

## Aglomerante alternativo: comparação dos sistemas óxido de magnésio e metacaulim com óxido de magnésio e sílica ativa

### Alternative binder: comparison of magnesium oxide and metakaolin systems with magnesium oxide and silica fume

*Maria Paula Hêngling Christófani Moraes(1); Leticia Martelo Pagoto(2); Jorge Luis Akasaki(3); Cesar Fabiano Fioriti(4)*

1 Arquiteta e Urbanista, Mestre em Engenharia de Construção Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista – FEIS/UNESP, Ilha Solteira/SP, Brasil.

E-mail: mariapaula.hec@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4233-6544>

2 Engenheira Civil, Doutoranda em Ciência dos Materiais, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista – FEIS/UNESP, Ilha Solteira/SP, Brasil.

E-mail: leticia.pagoto@unesp.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2901-7626>

3 Engenheiro Civil, Doutor em Arquitetura e Urbanismo, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista – FEIS/UNESP, Ilha Solteira/SP, Brasil.

E-mail: jorge.akasaki@unesp.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1986-1196>

4 Engenheiro Civil, Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista – FCT/UNESP, Presidente Prudente/SP, Brasil.

E-mail: c.fioriti@unesp.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5461-4495>

**Revista de Arquitetura IMED**, Passo Fundo, vol. 14, n. 2, p. 113-127, julho-dezembro, 2025 - ISSN 2318-1109

DOI: <https://doi.org/10.18256/2318-1109.2025.v14i2.5222>

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*

## Resumo

O trabalho estudou o comportamento de um aglomerante alternativo composto por óxido de magnésio (MgO) e metacaulim, como fonte de dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) para o sistema, comparando a um sistema referencial composto por MgO e sílica ativa (fonte de  $\text{SiO}_2$ ). Foram analisadas as proporções 40/60 e 60/40 – em massa – com relações água/aglomerante (a/a) de 0,6 e 0,7. O programa contou com ensaios de fluorescência de raio-x (FRX), perda ao fogo, difração de raio-x (DRX), temperatura por tempo e absorção de água por capilaridade. Os resultados apontaram que o percentual dos compostos presentes no metacaulim e na sílica ativa, bem como os padrões de perda ao fogo de cada material, estão dentro dos parâmetros normativos para o emprego com cimento Portland. O DRX do MgO apresentou picos definidos, o da sílica ativa apresentou difratograma típico de material amorfo, e o do metacaulim permitiu observar certa reatividade. Na temperatura por tempo as pastas com sílica ativa demonstraram liberar mais calor do que as com metacaulim. Na absorção por capilaridade as pastas com metacaulim apresentaram comportamento à água distinto do apresentado pela sílica ativa, possuindo um perfil mais absorvente. Destacando que estudos futuros devem ser conduzidos visando o aprimoramento do sistema proposto.

**Palavras-chave:** Cimento magnesiano; Sustentabilidade; Material alternativo; Aglomerante.

## Abstract

The paper studied the behavior of an alternative binder composed of magnesium oxide (MgO) and me-takaolin, as a source of silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ ) for the system, comparing it to a reference system composed of MgO and silica fume (source of  $\text{SiO}_2$ ). The proportions 40/60 and 60/40 were analyzed – in mass – with water/binder ratios (w/w) of 0.6 and 0.7. The program included tests of X-ray fluorescence (XRF), loss on ignition, X-ray diffraction (XRD), temperature versus time and water absorption by capillarity. The results indicated that the percentage of the compounds present in the metakaolin and silica fume, as well as the loss on ignition patterns of each material, are within the normative parameters for the use with Portland cement. The XRD of MgO showed defined peaks, while the silica fume showed diffractogram of amorphous material, and the metakaolin has some reactivity. In the temperature versus time, the pastes with silica fume demonstrated to release more heat than those with metakaolin. In capillarity the pastes with metakaolin presented a different behavior to water than that presented by silica fume, having a more absorbent profile. It is worth highlighting that future studies should be conducted aiming at the improvement of the proposed system.

**Keywords:** Magnesium cement; Sustainability; Alternative material; Binder.

## 1 Introdução

A necessidade de se encontrar produtos cimentícios alternativos que mantenham as características e vantagens proporcionadas pelo cimento Portland, que se apresentem com uma melhor pegada ambiental, é considerada de vital importância. Visto que a produção do cimento Portland acaba por utilizar grandes quantidades de recursos naturais, possui elevado gasto de energia, bem como contribui na elevada liberação do

dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) na atmosfera (Capelo, 2021; Moumin et al., 2020; Unluer; Al-Tabbaa, 2015).

