



## Avaliação da Atividade Pozolânica de Resíduos de Cerâmica Vermelha

*Milena Friedrich Freitag<sup>1</sup>; Juliana Alves de Lima Senisse Niemczewski<sup>1</sup>; Eduardo Polesello<sup>1</sup>*

✉ [milenafriedrich@hotmail.com](mailto:milenafriedrich@hotmail.com)

*1. Universidade FEEVALE, Campus II, ERS-239, 2755 - Novo Hamburgo, Rio Grande do Sul, Brasil.*

---

**Histórico do Artigo:** O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: 06 de março de 2023

Aceito em: 29 de junho de 2023

Publicado em: 31 de dezembro de 2023

---

**Resumo:** Com a importância da destinação dos resíduos sólidos industriais e a clara necessidade de estudo de alternativas sustentáveis de resíduos como adição mineral em concreto, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial pozolânico de resíduos de cerâmica vermelha (RCV), que foram coletados em 4 empresas do Rio Grande do Sul, além de compará-los com o metacaulim, material já utilizado como pozolana na construção civil. Todos os materiais foram caracterizados quanto as suas propriedades físicas e químicas, avaliando os requisitos que um material precisa para ser considerado pozolânico conforme NBR 12653, além da realização de micrografias por microscopia eletrônica de varredura eletrônica (MEV) e análise química por espectroscopia por energia dispersiva (EDS). As amostras de RCV foram beneficiadas em moinho de bolas e utilizou-se o material passante na peneira de 75 µm. Observou-se que o índice de atividade pozolânica tem seu real desempenho mecânico interferido pela demanda de água necessária para atingir o índice de consistência preestabelecido. Avaliou-se também que seria interessante uma análise do índice de desempenho com cimento Portland além dos 28 dias. Apesar dos resultados não terem sido satisfatórios e nenhuma amostra pôde ser classificada como pozolana, inclusive o metacaulim, os mesmos são de suma importância para pesquisas e análises futuras.

**Palavras-chave:** Resíduo de Cerâmica Vermelha, Material Pozolânico, Potencial Pozolânico, Adição Mineral, NBR 12653.

---

## Evaluation of the Pozolanic Activity of Red Ceramic Waste

**Abstract:** With the importance of the destination of solid industrial waste and the clear need to study sustainable alternatives for mineral addition in concrete, this work objective was evaluate the pozzolanic potential of red ceramic waste (RCW), which were collected in 4 ceramic companies from Rio Grande do Sul, in addition to comparing them with metakaolin, material already used as pozzolana in civil construction. All materials were characterized in their physical and chemical properties, evaluating the requirements that a material needs to have to be considered pozzolanic according to NBR 12653, in addition to conducting micrographs by scanning electron microscopy and chemical analysis by energy spectroscopy dispersive. The RCW samples were processed in a ball mill and was used the material passed through the 75 µm sieve. It was observed that the pozzolanic activity has its real mechanical performance interfered by the water demand necessary to reach the pre-established consistency. It was also evaluated that an analysis of the performance with Portland cement beyond 28 days would be interesting. Although the results weren't satisfactory and no sample could be classified as pozzolan, including metakaolin, they are of paramount importance for future research and analysis.

**Keywords:** Red Ceramic Waste, Pozzolanic Material, Pozzolanic Activity, Mineral Addition, NBR 12653.

---

## Evaluación de la Actividad Puzolánica de los Ladrillos Cerámicos

**Resumen:** Debido a la importancia de la disposición de los residuos sólidos industriales y la clara necesidad de estudiar alternativas sostenibles de residuos como adición de minerales en el hormigón, este trabajo tiene como objetivo evaluar el potencial puzolánico de los residuos de ladrillos cerámicos, que fueron recolectados em 4 empresas de Río Grande do Sul, además de compararlos con el metacaolín, material ya utilizado como puzolana en la construcción civil. Todos los materiales fueron caracterizados de acuerdo con sus propiedades físicas y químicas, evaluando los requisitos que un material debe tener para ser considerado puzolánico según NBR 12653, además de micrografías por microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis químico por espectroscopia de de energía dispersiva (EDS). Las muestras de los residuos se procesaron en un molino de bolas y el material de paso se utilizó en el tamiz de 75  $\mu\text{m}$ . Se observó que el índice de actividad puzolánica tiene su rendimiento mecánico real interferido por la demanda de agua necesaria para alcanzar el índice de consistencia preestablecido. También se evaluó que sería interesante un análisis del índice de desempeño con cemento Portland más allá de 28 días. Aunque los resultados no fueron satisfactorios y ninguna muestra pudo clasificarse como puzolana, incluido el metacaolín, son de suma importancia para futuras investigaciones y análisis.

**Palabras clave:** Residuos de Ladrillos Cerámicos, Material Puzolánico, Potencial Puzolánico, Adición Mineral, NBR 12653.

---

### INTRODUÇÃO

O mundo vem passando por um aumento de população, crescente urbanização e expansão da produção industrial. As mudanças estão resultando em um grande aumento da utilização dos recursos naturais e há cada vez mais uma preocupação com o esgotamento desses recursos, os danos ambientais causados e as mudanças climáticas. Sendo assim, o uso criterioso dos recursos é de interesse de toda sociedade. Não só a produção de materiais de construção como também o seu descarte prejudica o meio ambiente. Portanto, é essencial minimizar ao máximo o dano ambiental desses materiais (SAKAR; DANA, 2021).

Aliado a isso, há o produto industrializado mais utilizado pela sociedade: o concreto. E o cimento Portland, que é o principal aglomerante hidráulico utilizado na fabricação do concreto, é responsável por grande gasto energético (4 GJ / tonelada de cimento) e vasta emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera – mundialmente, as indústrias cimentícias são responsáveis pela emissão de cerca de 5% a 7% do CO<sub>2</sub>. Salienta-se que, a longo prazo, o plano para a redução dos impactos ambientais negativos na indústria do concreto está relacionado com a diminuição de sua taxa de consumo (CARVALHO *et al.*, 2020; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Após o concreto, o segundo material mais utilizado é o tijolo cerâmico (WONG *et al.*, 2018). Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2020) o número de peças cerâmicas voltadas para a construção civil (telhas, tijolos e tapa-vigas) produzidas no Brasil é de 6 bilhões ao ano. Desta quantidade, o índice de perdas no pós-queima das cerâmicas

vermelhas é de 5% a 20%, variando conforme o tipo de tecnologia empregado na sua produção (MME, 2009).

Diversos estudos já estão incorporando os resíduos de construção e demolição (RCD) em insumos da construção civil, e substituir parcialmente o concreto por RCV é cada vez mais promissor, visto que grande parte do RCD é composto por resíduos de tijolos (PAVESI *et al.*, 2021). E estudos já apontam que a melhor maneira de se reutilizar o RCV é na forma de pó fino, a fim de aproveitar melhor o potencial cimentício e pozolânico dos materiais (WONG *et al.*, 2018; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O uso sustentável de materiais pozolânicos em materiais cimentícios pode reduzir energia e impacto ambiental. Estimativas sugerem que 20% de substituição de cimento por pó de cerâmica vermelha indica um benefício econômico de 9,6% na fabricação de concreto e uma redução de 6,62% no consumo específico de energia na produção de cimento (ARAÚJO *et al.* 2019; LI *et al.*, 2020).

