenário, a camada superior é submetida a esforços de tração, enquanto a base sofre compressão, resultando em uma curvatura côncava (centro da peça elevado, bordas para baixo) [23].

Por outro lado, se a camada superficial tem um coeficiente menor que o da base, ela se contrai menos, ficando "estirada" pela base em retração. Isso gera uma situação inversa: a base entra em tração e a camada superior em compressão, o que leva à formação de uma curvatura convexa (bordas elevadas em relação ao centro) [23].

3.2. Caracterização dos corpos de prova:

A Fig.4(a) apresenta os resultados da densidade a seco das formulações avaliadas. Observa-se que o uso de duplo carregamento influenciou negativamente o grau de compactação dos corpos cerâmicos em comparação com a formulação padrão (STD). Em todas as formulações a densidade a seco foi inferior quando adotado o duplo carregamento, evidenciando que as massas únicas apresentaram melhor compactação. Esse comportamento está relacionado à diferença na composição das camadas, o que compromete o empacotamento das partículas e, conseqüentemente, a uniformidade do corpo prensado.

Apesar disso, nota-se que mesmo na proporção de 70/30 entre as camadas, a massa base não foi determinante para a densificação. As formulações seguiram tendências similares, com pequenas variações entre si, sugerindo que o processo de prensagem exerceu maior influência sobre a densidade a seco do que as características químicas das massas. Ademais, as amostras com duplo carregamento apresentaram leve expansão pós-prensagem, o que contribuiu para a menor densidade em relação à STD. Ressalta-se, portanto, que, nesta etapa, o mecanismo de compactação é mais impactado pela dinâmica física do carregamento do que pela composição mineralógica das massas, diferentemente do que ocorre com a densidade aparente após a queima.

Durante a sinterização, ocorrem transformações significativas no material cerâmico, como a variação do tamanho e da morfologia das partículas, alterações na forma e no volume dos poros, além da formação de fases líquidas e cristalinas [24]. Tais fenômenos promovem mudanças microestruturais que resultam na redução da porosidade e no aumento da densidade dos corpos cerâmicos [25,26]. Conforme mostrado na Fig.4(b), após a queima, a formulação F4 apresentou a maior densidade aparente, comportamento atribuído ao seu elevado caráter fundente. As misturas contendo a base STD com F4 também acompanharam essa tendência, refletindo o efeito das matérias-primas sobre a densificação.

A composição das massas é determinante nesse comportamento. Verificou-se que formulações com maior teor de argilas de base ilítica, como a STD, apresentaram maior densificação após a queima. Já as formulações com menor conteúdo dessas argilas mostraram valores inferiores, com exceção da F4. Esta contém argila montmorilonítica, reconhecida por sua alta plasticidade e capacidade fundente, além da presença de zircônia, material de elevada densidade específica, que contribuiu positivamente para o aumento da densidade final.

Além disso, o teor de feldspato nas massas foi determinante para a redução da porosidade. O feldspato é essencial na formulação de porcelanatos, uma vez que atua como fundente, reduzindo a temperatura de sinterização necessária para a densificação dos corpos cerâmicos [27]. Durante a queima, a formação de fases líquidas com viscosidade adequada favorece o preenchimento dos poros e contribui para a eliminação da porosidade residual [28].

A absorção de água, apresentada na Fig.4(c), evidenciou que todas as formulações atenderam aos requisitos estabelecidos pela norma ABNT NBR ISO 13006 [15] para produtos do grupo Ia (porcelanato), com valores inferiores a 0,5%. Vale destacar que a literatura técnica indica que absorções em até 0,1% também são consideradas aceitáveis para esse tipo de produto [29].

Por fim, os resultados de resistência mecânica (Fig.4(d)) mostraram coerência com os dados de densidade após a queima, reforçando a correlação direta entre a densificação dos corpos cerâmicos e seu desempenho mecânico final.