Na busca por materiais alternativos que contribuam com a preservação ambiental destaca-se o emprego de aglomerantes alternativos mais sustentáveis, como os cimentos a base de  $\text{MgO}$  (Celik et al., 2014; Hay; Celik, 2020; Celik et al., 2019; Kumar et al., 2020; Moumin et al., 2020). O cimento de  $\text{MgO}$ , também conhecido como cimento magnésiano, além de outras combinações, vem sendo estudado em junção com dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ), produzindo uma pasta semelhante à de cimento Portland, porém com um perfil mais sustentável.

O material tem sido estudado como possível substituto do cimento Portland devido as características mecânicas atingidas, como as altas resistências à compressão relatadas em diversos estudos (Shah; Scott, 2021a; Shah; Scott, 2021b; Sonat; Dung; Unluer, 2017; Sonat; Unluer, 2017; Tran; Scott, 2017; Unluer; Al-Tabbaa, 2015). Além disso, o comportamento do ligante nos procedimentos de mistura, moldagem e cura também são semelhantes ao cimento Portland, o que impulsionam seu estudo.

Todavia, o fator que mais tem chamado atenção nos estudos deste novo aglomerante, é que os cimentos à base de  $\text{MgO}$  tem apresentado um perfil mais sustentável do que o cimento Portland. De acordo com Hay et al., (2021); Liska et al., (2012) e Unluer e Al-Tabbaa (2013), as temperaturas para produção do denominado  $\text{MgO}$  reativo são mais baixas que a de produção do clínquer do cimento Portland, ficando em torno de 700 a 1000°C, quando comparadas com a do cimento Portland (1450°C). Associa-se ainda às menores temperaturas de produção, uma economia da energia gasta no processo de aquecimento dos fornos de calcinação do produto (Walling e Provis, 2016). Outro ponto destacado entre as formulações de cimentos a base de  $\text{MgO}$  é a possibilidade de destinação de vários materiais e resíduos, que são utilizados como compostos no sistema conferindo diversas características (Abdel-Gawwad, et al., 2020; Capelo, 2021; Dhakal, et al., 2021; Kumar et al., 2020; Ruan; Unluer, 2017; Shah; Scott, 2021a; Sonat; Unluer, 2019). Além disso, estudos recentes têm demonstrado a capacidade do material em absorver e armazenar  $\text{CO}_2$  permanentemente por meio de carbonatação, fato que também auxilia em seu ganho de resistência ao longo do tempo (Hay et al., 2021; Unluer; Al-Tabbaa, 2014; Walling; Provis, 2016). Este último ponto leva ainda a outra vantagem, que é o aumento considerável da durabilidade do aglomerante gerado devido à maior resistência dos produtos de hidratação e carbonatação em ambientes agressivos (Unluer; Al-Tabbaa, 2014).

Diversos estudos têm demonstrado maiores vantagens relacionados ao seu emprego para determinadas finalidades, quando comparado ao sistema comum de cimento Portland. Dolores (2017) relatou que o uso de  $\text{MgO}$  apresenta uma solução para a preservação de fibras lignocelulósicas na produção de produtos de fibrocimento, que sofrem degradação em meios muito alcalinos, como é o caso do cimento comum. Da mesma maneira, alguns pesquisadores relatam vantagens no emprego dos ligantes

a base de MgO para confecção de materiais refratários, uma vez que suporta altas temperaturas, além de outros estudos demonstrarem bons resultados do emprego do material para o encapsulamento de resíduos contendo metais, visto que são amplamente utilizados com essa finalidade limitando a mobilidade do contaminante (Szczerba et al., 2013; Zhang, Cheeseman, Vandeperre, 2011).

De acordo com Walling e Provis (2016), a calcinação do  $MgCO_3$  é o principal meio de obtenção do MgO para utilização nos cimentos magnesianos. Já o metacaulim é uma pozolana natural produzida pelo aquecimento de argilas contendo caulim (RASHAD, 2013). Diversas temperaturas de calcinação do material são citadas na literatura, porém todas variam em uma faixa de 500°C a 900°C. Segundo Rashad (2013), a temperatura de calcinação que produz o estado reativo geralmente está na faixa de 600 a 800°C, cujo desenvolvimento de propriedades pozolânicas do metacaulim depende principalmente da natureza e abundância de argilominerais na matéria-prima, das condições de calcinação e da finura do produto final.