Diversos subprodutos industriais podem ser incorporados ao concreto como adição mineral, havendo considerável economia de custo e energia e, em concordância com a necessidade atual, redução de impacto ambiental gerado, por exemplo, pelas indústrias de cerâmicas. Sendo assim, este estudo pretende avaliar a atividade pozolânica de RCV, como alternativa para possível substituição parcial do cimento na produção de concreto, ao verificar o potencial pozolânico de RCV coletados em 4 diferentes empresas do Rio Grande do Sul, caracterizar o RCV em suas propriedades físicas e químicas, com base na norma NBR 12653 (ABNT, 2014) e comparar os resultados obtidos com o RCV, com um material pozolânico comercialmente empregado na indústria da construção civil, o metacaulim.

## MATERIAL E MÉTODOS

Com o objetivo de analisar a atividade pozolânica do RCV para emprego como material cimentício suplementar e compará-lo com o metacaulim, os materiais foram caracterizados em suas propriedades físicas e químicas com base na NBR 12653 (ABNT, 2014), além da análise MEV/EDS. A escolha do metacaulim como referência se deu por sua já utilização na construção civil. Todos os ensaios e análises foram realizados na Universidade Feevale. A Tabela 1 apresenta os requisitos necessários, das propriedades analisadas nesta pesquisa, para um material ser considerado pozolânico.

**Tabela 1.** Requisitos necessários para um material ser considerado pozolânico

Requisito	Propriedade	Limite NBR 12653
Químico	Teor de umidade	$\leq 3 \%$
	Perda ao fogo	$\leq 10 \%$
Físico	Material retido na peneira 45 $\mu\text{m}$	$< 20 \%$
	Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	$\geq 90 \%$
	Atividade pozolânica com cal aos 7 dias	$\geq 6 \text{ MPa}$

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2014)

### Resíduos de cerâmica vermelha

Os RCV foram coletados em 4 empresas da região metropolitana de Porto Alegre/RS, sendo 4kg em cada uma delas. Como estavam úmidos, foram colocados para secar em estufa à temperatura de  $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$  por 24h, para não prejudicar o processo de beneficiamento. Em seguida, foram fragmentados manualmente com um martelo para então prosseguir com a moagem no moinho de bolas, modelo CT-241 da Servitech. Cada porção de RCV permaneceu no moinho por um período de 15 minutos. Ao serem retiradas, as amostras passaram pela peneira de nº 200 (75  $\mu\text{m}$ ). O processo foi realizado até obtenção de 600g de material beneficiado.

### Materiais utilizados

Para realização dos ensaios, além do RCV foram utilizados: metacaulim, cal, cimento Portland CP V ARI-RS, agregado miúdo, aditivo superplastificante (utilizado para consistência da mistura) e água.

Sendo assim, não foi realizado o estudo de granulometria do agregado.

O metacaulim utilizado é um produto comercialmente disponível no mercado regional. A Tabela 2 apresenta os dados fornecidos pelo fabricante.

**Tabela 2.** Características do metacaulim

Propriedades físico-químicas	Valores típicos
SiO <sub>2</sub>	57%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34%
CaO + MgO	$< 0,1\%$
SO <sub>3</sub>	$< 0,1\%$
Na <sub>2</sub> O	$< 0,1\%$
Eq.Alcalino Na <sub>2</sub> O	$< 1,5\%$
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2%
TiO <sub>2</sub>	1,50%

Umidade	0,50%
Perda ao Fogo	3%
Resíduo #325	6%
Desempenho com Cimento (7 dias)	115%
Atividade Pozolânica Chapelle	880mg Ca(OH) <sub>2</sub> /g
Área Específica BET	230.000cm <sup>2</sup> /g
Massa Específica	2,56kg/dm <sup>3</sup>

Fonte: o fabricante

Para a atividade pozolânica com cal aos 7 dias, utilizou-se a cal hidráulica. Os dados disponibilizados pelo fabricante encontram-se na Tabela 3.

**Tabela 3.** Características da cal

Especificações técnicas	Dados
Composição	Hidróxidos de cálcio, hidróxidos de magnésio, aluminosilicatos de cálcio
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	0,7
Retido na peneira nº 200 (75 µm)	15 %

Fonte: o fabricante

O cimento Portland solicitado pela NBR 5752 (ABNT, 2014), que avalia a atividade pozolânica através do ensaio de resistência à compressão aos 28 dias, é o CPH F-32. Porém, devido à dificuldade de obtenção do mesmo, optou-se pelo CP V ARI-RS, pois trata-se de um cimento com baixo teor de adição mineral, e é um cimento já utilizado por outros estudos para execução do ensaio de índice de desempenho com cimento Portland, conforme apresentado na literatura (GUILLANTE *et al.*, 2017; CASTRO *et al.*, 2017). As especificações técnicas constam na Tabela 4.

**Tabela 4.** Características do cimento Portland

Propriedades químicas, físicas e mecânicas	Valores
MgO	5,80 %
SO <sub>3</sub>	3,10 %
Blaine	5171 cm <sup>2</sup> /g
Resíduo Insolúvel	10,6 %
Perda ao Fogo	4,0 %
Resíduo #200	0,1 %
Resíduo #325	1,2 %
Tempo de pega - início	248 min
Tempo de pega - fim	315 min
Expansibilidade a quente	0,3 %
Resistência a compressão - 1 dia	22,2 MPa
Resistência a compressão - 3 dias	33,4 MPa
Resistência a compressão - 7 dias	39,0 MPa
Resistência a compressão - 28 dias	49,5 MPa

Fonte: o fabricante

### Caracterização dos materiais

A técnica de MEV foi utilizada para análise microscópica do RCV (já beneficiado) e do metacaulim, e o EDS para identificação dos elementos que compõem essas amostras, utilizando a técnica de mapeamento.

Para determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias, conforme a NBR 5751 (ABNT, 2015), é necessário o conhecimento da massa específica do RCV, metacaulim e da cal. Para isso, foram determinadas as massas específicas conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017). O ensaio prescreve a determinação da massa específica de materiais em pó através da utilização do frasco volumétrico de Le Chatelier, no qual o volume da amostra é medido pelo deslocamento de um líquido que não reaja quimicamente com a mesma.

### Requisitos químicos

Os teores de umidade dos materiais foram determinados através do ensaio prescrito na NBR NM 24 (ABNT, 2003), que consiste em secar lg de amostra na estufa a  $105 \pm 5$  °C até obtenção de massa constante e, então, pesar novamente para verificação do teor de umidade.

A perda ao fogo teve seu ensaio realizado conforme a NBR NM 18 (ABNT, 2012). O ensaio prevê que lg de amostra seja colocada em forno mufla à  $950 \pm 50$  °C por, pelo menos, 50 minutos. Após esse período, a amostra é esfriada, pesada e, então, calculada sua perda ao fogo.

### Requisitos físicos

Para a determinação do índice de finura foi realizado o procedimento especificado na NBR 15894-3 (ABNT, 2010). O ensaio consiste em dissolver a amostra no hexametáfosfato de sódio e derramá-la sobre a peneira de 45  $\mu$ m sob o fluxo de água por, pelo menos, 10 minutos. Após esse tempo, a amostra retida deve ser colocada em estufa a  $105 \pm 5$  °C até obtenção de massa constante.

