

## Influência da substituição do feldspato por filito nas propriedades de massas cerâmicas para porcelanatos

Laércio Frasson Zawaski <sup>1,2\*</sup>, Tharsia Cristiany de Carvalho Costa <sup>1</sup>, Aline Ribeiro <sup>2</sup>, Aline Demarch <sup>2</sup>, Angela Waterkemper <sup>2</sup>, Aldemiro José Rocha Palma <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia, Salvador, Bahia

<sup>2</sup> Mohawk Brasil, Cocal do Sul, Santa Catarina, Brasil

\*e-mail: laerciozawaski@hotmail.com

### Resumo

O porcelanato destaca-se entre os revestimentos cerâmicos devido ao seu elevado desempenho técnico, associado diretamente ao elevado grau de sinterização e baixa porosidade, produzindo produtos de elevada densificação e baixa absorção de água. O feldspato, historicamente, é uma das principais matérias-primas utilizadas em composição de massas de porcelanato, com objetivo de aportar óxidos fundentes na composição, e seu alto consumo tem impactado na oferta, e como consequência em aumento de custos de produção. Com isso, se faz necessário a busca de alternativas que visem substituir total ou parcialmente o uso de feldspatos em massas cerâmicas. Neste contexto, este trabalho avalia a substituição total ou parcial do feldspato por filito proveniente da região de Lagarto (SE) em massas de porcelanato esmaltado, visando atender aos requisitos da norma ABNT NBR ISO 13.006:2020. Foram formuladas cinco composições contendo 0; 25; 50; 75 e 100% de filito em relação ao feldspato. Os corpos de prova de cada formulação foram queimados entre 1.155 a 1.190 °C, com incrementos de 5 °C. Avaliaram-se as propriedades físico-químicas de absorção de água, retração linear de queima, índice de piroplasticidade, resistência mecânica a flexão. Os resultados indicaram o aumento da absorção de água e a redução na retração linear de queima com o incremento do filito, evidenciando o caráter mais refratário da matéria prima. A formulação com 100% de filito atingiu absorção de água abaixo de 0,5% a 1.180 °C, enquanto a composição com 0% de filito atingiu esse valor a 1.175 °C. Conclui-se que o filito pode substituir parcial ou totalmente o feldspato em massas de porcelanato, mantendo propriedades compatíveis com os parâmetros normativos, além de representar uma alternativa economicamente vantajosa para a indústria cerâmica.

**Palavras-chave:** porcelanato esmaltado, filito, piroplasticidade, óxidos fundentes, sinterização, absorção de água.

### 1. INTRODUÇÃO

O porcelanato esmaltado, um dos produtos de maior valor agregado no setor, é caracterizado por baixa absorção de água, alta resistência mecânica e excelente acabamento superficial [1]. A norma ISO 13006:2020 classifica o porcelanato como uma placa totalmente vitrificada com coeficiente de absorção de água igual ou inferior a uma fração de massa de 0,5% [2].

Na fabricação de revestimentos cerâmicos, incluindo o porcelanato, não existe uma única matéria-prima natural capaz de, isoladamente, fornecer todas as propriedades desejáveis para uma formulação tecnicamente adequada, tais como fundência, estabilidade dimensional e resistência mecânica [3].

Dessa forma, torna-se necessário o uso de misturas cuidadosamente balanceadas de diferentes matérias-primas para que se atinja o desempenho esperado no estado verde e após a queima. Considerando-se a natureza e proporção dos materiais utilizados, o porcelanato é enquadrado na categoria dos materiais cerâmicos triaxiais, é composto predominantemente por uma mistura de argilominerais, feldspatos e quartzo [4,5]. A fração argilosa é responsável por conferir plasticidade à massa cerâmica na presença de umidade, além de contribuir para a resistência mecânica a seco das peças moldadas [6].

As placas cerâmicas classificadas como porcelanato apresentam uma microestrutura complexa e bem desenvolvida, composta predominantemente por uma matriz vítrea abundante, que representa cerca de 50 a 65% do volume total do material. Inseridas nessa matriz, encontram-se fases cristalinas dispersas, bem como uma porosidade total controlada, com valores normalmente situados entre 3 e 7% [7]. A fração cristalina é formada principalmente por partículas de quartzo (10 a 25%), mulita (<10%), feldspatos residuais não fundidos (0 a 10%), além de possíveis adições de opacificantes, como silicato de zircônio ou óxido de alumínio (alumina), em concentrações de até 10% [8]. Dentre as diversas etapas que compõem o processo de fabricação do porcelanato, destacamos a etapa de queima na qual ocorre a sinterização do material, onde atualmente são utilizados fornos a rolos com ciclos de queima significativamente curtos, com duração de 40 a 70 min, mantendo temperaturas na faixa de 1.180 a 1.230 °C [7].

Na massa cerâmica, o feldspato atua como fundente, sendo responsável pela formação das primeiras fases líquidas durante a queima, o que dá início ao processo de densificação por sinterização [9]. Essa fusão inicial favorece a redução da porosidade e o desenvolvimento de uma microestrutura mais compacta, típica dos materiais com alto grau de vitrificação. Além disso, a capacidade dos feldspatos de formar eutéticos com outros constituintes minerais da massa possibilita alcançar a gresificação em temperaturas relativamente baixas, otimizando o consumo energético do processo térmico e melhorando o desempenho final do produto [10]. Os feldspatos representam as matérias-primas de maior valor agregado dentre os constituintes da massa cerâmica para porcelanato, sendo utilizados em teores que variam entre 30% e 50% em peso, devido à sua função essencial como agente fundente.

No contexto brasileiro, os filitos têm sido amplamente empregados como materiais fundentes alternativos aos feldspatos, especialmente como fontes de óxidos alcalinos ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ), devido à sua maior disponibilidade geológica e proximidade em relação aos polos industriais cerâmicos [11]. Nessas aplicações, os filitos podem compor até 50% da massa cerâmica em formulações processadas via úmida. Trata-se de uma rocha metassedimentar de granulometria muito fina, constituída predominantemente por sericita (variedade de mica muscovita finamente dividida), caulinita e quartzo. Com um teor médio de álcalis em torno de 7%, os filitos apresentam comportamento fundente significativo, favorecendo a formação de fases líquidas durante a queima. Devido à sua composição química e mineralógica, esse material exibe simultaneamente características de matéria-prima plástica e não plástica, contribuindo tanto para a conformabilidade da massa quanto para sua estabilidade dimensional [12]. Embora as formações geológicas de filito ocorram em diversas regiões do país, principalmente nas regiões Nordeste e Sudeste, as características químicas e mineralógicas não são totalmente iguais, diferenciando em relação a quantidade de óxidos fundentes e quantidade de óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), o qual acaba limitando muitas vezes sua utilização devido a sua coloração escura.