Devido as inúmeras vantagens e possíveis aplicações que vem sendo estudadas com o uso do ligante a base de MgO, seu emprego se torna uma alternativa promissora como opção de aglomerante alternativo ao cimento Portland, sendo mais sustentável e consequentemente com menor nível de agressão ao meio ambiente.

Destarte, o trabalho visou estudar o comportamento de um aglomerante alternativo ao cimento Portland composto por MgO e metacaulim e compará-lo a um aglomerante mais consolidado composto por MgO e sílica ativa. O programa experimental contou com ensaios de fluorescência de raio-x (FRX), perda ao fogo, difração de raio-x (DRX), temperatura por tempo e absorção de água por capilaridade.

## 2 Materiais e métodos

O programa experimental foi desenvolvido no Laboratório da Engenharia Civil, localizado na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – FEIS/UNESP, em Ilha Solteira – Brasil. Foram utilizados os seguintes materiais: óxido de magnésio, fornecido pela Minérios Ouro Branco; sílica ativa, fornecida pela empresa Ferbasa; o metacaulim empregado foi o Metacaulim HP ULTRA, fornecido pela fabricante Metacaulim do Brasil; respectivamente apresentados no Quadro 1, e água deionizada. O processo de caracterização dos materiais, realizado em duplicata para cada material, envolveu ensaios de: fluorescência de raios X (FRX) – realizado no equipamento EDX-7000 com atmosfera a vácuo e colimador de 10mm, perda ao fogo (temperatura de 900°C por 1 hora, taxa de aquecimento de 10°C/minuto) – baseado na norma ABNT NBR NM 18:2012, difração de raios X (DRX) – realizado no equipamento Shimadzu (modelo XRD-6000, comprimento de onda  $\lambda=1,5406 \text{ \AA}$ , taxa de varredura de 2°/min na faixa de 10° a 70°, a 40 kV e 30mA). Foram produzidas oito proporções de pastas, conforme

Tabela 1. As proporções das pastas foram calculadas em massa, seguidas pela relação água/aglomerante (a/a). O procedimento de mistura dos materiais foi realizado em argamassadeira em velocidade lenta, e o adensamento dos corpos de prova produzidos efetuado em mesa vibratória com frequência de 40 hertz.

**Quadro 1.** Amostra dos materiais utilizados



Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

**Tabela 1.** Proporção das pastas produzidas

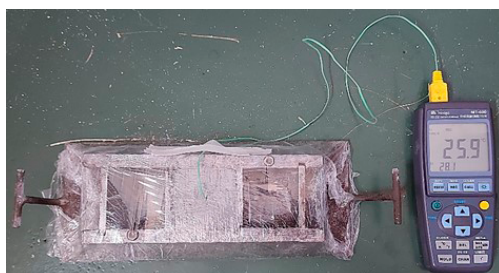
Pastas	MgO	Sílica ativa	Metacaulim	Relação água/aglomerante (a/a)
Si40_0,6	0,6	0,4	-	0,6
Si40_0,7	0,6	0,4	-	0,7
Si60_0,6	0,4	0,6	-	0,6
Si60_0,7	0,4	0,6	-	0,7
MK40_0,6	0,6	-	0,4	0,6
MK40_0,7	0,6	-	0,4	0,7
MK60_0,6	0,4	-	0,6	0,6
MK60_0,7	0,4	-	0,6	0,7

Fonte: Elaborada pelos autores, 2025.