Para determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias, conforme NBR 5751 (ABNT, 2015), confeccionaram-se 3 corpos de prova por amostra. Considerando a coleta de RCV de 4 empresas diferentes e a comparação com o metacaulim, totalizou-se 15 corpos de provas. Os corpos de prova são compostos por cal, agregado miúdo e material pozolânico. As quantidades de cal e areia são tabeladas, enquanto que a de material pozolânico é determinada por fórmula prescrita na NBR 5751 (ABNT, 2015). Quanto a água, é necessária sua adição até obter-se um índice de consistência de  $225 \pm 5$  mm. A Tabela 5 apresenta as quantidades utilizadas de cada material para confecção de 4 corpos de prova 50x100 mm.

**Tabela 5.** Quantidade de materiais utilizados para confecção dos corpos de prova da NBR 5751 (ABNT, 2015)

Materiais	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Metacaulim
Hidróxido de cálcio (g)	104	104	104	104	104
Areia (4 frações de 234g)	936	936	936	936	936
Material pozzolânico (g)	226,46	232,36	232,48	217,63	215,47
Água (g)	242,38	226,55	200,77	253,12	269,26

Fonte: a autora (2020)

A moldagem e o rompimento dos corpos de prova seguiram as prescrições da NBR 7215 (ABNT, 2019). Já o processo de cura, sendo de 7 dias, foi realizado conforme a NBR 5751 (ABNT, 2015). Após este período foi feita a desforma (conforme descrito pela NBR 5751 (ABNT, 2015)), capeamento com argamassa e rompimento dos corpos de prova (conforme NBR 7215 (ABNT, 2019)).

O desempenho com cimento Portland aos 28 dias seguiu os padrões da NBR 5752 (ABNT, 2014), sendo confeccionados 4 corpos de prova por amostra (4 amostras de RCV + 1 de metacaulim) e 4 corpos de prova para uma amostra de referência, sem substituição por material pozzolânico. O ensaio totalizou 24 corpos de prova. Os corpos de prova das amostras de material pozzolânico foram moldados com uma argamassa produzida com cimento Portland, areia, aditivo superplastificante (o qual teve sua quantidade definida pela obtenção de um índice de consistência de  $\pm 10$  mm da amostra de referência, a qual ficou em 210 mm) e material pozzolânico (25% de substituição pelo cimento Portland da amostra de referência, conforme estipulado pela NBR 5752 (ABNT, 2014)). As quantidades utilizadas de cada material, para confecção de 4 corpos de prova 50x100 mm, estão apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6.** Quantidade de materiais utilizados para confecção dos corpos de prova da NBR 5752 (ABNT, 2014)

Materiais	Ref	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Meta.
Cimento Portland (g)	416	312	312	312	312	312
Areia (4 frações de 234g)	1248	1248	1248	1248	1248	1248
Material pozzolânico (g)	- 200	104	104	104	104	104
Água (g)	200	200	200	200	200	200
Aditivo superplastificante (% massa do cimento)	-	0,42	0,42	0,42	3,20	1,25

Fonte: a autora (2020)

A mistura dos materiais, moldagem dos corpos de prova, condições de cura, determinação da carga de ruptura à compressão e o cálculo de resistência à compressão seguiram as especificações da NBR 7215 (ABNT, 2019). No processo de cura, nas primeiras 24h os corpos de prova foram colocados na câmara úmida. Em seguida, foram retirados das fôrmas e imersos em tanques de cura em água saturada com cal, onde permaneceram por 27 dias. Após este período, foram realizados o capeamento com argamassa e o rompimento dos mesmos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Caracterização dos materiais

As massas específicas das amostras de RCV, do metacaulim e da cal, para realização do Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal aos 7 dias, encontram-se na Tabela 7.

**Tabela 7.** Massa específica das amostras dos materiais

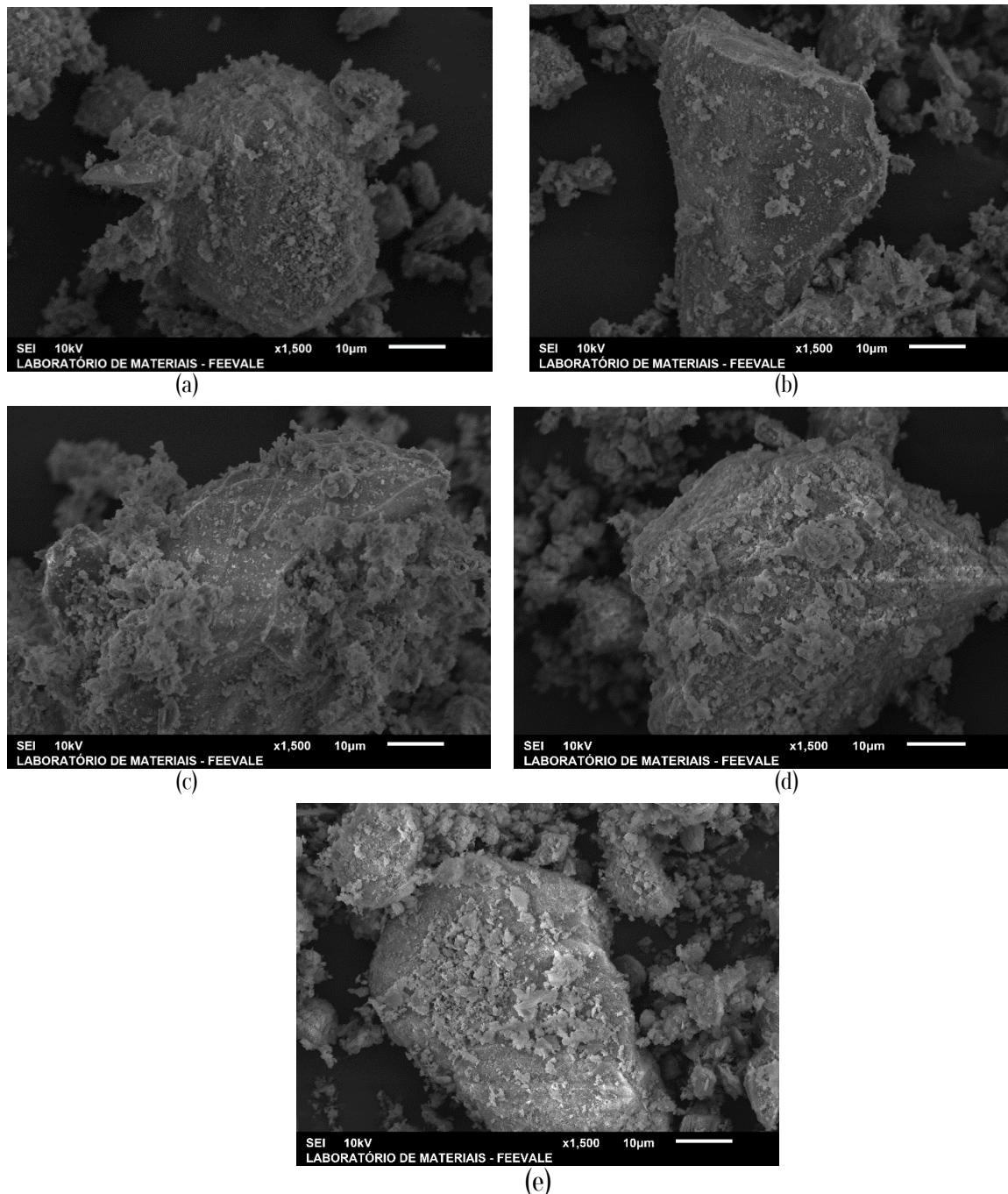
Amostra	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )
1	2,63
2	2,70
3	2,70
4	2,53
Metacaulim	2,51
Cal	2,42

Fonte: a autora (2020)

Observa-se que o metacaulim apresentou massa específica similar ao fornecido pelo fabricante, de 2,56 g/cm<sup>3</sup>. Os resultados dos RCV estão coerentes com os apresentados pela literatura: Brekailo *et al.* (2015) encontraram 2,53 g/cm<sup>3</sup> e Hansen (2016) encontrou 2,79 g/cm<sup>3</sup>.