Neste contexto o objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da substituição parcial e total do feldspato por filito da região de Lagarto (SE) em formulações de massa de porcelanato esmaltado, considerando aspectos tecnológicos, estruturais e de sinterização das composições resultantes, de modo a verificar sua conformidade com os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR ISO 13006:2020.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento deste trabalho, foram selecionadas diferentes matérias-primas, comumente utilizadas na formulação de massas de porcelanato esmaltado em unidades industriais. Inicialmente, as matérias-primas foram coletadas, desagregadas manualmente, e submetidas à secagem em estufa a 110 °C por um período de 15 horas.

Após a secagem, as amostras foram retiradas da estufa, britadas, identificadas e destinadas à etapa de pesagem, visando à preparação dos corpos de prova das formulações estudadas. A moagem dos materiais foi realizada em moinho de bolas excêntrico, utilizando-se 500,0 g de material seco e 500,0 g de água.

O tempo de moagem foi ajustado de acordo com o resíduo de moagem, estabelecido entre 1,0% e 3,0% para as matérias primas individuais e entre 4,0% e 5,0% para as formulações de massa. O resíduo de moagem foi determinado por peneiramento em malha #325 mesh (45 µm).

Após a moagem, as barbotinas obtidas foram vertidas em bandejas e submetidas novamente à secagem em estufa a 110 °C por 15 horas. Em seguida, os materiais secos foram desagregados e britados para obtenção do pó. A etapa subsequente consistiu na umidificação das formulações, com adição de 6,0% de umidade em massa, seguida de homogeneização e peneiramento em malha 14 mesh.

A compactação e moldagem dos corpos de prova foram realizadas em prensa hidráulica semiautomática de bancada, com prensagem uniaxial, da marca Nannetti. Foram utilizados dois tipos de moldes: um cilíndrico, com diâmetro de 57 mm, e outro retangular, com dimensões de 20 mm × 100 mm; em cada ensaio foram compactados 5 corpos de prova. Foram utilizados diferentes carregamentos e pressões de compactação, de acordo com os requisitos específicos de cada ensaio a ser realizado, conforme apresentado na Tab. 1.

**Tabela 1.** Informações de pesagem (carregamento), pressão de compactação e moldes, utilizados em cada ensaio realizado

Molde	Pesagem (g)	Pressão de compactação (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ensaio
Cilíndrico	35,0	242,0	retração de queima, absorção de água, perda ao fogo, dilatação linear, MEV, difração raio X, densidade aparente
	60,0	670,0	
Retangular	30,0	308,0	coração negro resistência mecânica a flexão piroplasticidade (IP)
	20,0	308,0	

Após a compactação, os corpos de prova foram submetidos à secagem em estufa a 110 °C por 60 minutos. A queima foi realizada em forno a rolos de laboratório, marca Servitech, modelo CT094. Foi adotado um ciclo de queima total de 35,0 minutos, com patamares de temperatura estabelecidos em 1.155, 1.160, 1.165, 1.170, 1.175, 1.180, 1.185 e 1.190 °C, sendo mantido um tempo de permanência no patamar de 8,0 minutos, seguido de resfriamento natural.

O ensaio de avaliação de coração negro foi realizado separadamente, utilizando-se temperatura de queima de 1.180 °C e ciclo total de 20 minutos.

Para o desenvolvimento do estudo, adotou-se como ponto de partida uma formulação típica empregada industrialmente na produção de porcelanatos esmaltados. A partir dessa composição de referência, procedeu-se à substituição parcial e total, em frações mássicas, do feldspato por filito, conforme apresentado na Tab. 2.

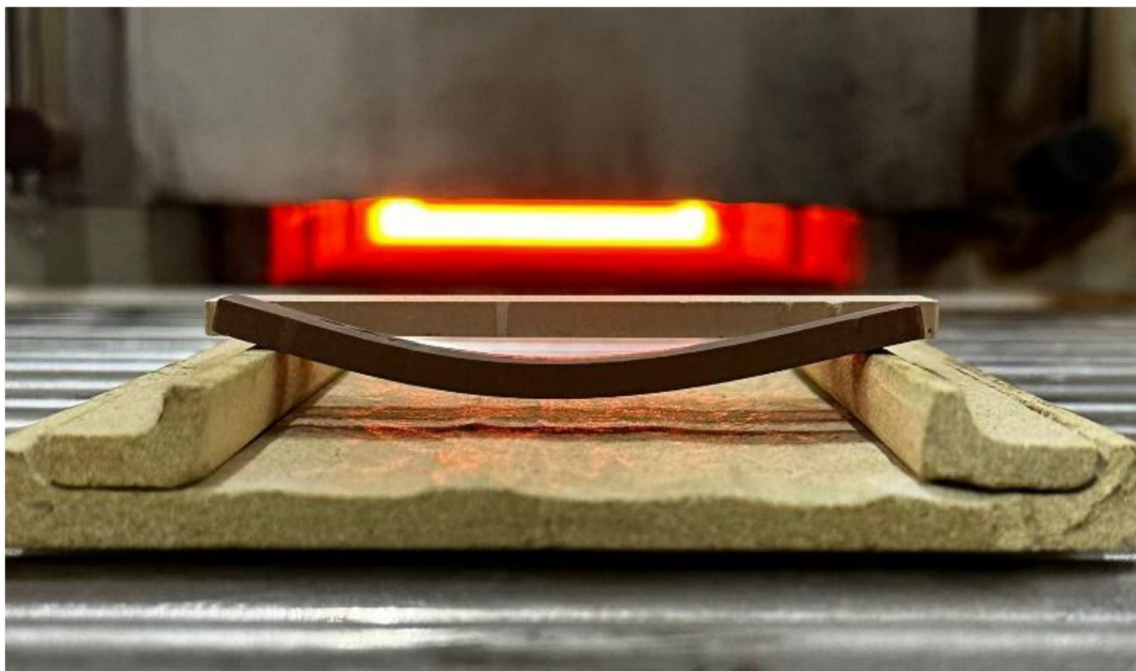
**Tabela 2.** Formulações testadas

Matéria-prima	PE 0% Filito	PE 25% Filito	PE 50% Filito	PE 75% Filito	PE 100% Filito
Filito	0,0	9,2	18,5	27,8	37,0
Feldspato	37,0	27,8	18,5	9,2	0,0
Argila A	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Argila B	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Argila P	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Argila C	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5
Argila L	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Argila O	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Argila M	13,0	13,0	13,0	13,0	13,0
Total	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