O ensaio de temperatura por tempo foi baseado no estudo de Suryanto et al. (2018), em que foi utilizado um aparelho registrador de dados de ajuste automático para realização das medições, neste caso o termômetro Datalogger MT 600 (marca Minipa) com o auxílio do termopar, e a leitura dos dados realizada por meio do software Temp Monitor. Foi utilizado um único corpo de prova, de dimensões 50x50x50mm, por pasta produzida que prontamente foi envolvido em plástico filme e levado a uma sala climatizada com temperatura de 25°C +/- 5°C, local que recebeu o termopar centralizado no corpo de prova recém moldado, este fixado com auxílio de fita adesiva (Figura 1). Após a introdução do termopar teve início a gravação dos dados no Datalogger, programado a cada 1 minuto pelo período de 24 horas (perfazendo o total de 1440 minutos). Todo o processo, desde o início da mistura em argamassadeira, foi cronometrado até o princípio da gravação dos dados pelo software. Ao iniciar a

gravação foi anotado o tempo decorrido no cronômetro e considerado como ponto de origem o minuto seguinte

**Figura 1.** Exemplo de corpo de prova submetido ao ensaio de temperatura por tempo



Fonte: Autores, 2025.

Enquanto o ensaio de absorção de água por capilaridade foi baseado na norma EN 1015-18:2002 e realizado em seis corpos de prova por pasta produzida. As fôrmas dos corpos de prova produzidos foram envolvidas em plástico filme e seladas em sacos plásticos, e levadas para o início do processo de cura em câmara úmida. Após o período de 24 horas os corpos de prova foram retirados das fôrmas, e novamente envolvidos em plástico filme, identificados e dispostos em sacos plásticos, seguindo com seu processo de cura até a idade de 28 dias. Os corpos de prova moldados na fôrma de 40x40x160mm, ao final do processo de cura, foram levados a estufa à 45°C por 48 horas, para secagem. Logo após, foram cortados ao meio originando semiprismas (40x40x80mm) que tiveram suas laterais vedadas com cera de abelha em estado líquido (Figura 2).

**Figura 2.** Exemplo de corpos de prova cortados e revestidos lateralmente com cera de abelha



Fonte: Autores, 2025.

### 3 Resultados e discussões

#### 3.1 Fluorescência de raios X (FRX) e perda ao fogo

A porcentagem dos óxidos presente nos materiais utilizados e seus correspondentes valores de perda ao fogo (PF) são apresentados pela Tabela 2.

**Tabela 2.** Composição química (%) dos materiais

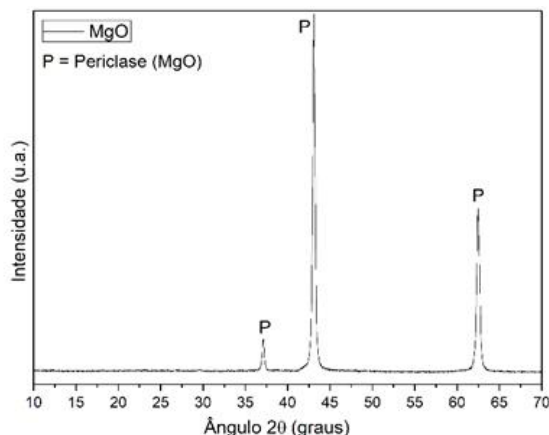
Óxidos	MgO	Metacaulim	Sílica ativa
Na <sub>2</sub> O	3,63	-	7,87
MgO	92,43	-	0,77
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,11	36,19	0,05
SiO <sub>2</sub>	1,02	55,51	83,83
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,28	-	0,18
SO <sub>3</sub>	0,57	0,39	0,82
Cl	0,32	-	0,94
K <sub>2</sub> O	0,03	2,84	2,16
CaO	0,84	-	0,41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	2,35	-
TiO <sub>2</sub>	-	1,37	-
Outros	-	0,17	-
PF	0,76	1,17	2,97

Fonte: Elaborada pelos autores, 2025.

No geral, a Tabela 2 apresenta que o MgO utilizado apresentou composição química e porcentagem de perda ao fogo semelhante aos empregados nos estudos obtidos da literatura (Shah; Scott, 2021a; Szczerba, 2013; Dolores, 2017). Entretanto, a porcentagem do composto MgO (92,43%) foi pouco menor quando comparada os estudos referidos, que normalmente possuem em torno de 95%. A porcentagem dos compostos presentes no metacaulim e a sílica ativa utilizados se encontram, em sua maioria, dentro dos parâmetros normativos para o emprego dos materiais com cimento Portland, a ABNT NBR 15894-1:2010 e ABNT NBR 13956-1:2012, respectivamente. A única exceção foi o composto SiO<sub>2</sub> da sílica ativa que apresentou percentual pouco abaixo do mínimo recomendado pela norma (85%), após o cálculo de perda ao fogo. Quanto aos padrões de PF de cada material, todos se encontram dentro dos parâmetros demonstrados nas normas citadas.