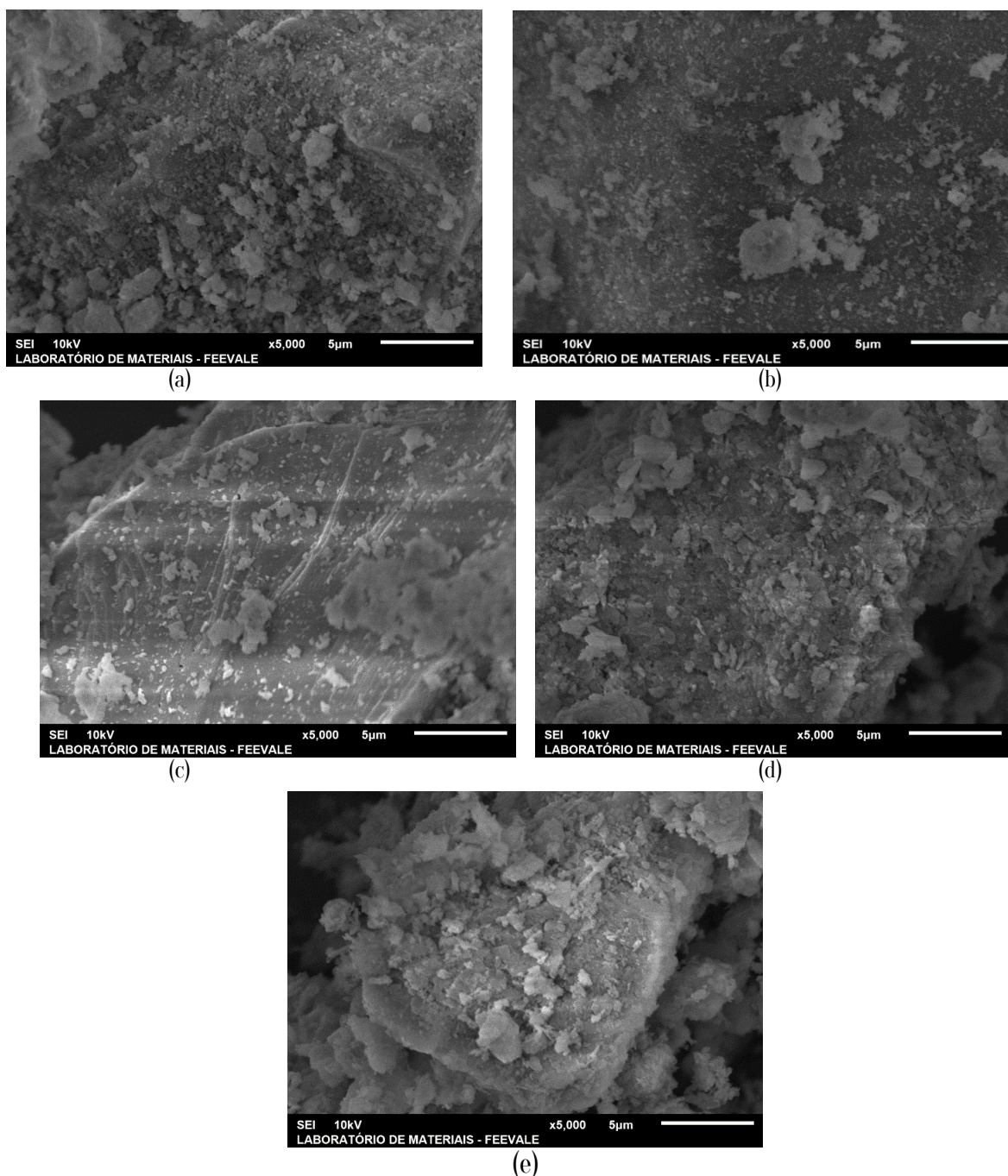
Os resultados das micrografias obtidas pelo MEV das amostras em amplitude de 1500x são apresentados na Fig. 1, já em amplitude de 5000x são apresentados na Fig. 2.





**Figura 1.** Análise MEV das amostras em amplitude de 1500x: (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, (d) amostra 4, (e) metacaulim  
Fonte: a autora (2020)

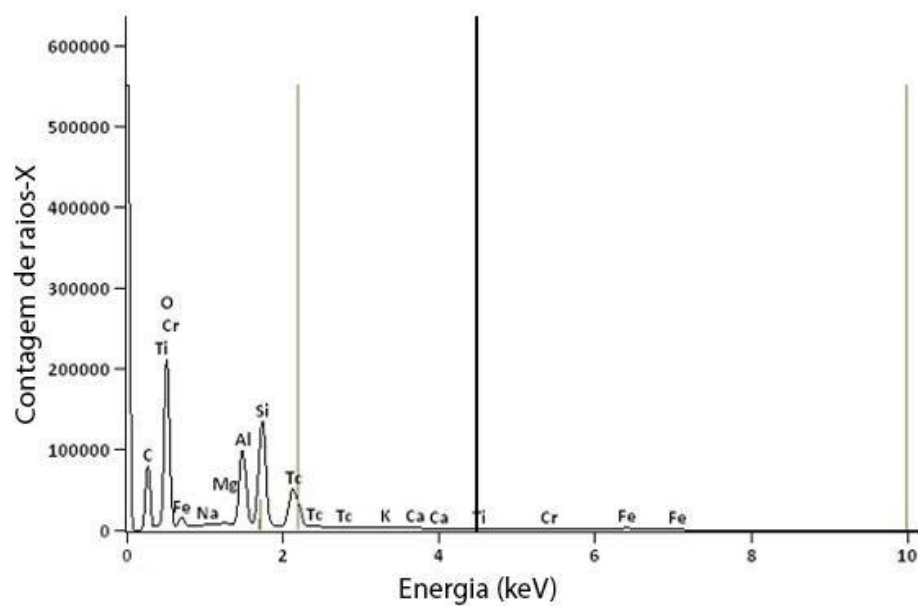
Na imagem observa-se partículas de diversos tamanhos, evidenciando diferentes dimensões granulométricas. Na amplitude de 5000x (Fig. 2) é possível observar um padrão de partículas bem similares entre as amostras, com um padrão de grão mais anguloso, também visto por Araújo *et al.* (2019). Sebastiany (2014) encontrou um padrão similar em suas amostras de cerâmica, porém grãos mais arredondados no metacaulim.