Todos os corpos de prova das formulações pesquisadas, passaram pela caracterização dos ensaios técnicos exigidos pela norma ABNT ISO 13006:2020.

Os ensaios de densidade aparente, tanto a seco quanto após a queima, foram realizados com base no princípio de Arquimedes. A resistência mecânica à flexão após a queima foi determinada utilizando-se um flexímetro da marca Servitech, modelo CT101/12. O ensaio de absorção de água foi conduzido pelo método a vácuo, empregando-se um porosímetro da marca Servitech, modelo CT12174.

Para a determinação do índice de piroplasticidade (IP), foi utilizado um suporte específico desenvolvido para esse fim, conforme ilustrado na Fig. 1.



**Figura 1.** Visualização dos corpos de prova e suportes utilizados no ensaio de IP. Corpo de prova reto é antes da queima e o corpo de prova curvado é após a queima

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na caracterização química das matérias primas, conforme demonstrado na Tab. 3, é possível verificar todos os óxidos constituintes presentes em cada material utilizado na pesquisa, podendo destacar principalmente os comparativos entre o feldspato e filito.

**Tabela 3.** Análise química das matérias-primas (% em massa) utilizadas na pesquisa

Elementos	Matérias Primas								
	Filito	Feldspato	Argila A	Argila B	Argila P	Argila C	Argila L	Argila O	Argila M
SiO <sub>2</sub>	78,25	65,22	66,86	66,45	62,08	63,04	65,42	7,56	79,05
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,70	18,32	19,06	19,68	19,44	26,67	16,97	1,44	19,28
TiO <sub>2</sub>	0,51	0,05	0,58	0,84	0,58	0,79	0,68	0,02	0,94
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,48	0,18	4,75	3,61	5,77	1,56	2,90	0,37	1,73
CaO	0,04	0,33	0,00	2,06	0,14	0,12	3,33	47,82	0,13
MgO	1,10	0,21	0,76	1,39	1,33	0,37	1,31	1,39	0,02
Na <sub>2</sub> O	2,30	3,59	0,12	1,38	0,27	0,15	0,92	0,13	0,45
K <sub>2</sub> O	3,73	9,31	1,63	3,60	3,36	1,28	2,36	0,50	1,72

Destacam-se os principais pontos comparando o filito com o feldspato: um maior percentual de sílica (SiO<sub>2</sub>) e menor de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) no filito, isso afeta as fases mineralógicas formadas após a queima; maior percentual de óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) no filito, isso irá afetar a coloração da massa, e principalmente o maior aporte de óxido de ferro que contribui negativamente para uma maior formação de coração negro no produto; a fonte dos principais óxidos fundentes, destaca-se o óxido do sódio e potássio, quando somamos os dois (Na<sub>2</sub>O + K<sub>2</sub>O), no filito apresenta 6,03% contra 12,9% do feldspato, com isso, tem-se 6,87% a menos de óxidos fundentes quanto substituído um pelo outro.

Esse menor incremento de óxidos fundentes, promove uma menor formação de fase vítrea, o que influencia na retração de queima e na absorção de água. Na Tab. 4, são demonstrados os resultados de densidade aparente seco (Dap) e perda ao fogo (PF) das composições.

**Tabela 4.** Densidade aparente a seco ( $\text{g/cm}^3$ ) e perda ao fogo (%), na pressão específica  $242 \text{ kgf/cm}^2$  das composições pesquisadas

Nomenclatura	Densidade aparente seco ( $\text{g/cm}^3$ )	Perda ao fogo (%)
PE 0% Filito	1,85	5,2
PE 25% Filito	1,85	5,3
PE 50% Filito	1,86	5,5
PE 75% Filito	1,88	5,6
PE 100% Filito	1,89	6,1

É possível destacar o aumento considerável da Dap e da PF com o incremento do filito nas composições, isso é justificado devido o filito apresentar característica de material mais plástico quando comparado ao feldspato.

A quantificação das fases mineralógicas, foi realizado pelo método de análise racional, utilizando os dados do ensaio de DRX, como demonstrado na Tab. 5. Na Tab. 6, tem-se os dados de identificação dos elementos, através do ensaio de espectroscopia dispersiva de energia (EDS) pontual, dos corpos de prova, queimados a  $1.175 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Tabela 5.** Composição mineralógica das composições pesquisadas, queimadas a  $1.175 \text{ }^\circ\text{C}$

Fases mineralógicas	Composições (%)				
	PE 0% Filito	PE 25% Filito	PE 50% Filito	PE 75% Filito	PE 100% Filito
Não cristalinas	51,00	50,00	48,00	50,00	51,00
Quartzo	18,00	20,00	23,00	22,00	26,00
Mulita	10,00	11,00	11,00	11,00	12,00
Hematita	2,00	2,00	3,00	3,00	3,00
Feldspatos	19,00	17,00	16,00	14,00	7,00

Na quantificação das fases mineralógicas após a queima é evidenciado a influência que o incremento do filito provoca no produto final, destacando o aumento da fase quartzo e aumento da hematita, isso é justificado pela análise química e fases das matérias primas, na qual o filito apresenta maiores percentuais de  $\text{SiO}_2$  associados a fase de quartzo e altos valores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  derivados da fase hematita, com isso na medida que aumenta-se a participação do filito em substituição ao feldspato temos um aumento dessas fases.