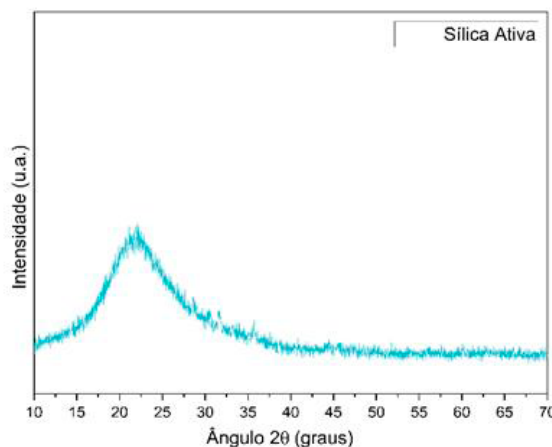
### 3.2 Difração de raios X (DRX)

Os resultados do ensaio de DRX para cada material é apresentado nas Figuras 3, 4 e 5.

**Figura 3.** Difração de raio-x do MgO

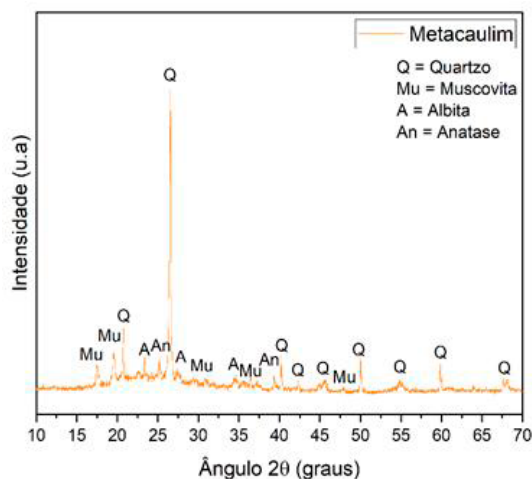
Fonte: Autores, 2025.

A Figura 3 apresenta que o DRX do MgO apresentou picos bem definidos, que foram identificados como periclase MgO (87.652), em  $2\theta = 36^\circ$  a  $70^\circ$ . O composto MgO identificado no difratograma se relaciona com o resultado da análise de FRX realizada para o material, que apresentou elevada composição de óxido MgO (92,43%), sendo os outros 7,5% relacionado a demais óxidos presentes em menores quantidades.

**Figura 4.** Difração de raio-x da sílica ativa

Fonte: Autores, 2025.

A análise DRX da sílica ativa, Figura 4, apresentou difratograma de um material completamente amorfo, ou seja, que não apresenta fases cristalinas. Os materiais amorfos possuem formato estrutural caracterizado por arranjos atômicos sem uma ordenação espacial de longa distância. Esses materiais possuem maior reatividade quando comparado aos cristalinos. As estruturas cristalinas apresentam regularidade geométrica, ou seja, possuem uma ordenação espacial de seus átomos, moléculas e íons, que se repetem a uma longa distância.