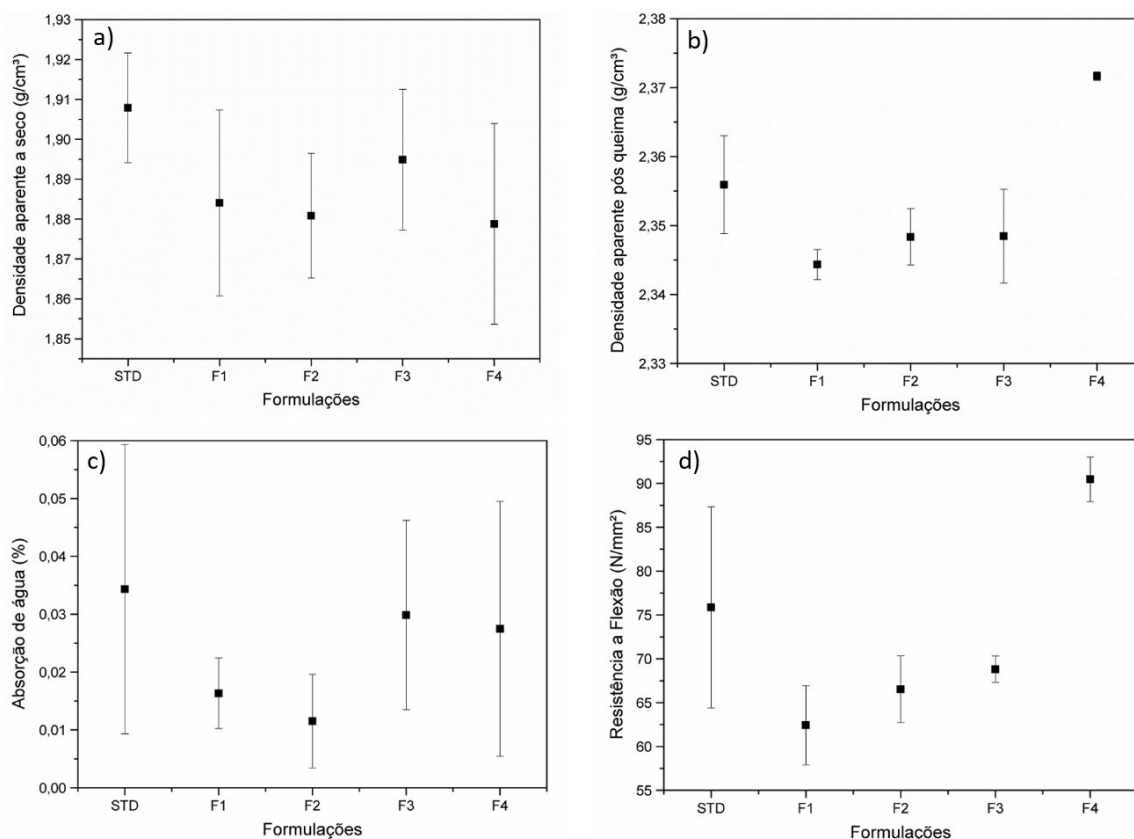


Figura 4. Análise técnica das formulações desenvolvidas: (a) densidade aparente a seco; (b) densidade aparente pós-queima; (c) absorção de água, e (d) resistência mecânica à flexão

Ao observar a curvatura diferida (Fig.5), pode-se afirmar que todos os corpos de prova seguem um mesmo comportamento de se curvarem entre 24h e 48h e após esse período há relaxamento nas tensões. Em relação ao STD esta alteração de curvatura ocorreu nas primeiras 48h, após esse período o material estabilizou. Porém as misturas (F1, F2, F3 e F4) estabilizaram nas primeiras 24h. Por fim, conclui-se que as misturas tiveram curvaturas maiores que o STD, consequência das tensões geradas pela compactação de duas massas distintas.

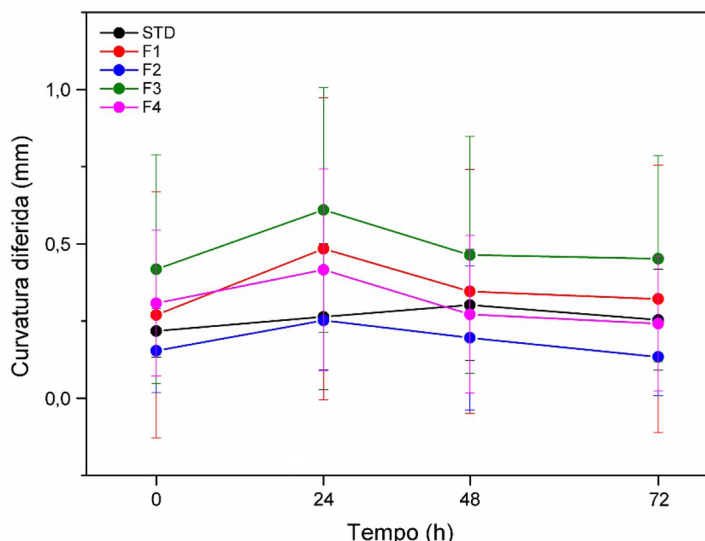


Figura 5. Curvatura diferida das peças estudadas em até 72 horas

Os resultados obtidos corroboram com o comportamento dilatométrico das massas analisadas: quanto menor a diferença entre os coeficientes de dilatação térmica das camadas, menor a curvatura observada após a queima. Isso evidencia um melhor acoplamento entre as camadas, com consequente redução das tensões residuais geradas durante o resfriamento.