**Tabela 6.** Composição química por EDS das composições pesquisadas

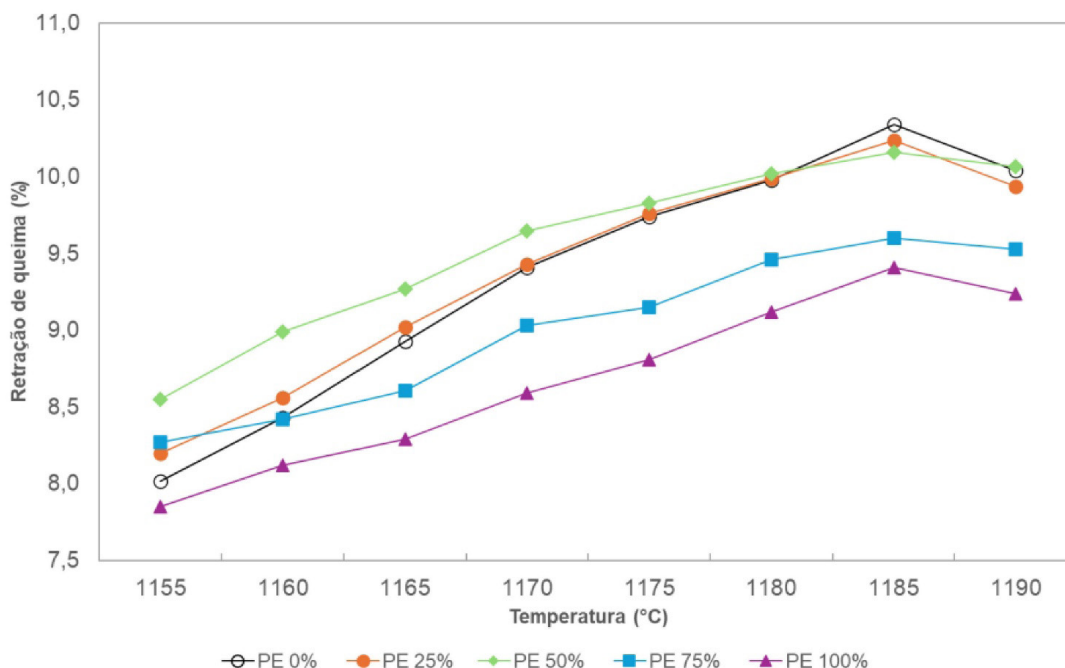
Elementos	Composições (%)				
	PE 0% Filito	PE 25% Filito	PE 50% Filito	PE 75% Filito	PE 100% Filito
Na	1,10	0,90	0,87	0,02	0,19
Mg	0,37	0,46	0,66	0,64	0,95
Al	19,27	19,04	18,85	18,67	18,82
Si	58,40	56,55	60,45	58,26	58,52
K	10,73	11,60	8,40	9,21	8,00
Ca	4,12	4,49	4,00	4,35	4,38
Ti	0,81	1,12	1,14	1,26	1,30
Fe	3,86	4,67	4,68	6,47	6,76

Na Tab. 7, são demonstrados os valores de dilatação térmica linear das composições pesquisadas, os valores de dilatação, são das faixas de temperaturas de  $50$  a  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Tabela 7.** Dilatações das composições testadas (de 50 a 300 °C)

Composição	Coefficiente de dilatação ( $10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ )
PE 0% Filito	72,5
PE 25% Filito	72,4
PE 50% Filito	73,2
PE 75% Filito	70,7
PE 100% Filito	70,4

Quanto a propriedade de dilatação térmica linear não foi evidenciada grande variação nas composições. Os resultados de retração linear de queima são demonstrados na Fig. 2.



**Figura 2.** Gráfico de Retração de queima (%) x temperatura, das composições pesquisadas

Analisando os dados de retração de queima, verifica-se um comportamento não tanto linear entre todas as composições testadas. Comparando-se os extremos das composições, ou seja, a PE 0% com a PE 100%, observa-se que o aumento do teor de filito resulta em uma redução da retração linear de queima. Esse comportamento pode ser justificado por dois fatores principais: o primeiro, está relacionado ao fato de que as massas com maior conteúdo de filito, apresentam maior densidade aparente a seco, indicando melhor compactação e, conseqüentemente, menor volume de poros a serem eliminados durante a queima, o que reduz a retração. O segundo fator refere-se à menor quantidade de óxidos fundentes nessas composições, o que implica na formação de menor fração de fase líquida durante a sinterização, limitando o processo de densificação e, por conseqüência, a retração de queima. A formulação PE 100% de filito, em todas as temperaturas queimadas, apresentou os menores valores de retração de queima, justificado pela maior Dap seca dessa composição.

São mostrados na Fig. 3 os resultados de absorção de água, lembrando que a norma NBR ISO 13.006:2020, determina que para ser um porcelanato o material deve apresentar absorção de água  $\leq 0,5\%$ .

As massas PE 0%, PE 25%, PE 50% e PE 75% atingiram valores inferiores a 0,5% na temperatura de 1.175 °C, enquanto a composição PE 100%, necessitou de um acréscimo de 5 °C para alcançar o mesmo valor de referência. Ao comparar as composições PE 0% e PE 100% de filito, evidencia-se, por meio do ensaio de absorção de água, uma diferença significativa na fusibilidade das massas, pois para se obter, aproximadamente os mesmos valores de absorção de água ( $\sim 0,12\%$ ), foi necessário um aumento de aproximadamente 10 °C na temperatura de queima. Isso comprova, a menor fusibilidade e menor formação de fase líquida do filito, quanto comparado com o feldspato, isso é justificado pelo menor aporte de óxidos fundentes na composição.