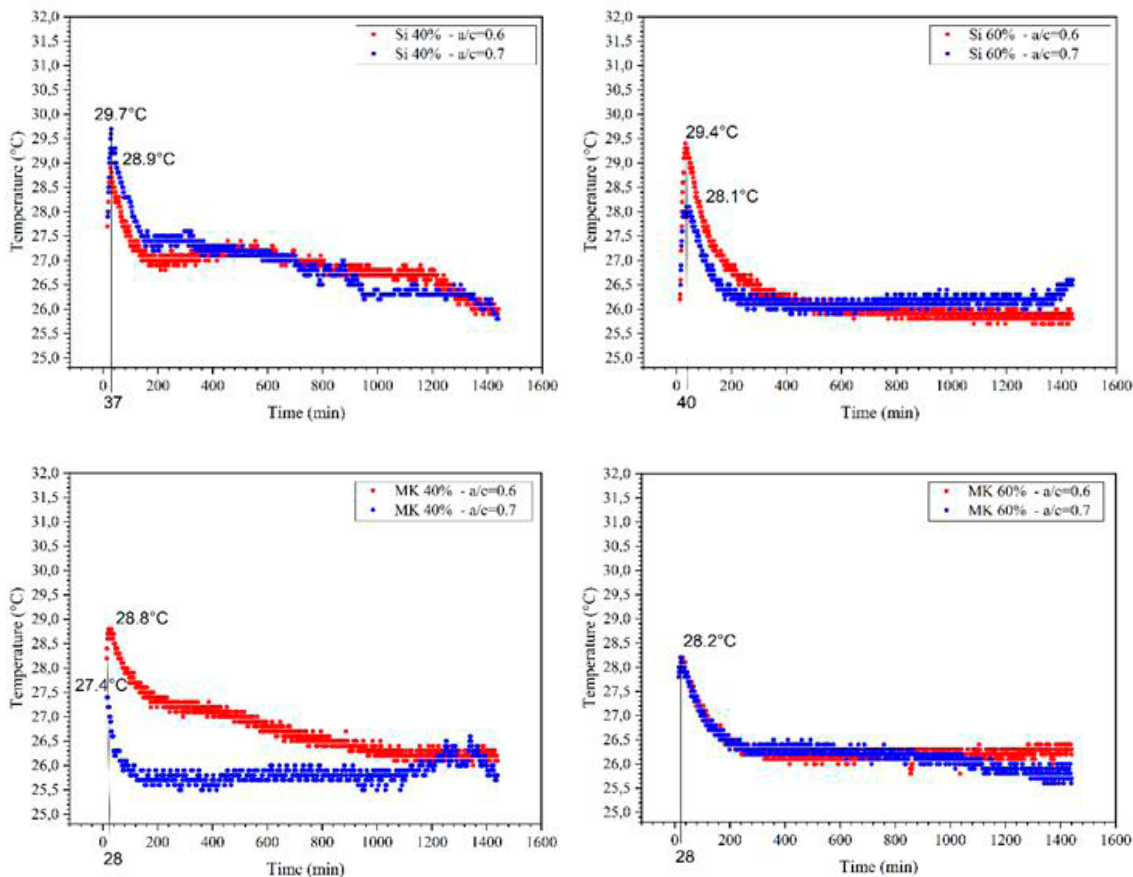
**Figura 5.** Difração de raio-x do metacaulim

**Fonte:** Autores, 2025.

Pela análise da Figura 5 o DRX para o metacaulim demonstrou a presença de algumas fases cristalinas em  $2\theta = 10^{\circ}$ – $70^{\circ}$ , sendo elas o quartzo –  $\text{SiO}_2$  (33.1161), a muscovita ( $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ ) – (21.993), albita ( $\text{NaAl-Si}_3\text{O}_8$ ) – (20.554) e caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) – (291488). Pelo difratograma do material foi possível observar que o metacaulim apresenta um halo entre  $2\theta = 17^{\circ}$ – $32^{\circ}$ , característico da reatividade do material. Desta forma, pode-se dizer que o material possui certa reatividade, sendo menor que a apresentada pela sílica ativa.

### 3.3 Temperatura por tempo

O ensaio de temperatura por tempo realizado nas oito proporções de pastas pode ser visualizado no Quadro 3.

**Quadro 3.** Ensaio de temperatura por tempo nas pastas produzidas

Fonte: Elaborado pelos autores, 2025.

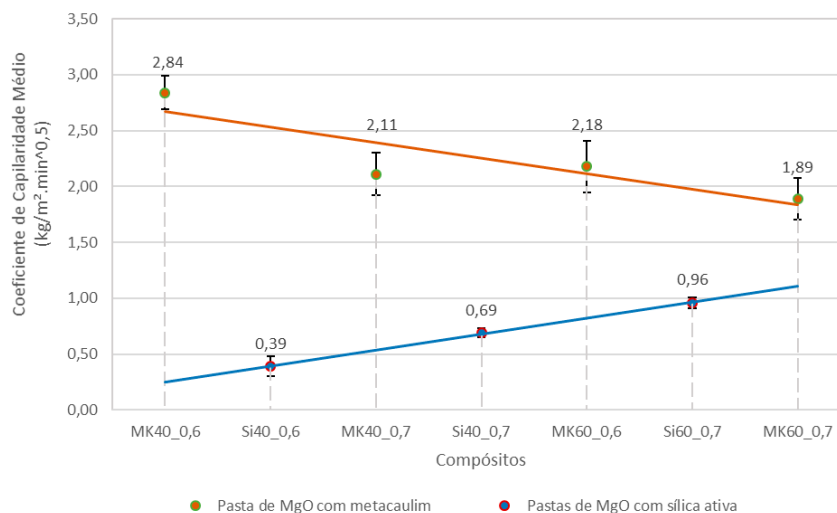
Os dados do Quadro 3 mostraram a temperatura no interior das pastas caracterizando os processos químicos com liberação de calor. Para todas as pastas há um pico de temperatura dentro da primeira hora de hidratação, em torno dos 40 minutos para as pastas de sílica ativa e aos 28 minutos para as pastas de metacaulim, com temperaturas que variaram de 27,4°C a 29,7°C. Shah e Scott (2021b) registraram por meio do ensaio de calorimetria isotérmica picos iniciais nas pastas formuladas com MgO e sílica ativa e de MgO e metacaulim, os autores atribuíram esses picos iniciais de liberação de calor a dissolução do MgO na solução.