**Figura 2.** Análise MEV das amostras em amplitude de 5000x: (a) amostra 1, (b) amostra 2, (c) amostra 3, (d) amostra 4, (e) metacaulim  
 Fonte: a autora (2020)

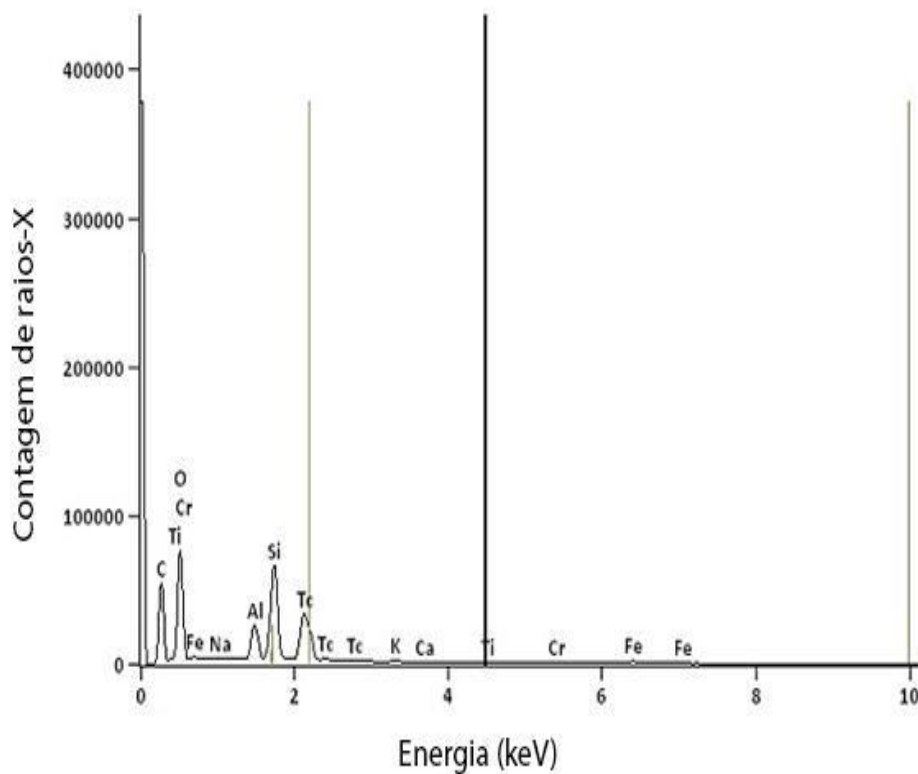
Os Gráficos 1, 2, 3, 4 e 5 apresentam os resultados obtidos de todas as amostras pelo EDS, de forma qualitativa, sendo os elementos: oxigênio (O), cálcio (Ca), carbono (C), alumínio (Al), silício (Si), magnésio (Mg), flúor (F), ferro (Fe), sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca), titânio (Ti), cromo (Cr) e tecnécio (Tc).

**Gráfico 1.** Análise EDS da amostra 1

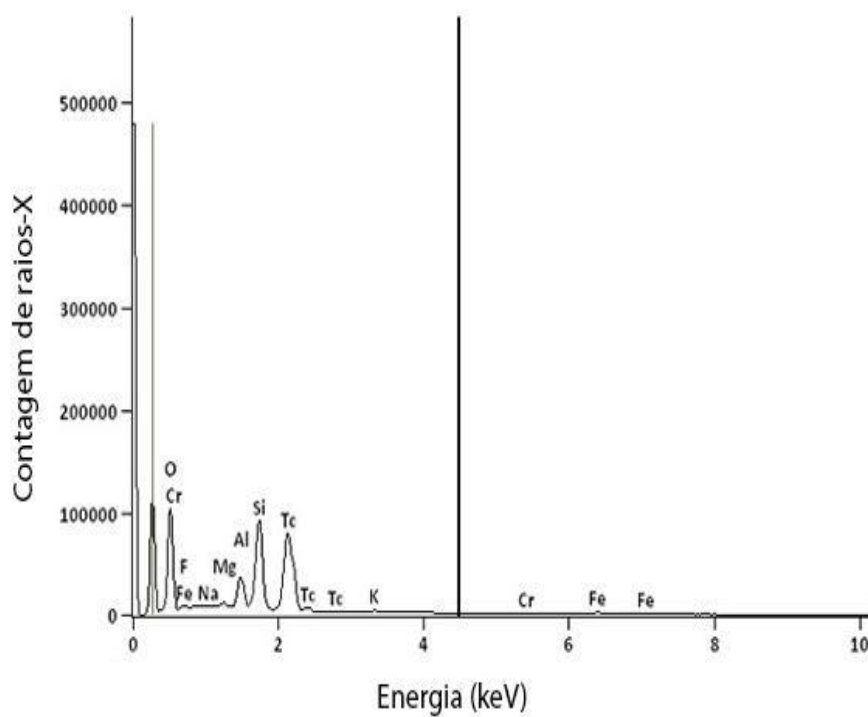


Fonte: a autora (2020)

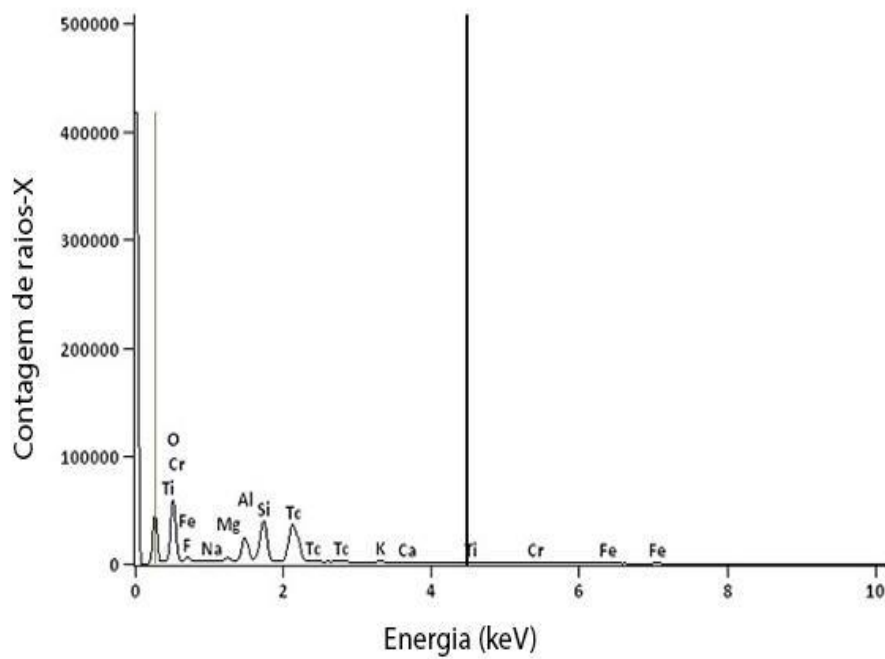
**Gráfico 2.** Análise EDS da amostra 2



Fonte: a autora (2020)