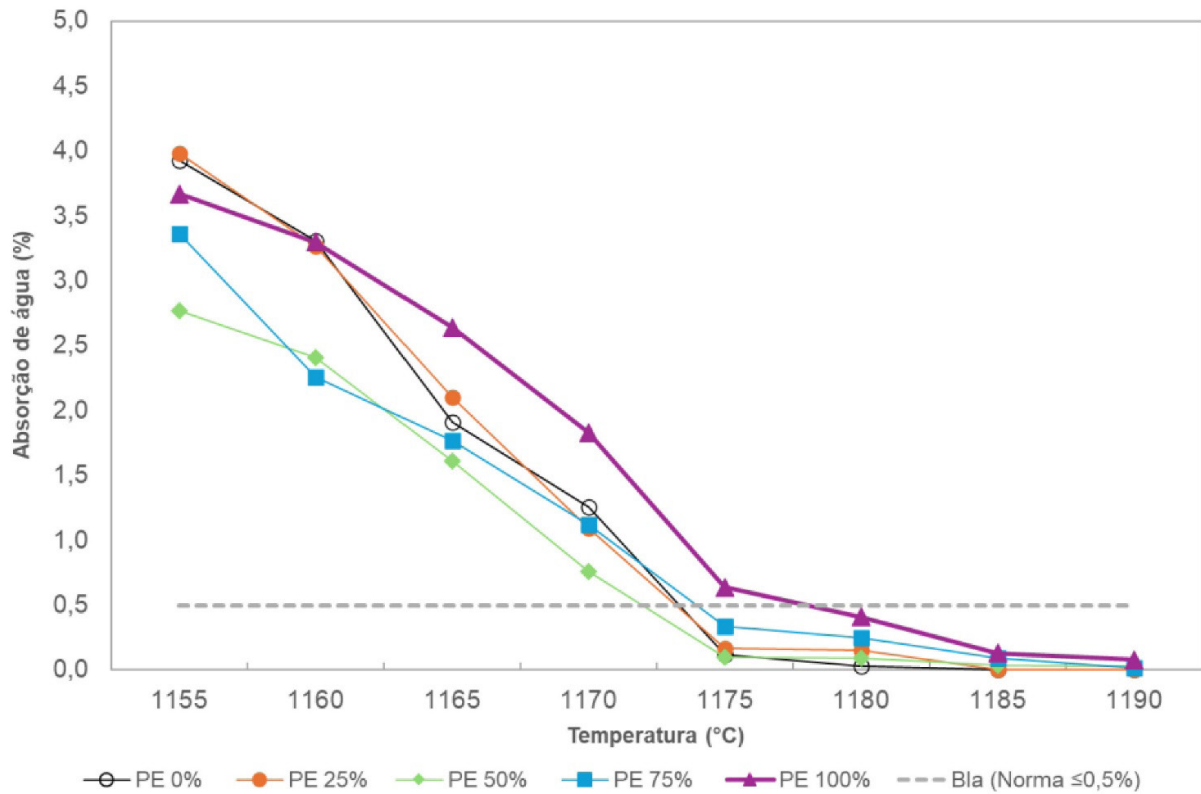


Figura 3. Gráfico de Absorção de água (%) x temperatura, das composições pesquisadas

A análise dos dados de densidade aparente ( $D_{ap}$ ), apresentados na Fig. 4, evidencia um comportamento semelhante entre todas as massas avaliadas.

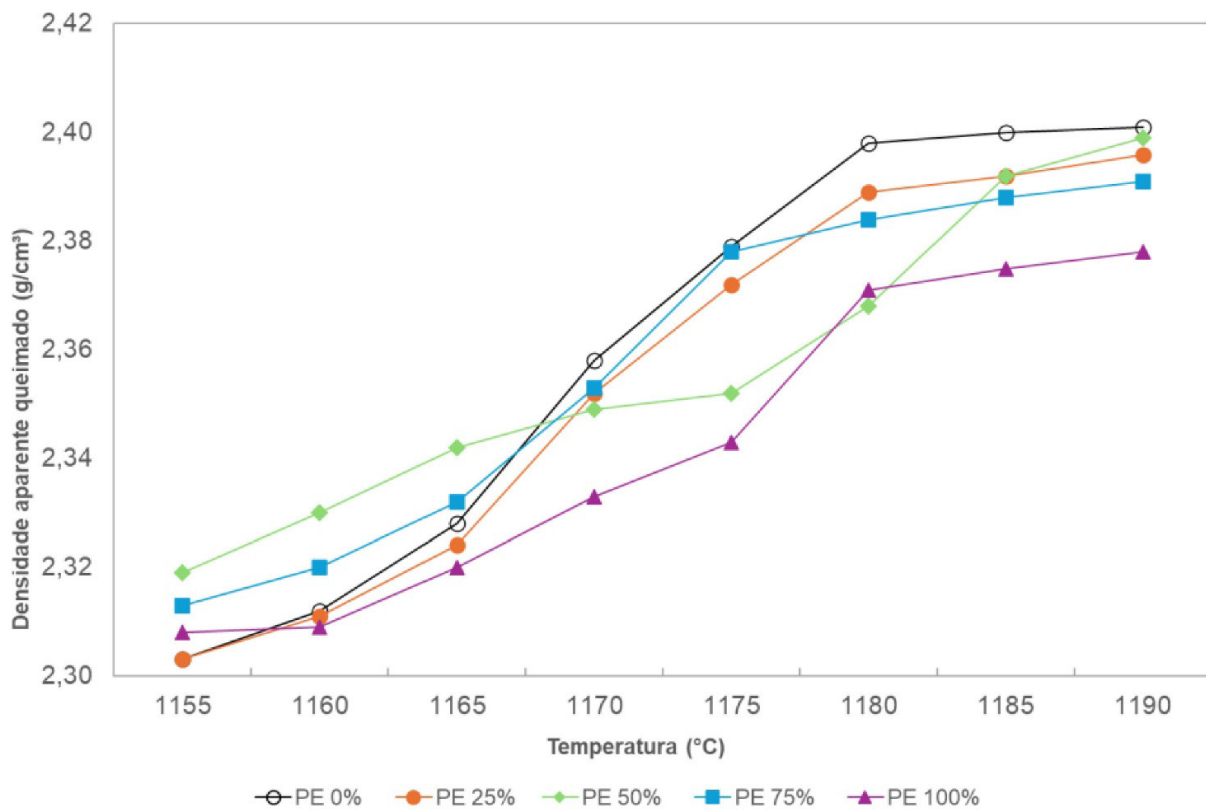


Figura 4. Gráfico de Densidade aparente queimado ( $g/cm^3$ ) x temperatura, das composições pesquisadas

Observa-se um aumento progressivo da Dap com o incremento da temperatura de queima, indicando avanço do processo de densificação. A partir de 1.180 °C, verifica-se uma tendência à estabilização dos valores de densidade aparente, sugerindo que as composições já atingem um estado próximo à máxima densificação. De acordo com os resultados, não foi observada expansão do material, a qual seria caracterizada por uma redução da Dap. Entretanto, no intervalo de 1.185 a 1.190 °C, nota-se uma estabilização no ganho de densidade aparente, reforçando a indicação de estabilização do processo de densificação.