Em comparação as pastas formuladas com os dois materiais, ficou constatado que o calor liberado pelas pastas contendo sílica ativa é ligeiramente maior (média de 29°C), do que as pastas com metacaulim (média de 28°C). Este fato pode estar relacionado à menor reatividade do metacaulim abordada anteriormente, que levou a geração de menor quantidade de produtos de hidratação. Podendo auferir que a mistura dos componentes foi capaz de reagir quimicamente, registrando liberação de calor antes da primeira hora do ensaio, que se relaciona às relatadas na literatura, ligadas diretamente à dissolução do MgO e início da formação dos produtos de hidratação das misturas.

### 3.4 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado em todas as proporções de pastas definidas, exceto na proporção Si60\_0,6 que não possibilitou ser moldada nas fôrmas (pouca plasticidade), totalizando assim sete amostras. A Figura 6 apresenta os resultados dos coeficientes de capilaridade.

**Figura 6.** Coeficiente de capilaridade médio das pastas produzidas



Fonte: Autores, 2025.

Pela Figura 6 é possível notar que as pastas produzidas com sílica ativa absorvem menor quantidade de água do que as pastas produzidas com metacaulim. Para as pastas com sílica ativa o coeficiente de capilaridade é maior para as misturas de maior relação a/a, ou seja 0,7. A inserção de maior quantidade de material também pareceu influenciar o aumento deste valor, fazendo com que a absorção de água por capilaridade fosse maior. Desta forma, a pasta com menor relação a/a e menor porcentagem de sílica ativa na mistura foi a que menos absorveu água. Esse comportamento pode ter ocorrido devido justamente a melhor reação química entre os componentes, e conseqüentemente maior formação de produtos de hidratação, gerando também menor porosidade.

Por outro lado, nas pastas produzidas com metacaulim foi observado um comportamento oposto, pois as pastas com maiores relações a/a (0,7) mostraram absorver menor quantidade de água. Da mesma forma, as pastas com menores quantidades de metacaulim em sua composição também mostraram absorver maior quantidade de água. Esses resultados indicam que neste ensaio o perfil característico de comportamento do metacaulim é oposto ao da sílica ativa. Corroborando com o exposto por Rodrigues (2014), que estudou os efeitos da incorporação de metacaulim nas formulações de cimento Portland, e obteve que a adição da argila acaba por aumentar a absorção capilar.

Desta forma, o arquétipo da porosidade observado para as pastas produzidas com sílica ativa está de acordo com o padrão observado nas pastas de cimento Portland, e que se relaciona ao exposto por Yedra et al. (2022), que mencionaram que uma das propriedades características dos materiais porosos é a capacidade de transportar umidade na fase líquida ou gasosa, sendo que o principal fenômeno responsável pelo transporte da água em estado líquido através das argamassas de alvenaria é a ascensão capilar. Porém, conforme demais estudos analisados, um comportamento distinto é observado nas pastas de metacaulim e deve ser analisado mais profundamente, e conseqüentemente em conjunto a outros ensaios em relação do material com a água, para que se possa compreender melhor o comportamento do material frente a este agente.

## 4 Conclusões

A conclusão discorreu sobre os principais pontos de análises obtidos com a execução do programa experimental de ensaios.

Com o estudo da temperatura interna das pastas foi possível confirmar reações químicas com liberação de calor nas primeiras horas de mistura das pastas. As pastas com sílica ativa demonstraram liberar mais calor quando comparadas as pastas com metacaulim, esse fato relacionado aos estudos de caracterização dos materiais que demonstraram que a sílica ativa utilizada é mais reativa que o metacaulim.