4. CONCLUSÕES:

O método de prensagem por duplo carregamento é uma prática utilizada em indústrias cerâmicas para obter efeitos técnicos ou estéticos, principalmente em grés porcelanato. No entanto, a falta de controle do acordo dilatométrico resulta em problemas dimensionais como curvaturas, além de interferir em outras características do produto final, como pôde ser visto nos resultados obtidos.

Contudo, pode-se dizer que o método é eficaz no que se diz respeito à redução de custos industriais. Porém, pode originar muitos defeitos que, além de refletir na qualidade final do produto, acabam prejudicando na avaliação para a classificação do material, pois podem originar defeitos que só serão visíveis depois de certo tempo, como é o caso da curvatura diferida.

Com o estudo pode-se concluir que alguns aspectos do processo têm de ser mais bem controlados, como a elaboração de massas que possibilitem um melhor acordo dilatométrico a fim de amenizar a origem de defeitos.

Observou-se que a diferença de tensões entre camada superficial e substrato afetaram a análise visual do material, como é o caso da diferença das dilatações que originou curvaturas. No entanto, nos demais ensaios pode-se verificar que as misturas tiveram resultados piores que o STD. A absorção de água aumentou, no entanto, permanecendo dentro da norma; as densidades a seco e após a queima diminuíram, com exceção de WE por apresentar maior formação de fases vítreas devido a sua composição de partida. E a resistência mecânica à flexão não foi alterada, exceto para WE, novamente devido sua composição.

Dessa forma, a formulação F2 apresentou as melhores condições de processamento, uma vez que as massas têm coeficientes de dilatação térmica semelhantes, o que resultou em corpos de prova com menores curvaturas diferidas ao longo do tempo de ensaio.

Os resultados obtidos indicam que a compatibilidade entre os coeficientes de dilatação térmica das massas utilizadas exerce influência direta sobre o desempenho dimensional do material. Verificou-se que menores diferenças entre as dilatações das camadas resultam em menor curvatura diferida após a queima, evidenciando um acoplamento mais eficiente e uma conseqüente redução das tensões residuais geradas no resfriamento.

REFERÊNCIAS:

- [1] Souza R M, Montedo O R K 2017. Melhoria de qualidade e redução de custo de produção com a reformulação de massa de porcelanato técnico. *Cerâmica Industrial* 22, 12–18. <https://doi.org/10.4322/cerind.2017.028>
- [2] Nunes A M, Guimarães L P, Bristot V M 2024. Aumento da produtividade do setor de acabamento de uma indústria cerâmica pela redução de perdas e retrabalho. *Cerâmica Industrial* 29, e0829. <https://doi.org/10.4322/cerind.2024.048>
- [3] Nogueira E, Alves Filho A G, Torkomian A L V 2001. Empresas de revestimento cerâmico e suas estratégias competitivas e de produção. *Gestão & Produção* 8, 84–99. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2001000100007>
- [4] Labrincha J A, Oliveira H J C 2021. Vidrados para grés porcelânico. *Rev. Técnica* 20–24.
- [5] Pellicelli G, Esposito L, Rambaldi E, Tucci A 2008. Crack paths and toughening mechanisms in steel-porcelain stoneware ceramic matrix composites. *Castellón, X Qualicer PBC* 85-94.
- [6] Bresciani A, Ricci C 2004. Innovative process for ceramic tile manufacture by double pressing with continuous precompaction. *Castellón, IX Qualicer PCI* 49-60.
- [7] Schuller D, Bianchi E C, Aguiar P R 2008. Influência de defeitos e diferentes processos de fabricação nas propriedades mecânicas finais de cerâmicas. *Cerâmica* 54, 435–442. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132008000400008>
- [8] Magalhães M, Contartesi F, Conserva L R S, Melchiades F G, Boschi A O 2014. Efeitos do ciclo de queima sobre as temperaturas de mínima absorção de água e máxima densificação de porcelanatos. *Cerâmica Industrial* 19, 20–25. <https://doi.org/10.4322/cerind.2014.067>
- [9] Zanelli C, Ardit M, Conte S, Soldati R, Cruciani G, Dondi M 2019. Sinterização de porcelanatos com fluxo viscoso: Uma revisão. *Cerâmica Industrial* 24, 7–12. <https://doi.org/10.4322/cerind.2019.007>
- [10] Dal Bó M, Melchiades F G, Boschi A O, Hotza D 2012. Efeito das propriedades dos esmaltes e engobes sobre a curvatura de revestimentos cerâmicos. *Cerâmica* 58, 118–125. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132012000100019>
- [11] Melchiades F G, Barbosa A R D, Boschi A O 2000. Relation between tile curvature and engobe layer characteristics. *Castellón, VI Qualicer* 135–137.
- [12] Pinter Jr J, Zaccaron A, Arcaro S, Rodrigues Neto J B, Noni Jr A, Raupp Pereira F 2022. Novel approach to ensure the dimensional stability of large-format enameled porcelain stoneware tiles through water absorption control. *Open Ceram* 9, 100203. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100203>
- [13] Baucia Jr J A, Koshimizu L, Gibertoni C, Morelli M R 2010. Estudo de fundentes alternativos para uso em formulações de porcelanato. *Cerâmica* 56, 262–272. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132010000300009>
- [14] Hoffmann F S, Santos G, Morelli M R 2012. Estudo de fundente e argilito com potencial para uso em formulações de porcelanato. *Cerâmica* 58, 174–185. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132012000200007>
- [15] ABNT NBR ISO 13006 2020. Placas cerâmicas. Definições, classificação, características e marcação. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas 59.
- [16] Mohazzabi P 2017. Archimedes' principle revisited. *J Appl Math Phys* 5, 836–843. <https://doi.org/10.4236/jamp.2017.54073>
- [17] Mehta N S, Sahu P K, Tripathi P, Pyare R, Majhi M R 2018. Influence of alumina and silica addition on the physico-mechanical and dielectric behavior of ceramic porcelain insulator at high sintering temperature. *Boletín Soc Española Cerámica y Vidr* 57, 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2017.11.002>
- [18] Abubakar M, Muthuraja A, Rajak D K, Ahmad N, Pruncu C I, Lamberti L, Kumar A 2020. Influence of firing temperature on the physical, thermal and microstructural properties of Kankara kaolin clay: a preliminary investigation. *Materials* 13, 1872. <https://doi.org/10.3390/ma13081872>
- [19] Hevia R, Inocencio A, Barrachina E, Carda J B 2006. Manufacture of porcelain tile with selected raw materials from the Argentine Republic. *Castellón, IX Qualicer* 125–134.
- [20] Piccolo P O, Zaccaron A, Teixeira L B, Moraes E G, Montedo O R K, Oliveira A P N 2022. Development of translucent ceramic tiles from modified porcelain stoneware tile paste. *J Build Eng* 45, 103543. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103543>
- [21] Elias R, Zaccaron A, Montedo O R K, Raupp-Pereira F, Bernardin A M, Arcaro S, Rodrigues Neto J B 2024. Pyroplastic deformation analysis of Brazilian porcelain tile formulations using mixture design. *Int J Appl Ceram Technol* 21, 4241–4256. <https://doi.org/10.1111/ijac.14813>
- [22] Comin A B, Zaccaron A, Souza Nandi V, Inocente J M, Muller T G, Dal Bó A G, Bernardin A M, Peterson M 2021. Measurement of apparent sintering activation energy for densification of clays. *Clay Miner* 56, 299–305. <https://doi.org/10.1180/clm.2022.11>
- [23] Dondi M, Raimondo M, Zanelli C 2014. Clays and bodies for ceramic tiles: Reappraisal and technological classification. *Appl Clay Sci* 96, 91–109. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2014.01.013>
- [24] Silva A G P, Alves Jr C 1998. A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização. *Cerâmica* 44, 225–232. <https://doi.org/10.1590/S0366-69131998000600004>
- [25] Lorenzi V, Rabelo N, Dal-Bó A G, Peterson M, Bernardin A M 2024. Effect of nanosilica and nanobohmite on the pyroplastic deformation of a porcelain tile body. *Castellón, XVIII Qualicer* 13.

- [26] Marino L F B, Boschi A O 2000. A expansão térmica dos revestimentos cerâmicos. Parte IV: efeitos da adição de dolomita. *Cerâmica Industrial* 5, 43–47.
- [27] Bernardin A M, Medeiros D S, Riella H G 2006. Pyroplasticity in porcelain tiles. *Mater Sci Eng A* 427, 316–319. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.04.073>
- [28] Worrall W E 1968. *Clays: their nature, origin and general properties*. London, Maclaren.
- [29] Dondi M 2006. Caracterização tecnológica dos materiais argilosos: Métodos experimentais e interpretação dos dados. *Cerâmica Industrial* 11, 36–40.