As propriedades de resistência mecânica à flexão (RMF) e carga de ruptura (CR) dos porcelanatos são significativamente superiores às das cerâmicas convencionais. De acordo com a norma NBR ISO 13006:2020, os porcelanatos com espessura inferior a 7,5 mm devem apresentar valores mínimos de RMF ≥ 35 MPa e CR ≥ 700 N.

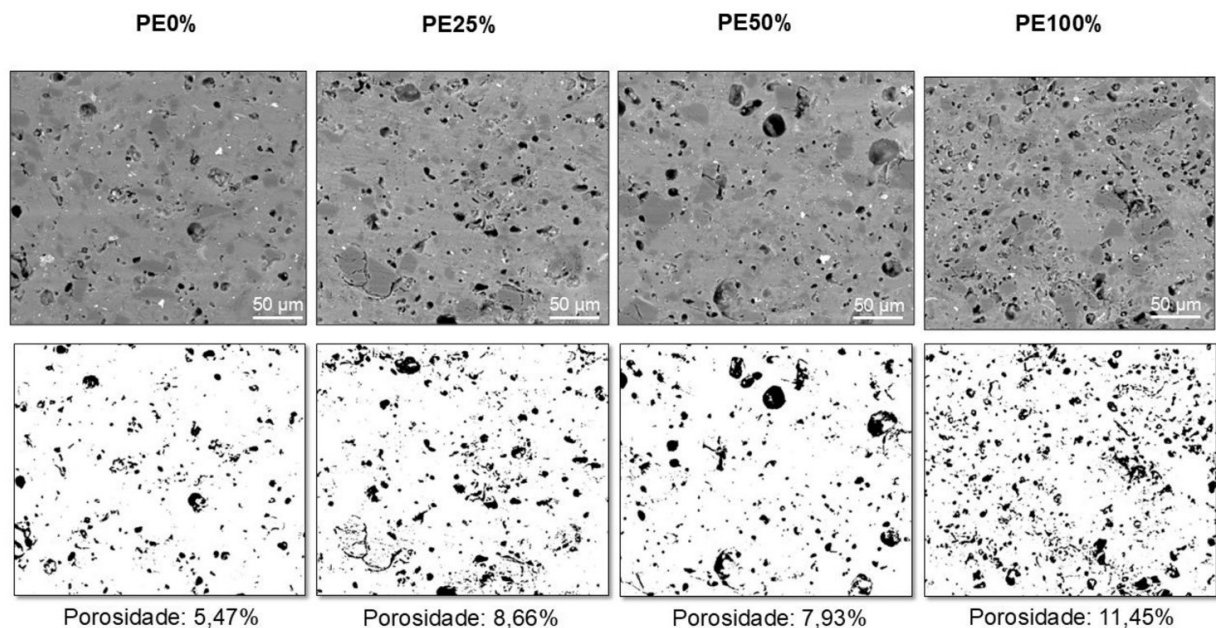
A partir dos resultados apresentados na Tab. 8, verifica-se que todas as composições avaliadas apresentaram valores de RMF e CR significativamente superior, aos limites estabelecidos pela norma.

**Tabela 8.** Dados de módulo resistência a flexão (MRF) e carga de ruptura (CR) das composições em diferentes temperaturas

Composições	MRF (MPa)				CR (N)			
	1165 °C	1175 °C	1185 °C	NORMA	1165 °C	1175 °C	1185 °C	NORMA
PE 0	56,19	75,43	80,18	≥ 35	1.550,03	2.056,55	2.258,29	≥ 700
PE 25	61,01	75,36	74,51	≥ 35	1.628,41	2.037,68	2.075,42	≥ 700
PE 50	71,39	87,62	80,86	≥ 35	1.895,45	2.417,94	2.210,39	≥ 700
PE 75	71,63	81,05	71,19	≥ 35	1.934,64	2.020,27	1.981,08	≥ 700
PE 100	68,45	79,90	75,91	≥ 35	1.811,28	2.158,15	2.031,88	≥ 700

Todas as composições apresentaram comportamento semelhante em relação à RMF e à CR, destacando-se o aumento desses valores com a elevação da temperatura de queima. Esse comportamento é justificado pelo avanço do processo de densificação do material, promovido pela maior formação de fase líquida durante a sinterização em temperaturas mais elevadas. Como consequência, ocorre a redução da porosidade dos corpos cerâmicos, fato corroborado pela diminuição dos valores de absorção de água observados.

Na Fig. 5 é visualizado o MEV da superfície da secção dos corpos de provas de cada formulação, queimados em 1.175 °C, juntamente com a quantificação percentual da porosidade aparente calculada através do software Image J.



**Figura 5.** Imagens das superfícies das amostras das composições obtidas por MEV e tratadas por Image J

Nas imagens (MEV ampliação 1000×) pode-se ver uma morfologia similar em todas as superfícies analisadas, sendo visível o aumento na quantidade de poros na medida que se aumenta o percentual de filito nas composições. A composição PE 100% apresentou o dobro da porosidade superficial comparando com a PE 0%, isso é explicado devido a maior liberação de gases durante a queima, associados a formação do coração negro. O aumento da porosidade no produto acabado, pode provocar perda de densidade aparente queimado, diminuição na resistência mecânica a flexão e aumento da absorção de água, esses pontos devem ser observados com atenção numa possível prova industrial. A análise conjunta do Índice de Piroplasticidade (IP) e da absorção de água, nas temperaturas de 1.180 e 1.190 °C, são demonstrados na Fig. 6.