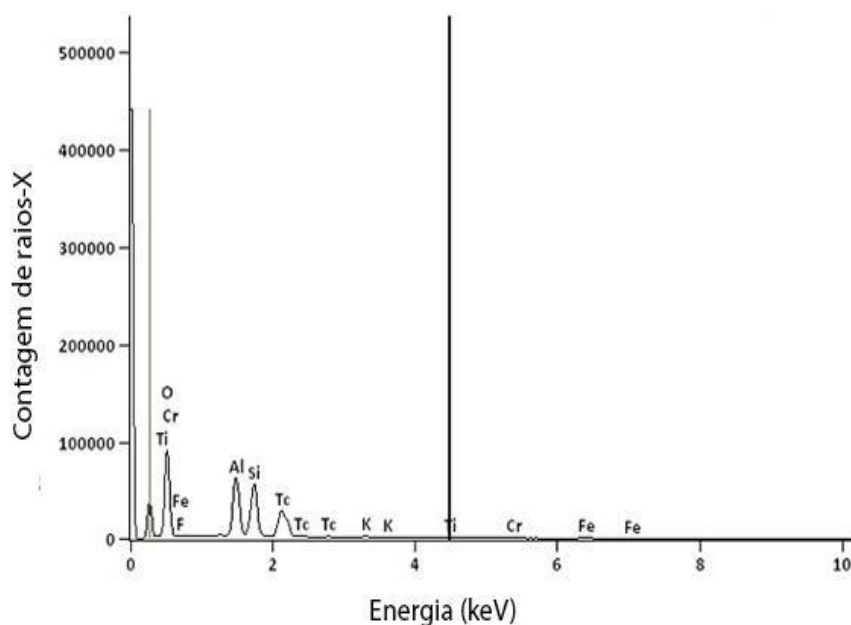
**Gráfico 3.** Análise EDS da amostra 3

Fonte: a autora (2020)

**Gráfico 4.** Análise EDS da amostra 4

Fonte: a autora (2020)



**Gráfico 5.** Análise EDS do metacaulim

Fonte: a autora (2020)

Em relação aos elementos majoritários, observa-se um padrão similar de elementos em todas as amostras, inclusive no metacaulim. Entretanto, a amostra 1 possui picos maiores de oxigênio, cromo e titânio; o silício possui menor presença na amostra 4 e no metacaulim; a amostra 2 e o metacaulim não apresentam magnésio. Segundo Meira (2001), os elementos mais frequentes em um material argiloso são: oxigênio, silício, alumínio, ferro, magnésio, potássio e sódio. Observa-se que, com exceção do magnésio (não presente na amostra 2), os demais elementos aparecem em todas as amostras de RCV.

O silício (Si) combinado ao oxigênio (O) resulta no dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), sendo importante para hidratação do cimento e aumento de resistência, quando em conjunto com o óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) que está presente no cimento (CAMPOS *et al.*, 2022). Observa-se que a amostra com maior pico de oxigênio e silício é a amostra 1, não se sobressaindo o metacaulim em relação ao RCV.

### Requisitos químicos

A Tabela 8 dispõe dos resultados obtidos para o teor de umidade e perda ao fogo dos materiais, assim como os valores de referência conforme NBR 12653 (ABNT, 2014). Observa-se que a única amostra que apresentou teor de umidade com resultado superior ao permitido é a amostra 4.

**Tabela 8.** Requisitos químicos obtidos

Propriedade	Amostra				Metacaulim	Valor de referência
	1	2	3	4		
Teor de umidade (%)	0,1746	0,2888	0,3710	4,2538	0,5266	$\leq 3$
Perda ao fogo (%)	0,9853	0,9418	0,8855	8,565	1,9697	$\leq 10$

Fonte: a autora (2020)

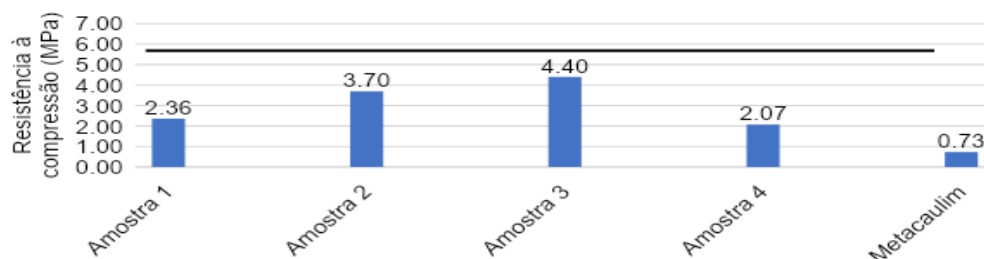
No teor de umidade, o resultado obtido para o metacaulim vai de encontro ao fornecido pelo fabricante, de 0,5%. Os demais resultados foram próximos aos encontrados por outros estudos, destacando Brekailo *et al.* (2019) que encontraram 0,1% e Garcia *et al.* (2014) com resultados de 0,6% a 2,1%.

Na perda ao fogo, observa-se que a amostra 4 novamente apresentou resultado mais elevado que as demais. Brekailo *et al.* (2019) também encontraram um resultado mais elevado, sendo de 5,6%; assim como Cordeiro e Désir (2010), que obtiveram uma perda ao fogo de 5,1%. Garcia *et al.* (2014) encontraram resultados de 0,8% a 2,2%, estando mais próximos aos demais resultados desta pesquisa. Em relação ao metacaulim, o mesmo obteve resultado um pouco inferior ao disponibilizado pelo fabricante, de 3%.

A perda ao fogo e a umidade estão diretamente ligadas com o processo de produção da cerâmica vermelha. Visto que a perda ao fogo indica o material não totalmente calcinado na amostra; e a umidade está ligada com as características de cada argila e a preparação da massa para produção da cerâmica (WIECK; FH, 2013). Com isso, os resultados são de difícil comparação entre si devido a sua matéria prima e processo de produção serem parte fundamental dos resultados.

### Requisitos físicos

O Gráfico 6 apresenta o gráfico dos resultados obtidos no IAP com cal aos 7 dias. Conforme estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014), as argamassas precisam apresentar resistência à compressão maior ou igual a 6,0 MPa. Observa-se que nenhuma amostra atingiu o mínimo necessário para ser enquadrado como uma pozolana.

**Gráfico 6.** Atividade pozolânica com cal aos 7 dias

Fonte: a autora (2020)

Observa-se que mesmo o metacaulim, uma pozolana já comercializada, não atendeu ao limite normativo. Esse resultado mostra-se coerente ao obtido por Sebastiany (2014) e Hansen (2014), que alcançaram 2,77 MPa e 0,90 MPa. Observa-se que quanto menor a demanda de água utilizada na amostra, maior o IAP com cal. Estudos concluem que o índice de consistência preestabelecido pela NBR 5751 (ABNT, 2015) interfere na demanda de água e, por consequência, na resistência à compressão da argamassa, e a influência da relação água/aglomerante afeta as argamassas a ponto de suas tendências de comportamento não retratarem seu real desempenho mecânico. Eles acrescentam que o ideal seria fixar a quantidade de água da mistura e acrescentar, quando necessário, aditivo superplastificante (SEBASTIANY, 2014; MEDEIROS *et al.*, 2015). É importante também destacar o que comenta Weber (2001): “devido à variação da qualidade da cal, e seus efeitos no resultado do teste, a maioria dos pesquisadores não mais utiliza este ensaio.”

No índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, obteve-se bastante variabilidade nos resultados de resistência à compressão, onde foram realizados 4 corpos de prova por amostra. Sendo assim, conforme permitido pela NBR 7215 (ABNT, 2019), retirou-se o valor que mais se afastava da média, totalizando em 3 corpos de prova por amostra. A Tabela 9 apresenta o resultado obtido, em MPa, da amostra de referência e das demais amostras, que segundo estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014), as argamassas precisam apresentar resistência à compressão maior ou igual a 90% em relação a amostra de referência, sem adição de material pozolânico.

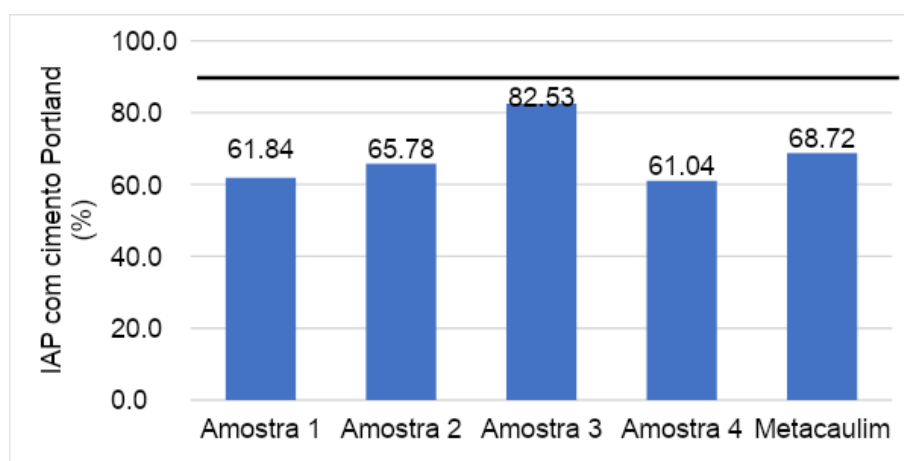
**Tabela 9.** Resultados do IAP com cimento Portland aos 28 dias

Média dos resultados (MPa)	Amostra					
	Referência	1	2	3	4	Metacaulim
4 resultados	19,30	11,93	12,69	15,93	11,78	13,26
3 resultados	22,92	8,21	11,09	14,62	11,51	13,33

Fonte: a autora (2020)

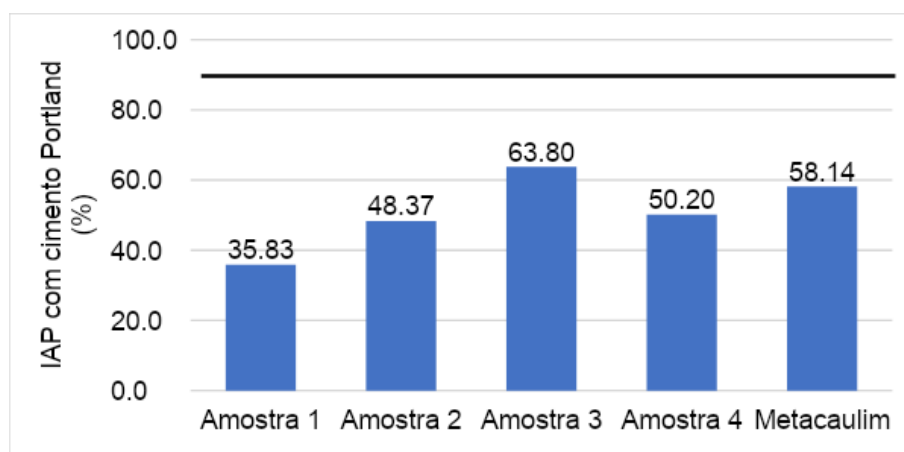
Com o intuito de expor essa diferença, nos Gráficos 7 e 8 são apresentados tanto o resultado das médias das 4 amostras, quanto o das médias de somente 3 amostras. Weber (2001) aponta que uma limitação deste ensaio é que a composição do cimento pode influenciar nos resultados.

**Gráfico 7.** Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias: média dos 4 resultados



Fonte: a autora (2020)

**Gráfico 8.** Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias: média dos 3 resultados



Fonte: a autora (2020)

A média da resistência a compressão (dos 3 resultados) da amostra de referência foi de 22,92 MPa, similar ao encontrado por Araújo *et al.* (2019), de 20,09 MPa. Porém os autores obtiveram um resultado de IAP com o RCV de 11% acima da amostra de referência.

Apesar dos resultados não satisfatórios desta pesquisa, os mesmos mostram-se condizentes com Hansen (2016), que obteve um IAP de 54% para o RCV e 72% para o metacaulim aos 28 dias. Destaca-se, em relação ao RCV, que os resultados satisfatórios da autora foram obtidos somente aos 91 dias, para substituição de 20% (atingindo 99% de IAP) e



para substituição de 35% (atingindo 103%). Mehta e Monteiro (2014) também mostram resultados satisfatórios ao longo de meses, e não em dias, destacando a amostra com 20% de substituição como mais satisfatória. Já Samadi *et al.* (2020) obtiverem resultados satisfatórios tanto com 20% de substituição quanto com 40%, porém também sendo a análise em 90 dias a mais satisfatória.

Mohit e Sharifi (2019) concluem em seu estudo que a adição de resíduo cerâmico melhora as propriedades de resistência, porém, especialmente, em idades superiores. Nas primeiras idades, a pozolana ainda não atinge seu potencial pozolânico.

Em função desses resultados dispersivos e as diversas possibilidades de análise, o ideal é a moldagem de, em média, 8 corpos de prova por amostra, para conseguir uma maior exclusão de resultados espúrios e, conseqüentemente, obter um desvio relativo máximo menor.

Observa-se que, independentemente do método utilizado para apresentação dos resultados, média de 3 ou 4 resultados, a amostra 3 e o metacaulim mantem seu comportamento quanto ao IAP. Porém, as demais, apresentam grande variação de sua atividade pozolânica, não podendo nenhuma ser considerada uma pozolana.

O resumo dos resultados dos requisitos físicos está apresentado na Tabela 10, assim como o valor de referência dos ensaios conforme NBR 12653 (ABNT, 2014).

**Tabela 10.** Requisitos físicos obtidos

Propriedade	Amostra					Valor de referência
	1	2	3	4	Metacaulim	
Índice de finura (%)	23,551	14,387	16,589	5,653	4,809	< 20
Atividade pozolânica com cal aos 7 dias (MPa)	2,360	3,700	4,397	2,073	0,730	≥ 6
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (%)	35,835	48,371	63,802	50,204	58,144	≥ 90

Fonte: a autora (2020)

Por fim, em relação ao índice de finura, somente a amostra 1 não atendeu o limite normativo, e as amostras 2 e 3 apresentam os melhores resultados, estando mais próximos aos limites preferenciais entre 10% e 15% que consta na NBR 12653 (ABNT, 2014). O metacaulim apresentou resultado adequado com o apresentado na ficha técnica do produto disponibilizada pelo fabricante (6%).