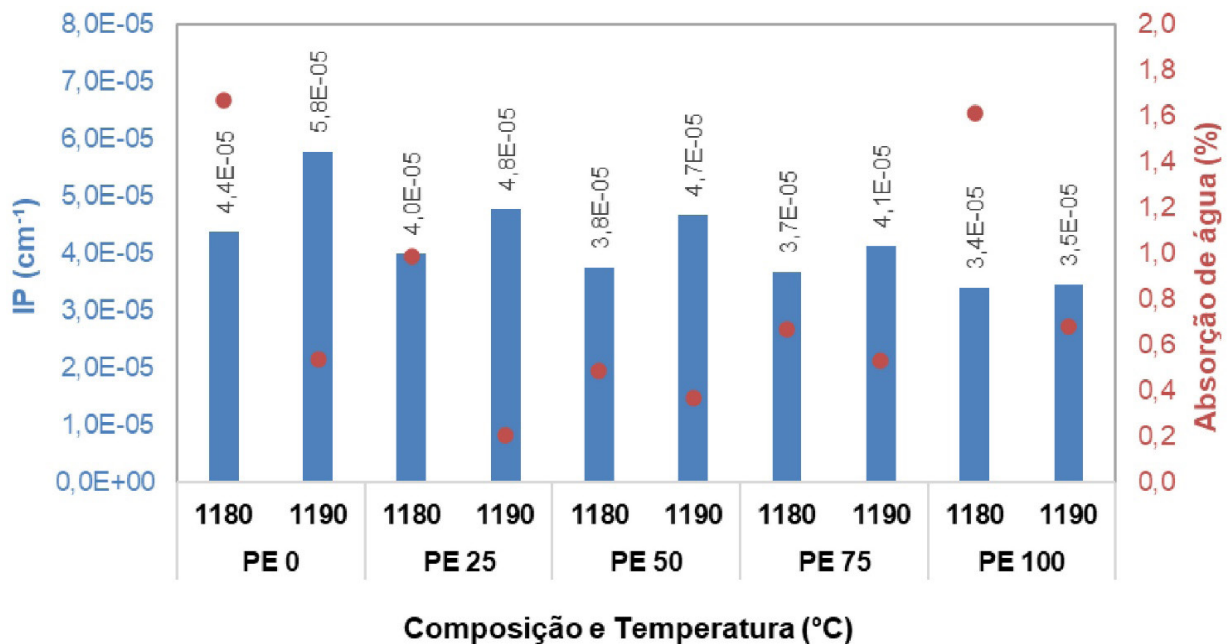


Figura 6. Gráfico de IP e absorção de água nas temperaturas de 1.180 e 1.190 °C

Para todas as composições, evidencia-se uma redução progressiva dos valores de IP, à medida que aumenta o incremento do filito, em substituição ao feldspato. O maior valor de IP foi observado na composição PE 0% filito, com  $5,8 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ , enquanto o menor valor foi registrado na PE 100% filito, com  $3,5 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ , correspondendo a uma redução aproximada de 40% na deformação pirolástica. A diminuição do IP em massas contendo filito em sua composição já foi evidenciada em algumas literaturas, onde foi estimado o aumento da viscosidade de queima promovida pelo filito associado a dissolução do quartzo na matriz vítrea, contribuindo assim com a diminuição da deformação pirolástica.

É demonstrada na Fig. 7 a diferença na deformação e curvatura final dos corpos de prova, após o ensaio de piroplasticidade.

É nítida a redução efetiva do Índice de Piroplasticidade (IP) com o aumento do teor de filito em substituição ao feldspato.

A presença de coração negro em porcelanatos pode representar um problema tecnológico, dependendo de sua intensidade e forma de manifestação, especialmente quando associada a sinais de expansão, uma vez que pode ocasionar redução da resistência mecânica à flexão. Esse efeito está relacionado à formação de vazios internos decorrentes da degaseificação de determinadas matérias-primas durante a queima.

No presente estudo, foi possível observar um aumento na intensidade do coração negro à medida que se elevou o percentual de filito nas composições, conforme demonstrado na Fig. 8.



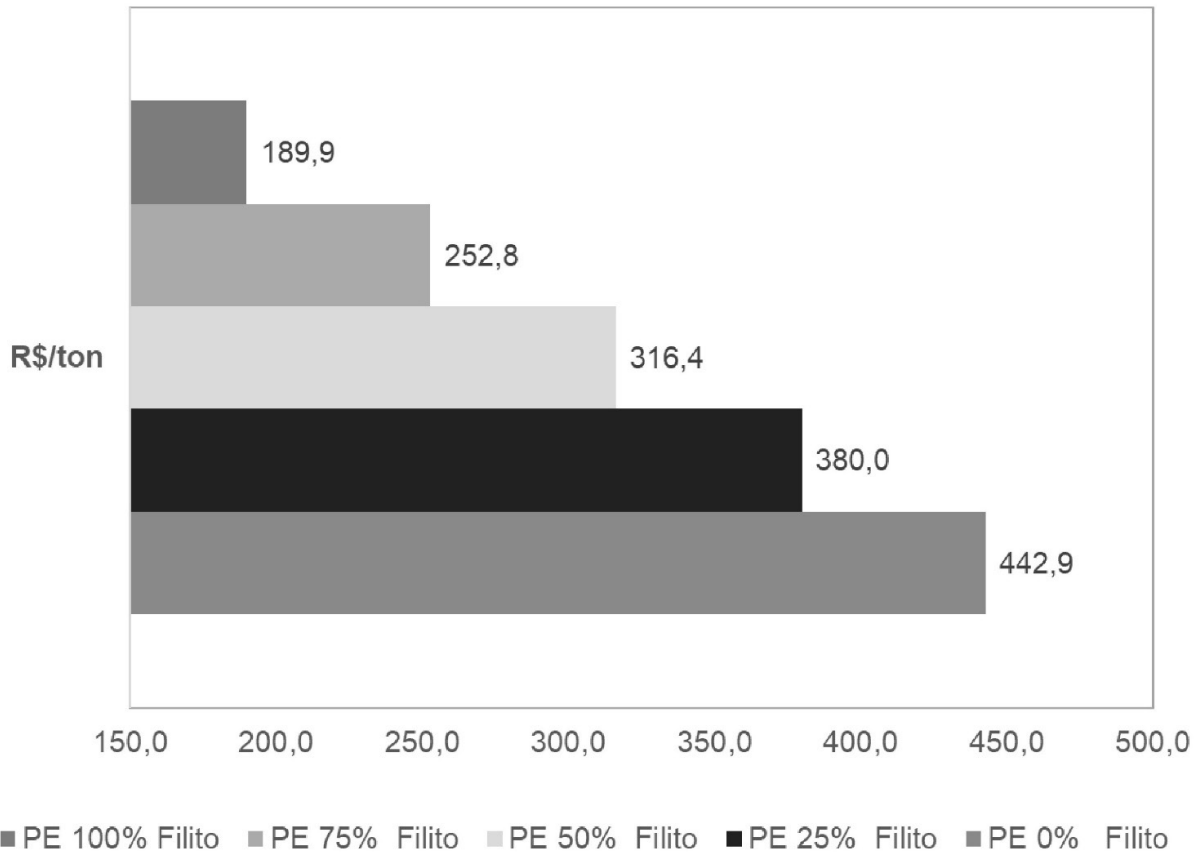
**Figura 7.** Curvaturas dos corpos de provas de cada composição, após ensaio de IP queimados a 1.190 °C



**Figura 8.** Coração negro nos corpos de provas

A manifestação do coração negro, foi considerada leve, e não comprometeu o desempenho dos materiais avaliados. Ainda assim, trata-se de um aspecto que deve ser cuidadosamente monitorado, e avaliado em uma eventual aplicação em escala industrial, podendo exigir condições de processamento que auxiliem na desgaseificação e como consequência na diminuição do aparecimento do coração negro. Algumas condições de processo podem ajudar na diminuição do problema, como diminuição da pressão de compactação e aumento de ciclo de queima.

A Fig. 9 mostra os resultados de custos de produção R\$/ton das composições pesquisadas. Ressalta-se que os valores apresentados foram normalizados, a partir de uma mesma base comparativa, e não correspondem a preços reais de mercado, sendo utilizados exclusivamente para fins de análise comparativa entre as formulações.



**Figura 9.** Comparativo de custos das composições pesquisadas

No que se refere aos custos, observa-se uma redução significativa à medida que o feldspato é substituído pelo filito. De modo geral, o custo do filito é aproximadamente 3,2 vezes inferior ao do feldspato. Verifica-se que a composição PE 100% filito (0% de feldspato), apresenta uma redução de custo da ordem de 57% em relação à formulação PE 0% filito.

#### 4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos ao final da pesquisa, podem ser estabelecidas as seguintes considerações:

- O comportamento do filito em comparação ao feldspato apresenta diferenças significativas, principalmente em função das particularidades de sua composição química e mineralógica. Enquanto o feldspato é constituído predominantemente pelas fases microclínio e albita, atuando como principal fonte de óxidos fundentes, o filito apresenta maior predominância de mica muscovita associada à albita, o que resulta em um comportamento fundente distinto e mais refratário.

- Todas as massas atingiram as condições e características estabelecidas pela norma ABNT NBR ISO 13.006:2020, a qual determina as propriedades de um porcelanato esmaltado, perante a absorção de água, resistência mecânica a flexão e carga de ruptura;
- Em relação à absorção de água, a composição PE 0% filito atingiu valor de 0,12% à temperatura de 1.175 °C, enquanto a composição PE 100% filito necessitou de 1.180 °C para alcançar absorção de água inferior a 0,5%, ambas em conformidade com os limites normativos. Esse comportamento evidencia a menor fusibilidade da massa contendo filito, que demandou um incremento de aproximadamente 5 °C no patamar de queim;
- No quesito deformação piroplastica (IP), pode-se ver a grande diferença quando se compara o uso do filito. Neste ponto, ocorreu uma redução drástica, tendo um IP a 1.190 °C de  $5,8E^{-05} \text{ cm}^{-1}$  na PE 0% contra um IP na PE 100% de  $3,5E^{-05} \text{ cm}^{-1}$ , uma redução de 40% aproximadamente. Essa redução da deformação piroplastica, está associada há menor viscosidade de queima que o filito promove na fase líquida formada, juntamente com a maior densidade aparente a seco que o filito promova na formulação.
- Com relação ao custo, pode-se verificar uma diminuição muito considerável ao substituir total ou parcialmente o feldspato por filito. Isso decorre do menor preço de aquisição do filito (3,2x mais barato) comparado com o feldspato. Nos extremos das formulações, chega-se a uma redução de custo de R\$/ton de 57%.

## REFERÊNCIAS

- [1] Sánchez M H 2018. Estudo dos efeitos da substituição de feldspato por filito em massas de porcelanato. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- [2] ABNT NBR 13006 2020. Placas cerâmicas: definições, classificação, características e marcação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- [3] Henrique P 2023. Análise comparativa do desempenho tecnológico de massas industriais de porcelanato. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- [4] Sánchez E 2003. Considerações técnicas sobre produtos de revestimento porcelânico e seus processos de manufatura. Parte I. *Cerâmica Industrial* 8, 2, 7–16.
- [5] De Noni Jr A 2007. Estudo das propriedades mecânicas de porcelanato através da avaliação de tensões residuais microscópicas e macroscópicas originadas durante a etapa de resfriamento do ciclo de queima. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [6] Comin BA, Zaccaron A, et al. 2024. Characterization and processing of kaolin from southern Brazil for potential strategic application in the porcelain stoneware tiles manufacturing. *J South Am Earth Sci* 148. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2024.105157>
- [7] Dal Bó M, Gilabert AF, et al. 2023. Quartz particle size and cooling rate effects on microstructural defects and mechanical properties of feldspar-based ceramic materials. *J Eur Ceram Soc* 43(14), 6590–6598. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.06.065>
- [8] SACMI 1996. Grês fine porcellanato. Edizione Sacmi, Imola.
- [9] Brasileiro C T 2020. Estudo de massa de porcelanato esmaltado contendo filito como fundente. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade Federal de São Carlos, São Carlos.
- [10] Sánchez M H, Nastri S, Melchades F G, Boschi A O 2019. Efeito da substituição do feldspato por filito sobre a deformação piroplastica de massas de porcelanato esmaltado. *Cerâmica Industrial* 24, 15–19.
- [11] Gibertoni C 2004. Desenvolvimento de um novo fundente para substituir o feldspato em composições de grês porcelanato. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Carlos, São Carlos.
- [12] Zanelli C, Conte S, et al. 2022. Phyllite as feldspar substitute in porcelain stoneware tiles: effect on sintering behavior and phase composition. *Appl Ceram Technol* 19, 1, 612–622.