Em uma análise geral, observa-se que o metacaulim não se destacou das amostras de RCV em nenhuma propriedade, o que não era esperado pois trata-se de um produto utilizado

comercialmente. A amostra 3 é a que obteve melhores resultados ao analisar todas as propriedades: valores satisfatórios para o teor de umidade e perda ao fogo, índice de finura próximo da faixa ideal de 10% a 15% estipulada pela NBR 12653 (ABNT, 2014), e maiores valores de IAP com cal e cimento Portland.

Já em análise dos requisitos químicos em comparação aos físicos, não foi possível constatar nenhuma relação entre eles.

## CONCLUSÕES

Quanto aos resultados obtidos, é possível destacar que, no geral, todos os materiais obtiveram resultados satisfatórios na caracterização química, referente à perda ao fogo e ao teor de umidade (a amostra 4 foi a que apresentou piores resultados, ficando aproximadamente 1% acima do limite estipulado pela NBR 12653 (ABNT, 2014)). As demais, podem ser consideradas como pozolanas considerando esses dois parâmetros. No índice de finura, requisito físico da NBR 12653 (ABNT, 2014), a amostra 1 foi a única que apresentou um resultado aproximadamente 3% acima do parâmetro normativo. Avalia-se que o método empregado para o beneficiamento das amostras foi eficaz, porém se mostra interessante adicionar mais um método de moagem, para que todas as amostras permaneçam no limite estipulado. Na atividade pozolânica com cal, observou-se um padrão de resultados muito similar a algumas bibliografias, mesmo as amostras não sendo classificadas como pozolanas pela NBR 12653 (ABNT, 2014). E no índice de desempenho com cimento Portland, observou-se uma grande variabilidade de resultados, inclusive dos corpos de prova sem substituição parcial por material pozolânico.

Apesar de nem todos os resultados terem sido satisfatórios, os mesmos não são irrefutáveis. É clara a necessidade de revisão da NBR 5751 (ABNT, 2015) para avaliação da atividade pozolânica com cal, em decorrência da sua relação água/aglomerante. Em relação ao índice de desempenho com cimento Portland pela NBR 5752 (ABNT, 2014), estudos apresentados pela literatura mostram que as análises aos 28 dias não atendem ao índice especificado, mas em idades superiores (91 dias e ao longo de meses, por exemplo) sim, ponto que se mostra interessante ser melhor analisado. E, assim como também apontado pela bibliografia, é interessante a substituição por 20%. Além disso, indica-se a confecção de, pelo menos, 8 corpos de prova para realização da NBR 5751 (ABNT, 2015) e NBR 5752 (ABNT, 2014).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, R. A. *et al.* Evaluation of the pozzolanic activity of red ceramic waste using mechanical and physicochemical methods. **Cerâmica**, São Paulo, v. 65, n. 375, p. 461-469, set. 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751**: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Rio de Janeiro, outubro 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos – Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, jun. 2014.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7214**: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, nov. 2015.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, fev. 2019.
- \_\_\_\_\_. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, jul. 2014.
- \_\_\_\_\_. **NBR 15894-3**: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta – Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm. Rio de Janeiro, out. 2010.
- \_\_\_\_\_. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, jun. 2017.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 18**: Cimento Portland – Análise química – Determinação de perda ao fogo. Rio de Janeiro, jun. 2012.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 24**: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de umidade. Rio de Janeiro, jul. 2003.
- BREKAILO, F. *et al.* Avaliação do potencial reativo de adições de resíduos de blocos de cerâmica vermelha e de concreto cominuído de RCD em matriz cimentícia. **Cerâmica**, São Paulo, v. 65, n. 375, p. 351-358, set. 2019.
- CAMPOS, M. A. *et al.* Resíduos dos polos cerâmicos paulistas: Problema territorial e alternativa para a produção de matrizes cimentícias. **Conjecturas**, v. 22, n. 2, p. 358-380, mar. 2022.
- CARVALHO, C. M. *et al.* Red ceramic industry residues: Used to produce Portland cement. **Case studies in Construction Materials**, v. 13, 2020.
- CASTRO, A. L. *et al.* Caracterização de cimentos compostos com resíduo da indústria de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 63, n. 365, p. 65-76, mar. 2017.
- CORDEIRO, G. C; DESIR, J. M. Potencial de argila caulinitica de Campos dos Goytacazes, RJ, na produção de pozolana para concreto de alta resistência. **Cerâmica**, São Paulo, v. 56, n. 337, p. 71-76, mar. 2010.
- GARCIA, E. *et al.* Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV): Uma alternativa como material pozolânico. **Cerâmica Industrial**, 19, 2014.
- GUILLANTE, Patricia *et al.* Efeito sinérgico da cinza de casca de arroz e do resíduo de cerâmica vermelha na mitigação da RAA. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO, 5., 2017, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: 2017.
- HANSEN, Débora Magali. **Avaliação das propriedades pozolânicas de um resíduo de cerâmica vermelha para emprego como material cimentício suplementar**. 2016. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2016.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Tabela 7752: Produção e vendas dos produtos e/ou serviços industriais, segundo as classes de atividades e os produtos**.
- LI, Le *et al.* Waste ceramic powder as a pozzolanic supplementary filler of cement for developing sustainable building materials. **Jornal of Cleaner Production**, v. 259, jun. 2020.



MEDEIROS, M. H. F. de *et al.* Pozolanas de elevada reatividade: uma avaliação crítica do ensaio de Índice de Atividade Pozolânica (IAP) com cal usando Difração de Raios X. **Ambiente construído**. Porto Alegre, v. 15, n. 3, p. 19-29, set. 2015.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 751 p.

MEIRA, João M. L. Argilas: o que são, suas propriedades e classificações. **Comunicações Técnicas**. Lisboa, jan. 2001.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME. **Análise-síntese da transformação mineral no Brasil**.

MOHIT, M.; SHARIFI, Y. Ceramic Waste Powder as Alternative Mortar-Based Cementitious Material. **ACI Materials Journal**, v. 116, n. 6, p. 107-116, 2019.

SAKAR, Madhuchhanda; DANA, Kausik. Partial replacement of metakaolin with red ceramic waste in geopolymer. **Ceramics International**. v. 47, n. 3, p. 3473-3483, fev. 2021.

PAVESI, *et al.* Supporting circular economy through the use of red ceramic waste as supplementary cementitious material in structural concrete. **Journal of Material Cycles and Waste Management**. v. 23, n. 6, p. 2278-2296, 2021.

SAMADI, Mostafa *et al.* Waste ceramic as low cost and eco-friendly materials in the production of sustainable mortars. **Jornal of Cleaner Production**, v. 266, set. 2020.

SEBASTIANY, Lucas Deivid. **Avaliação de métodos de determinação de potencial pozolânico de resíduos da indústria de cerâmica vermelha**. 2014. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2014.

WEBER, Lucas Deivid. **Metodologia para obtenção de sílica de elevada reatividade para uso em concreto de alto desempenho a partir do processamento de cinza de casca de arroz**. 2001. 98f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis. 2001.

WIECK, Rogério; FH, Jamil Duailibi. Extrusão em Cerâmica Vermelha: Princípios Básicos, Problemas e Soluções. **Cerâmica Industrial**, 18. 2013.

WONG, Chee Lum *et al.* Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review. **Jornal of Cleaner Production**, v. 195, set. 2018.