Quanto a absorção por capilaridade, as pastas produzidas com metacaulim tiveram comportamento do material à água distinto do apresentado pela sílica ativa, possuindo um perfil mais absorvente. Assim investigações mais aprofundadas a respeito do comportamento do material frente a água são necessários para uma melhor compreensão do assunto.

Por fim, foi possível concluir que a combinação de MgO com metacaulim, como material fonte de SiO<sub>2</sub> é capaz de produzir aglomerantes com a formação de produtos de hidratação semelhantes ao sistema MgO e sílica ativa, sendo estes responsáveis por atribuir resistência a compressão as pastas. Porém, há a formação de outros produtos de hidratação em conjunto com os já observados no sistema de referência. Destacando que para o aprimoramento do sistema são necessários estudos mais aprofundados, visando melhorias nos pontos levantados.

## Bibliografia

ABDEL-GAWWAD, H. A.; HASSAN, H. S.; VÁSQUEZ-GARCIA, S. R.; et al. Towards a clean environment: The potential application of ecofriendly magnesia-silicate cement in CO<sub>2</sub> sequestration. *Journal of Cleaner Production*, v. 252, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119875>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR NM 18:2012: Cimento Portland - Análise química - Determinação de perda ao fogo*. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 15894-1: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos*. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 13956-1: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos*. Rio de Janeiro, 2012.

CAPELO, A. R. S. M. *Cimento à base de óxido de magnésio e cinza da casca de arroz*. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais) Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga – SP, 2021.

CELIK, K.; JACKSON, M D.; MANCIO, M.; et al. High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for portland cement in self-compacting and sustainable concrete, *Cement Concrete Composites*. 45 (2014) 136–147.

CELIK, K.; HAY, R.; HARGIS, C. W.; et al. Moon, Effect of volcanic ash pozzolan or limestone replacement on hydration of Portland cement, *Construction and Building Materials*. 197 (2019) 803–812.

DHAKAL, M.; SCOTT, A. N.; SHAH, V.; et al. Development of a MgO-metakaolin binder system. *Construction and Building Materials*, v. 284, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122736>.

DOLORES, G. M. *Low-alkalinity matrix composites based on magnesium oxide cement reinforced with cellulose fibres*. Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Materiais) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2017.

EUROPEAN STANDARD. *EN 1015-18: Methods of test for mortar for masonry: part 18: determination of water- absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*. Brussels: European Committee for Standardization (CEN), 2002.

HAY, R.; DUNG, N. T.; UNLER, C.; et al. Mechanical and microstructural changes in reactive magnesium oxide cement-based concrete mixes subjected to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, v. 118, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103955>.

HAY, R; CELIK, K. Hydration, carbonation, strength development and corrosion resistance of reactive MgO cement-based composites. *Cement and Concrete Research*, v. 128, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105941>.

- KUMAR, S.; SONAT, C.; YANG, E.; et al. Performance of reactive magnesia cement formulations containing fly ash and ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, v. 232, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117275>.
- LISKA, M.; AL-TABBAA, A.; CARTER, K.; et al. Scaled-up commercial production of reactive magnesium cement pressed masonry units. Part I: Production. *Construction Materials*, ICE Publishing, v. 165, 2012.
- MOUMIN, G.; RYSSEL, M.; ZHAO, L.; et al. CO<sub>2</sub> emission reduction in the cement industry by using a solar calciner. *Renewable Energy*, v. 145, p. 1578-1596, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.045>.
- RASHAD, A. M. Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview. *Construction and Building Materials*, Amsterdam, v. 42, p. 303-318, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001>.
- RODRIGUES, D. A. E. *Efeitos da adição de metacaulim na absorção capilar e profundidade de carbonatação de concretos*. Dissertação (mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.
- RUAN, S; UNLUER, C. Influence of supplementary cementitious materials on the performance and environmental impacts of reactive magnesia cement concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 159, p. 62-73, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.044>.
- SHAH, V; SCOTT, A. Hydration and microstructural characteristics of MgO in the presence of metakaolin and silica fume. *Cement and Concrete Composites*, v. 121, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104068>. (2021a).
- SHAH, V; SCOTT, A. Use of kaolinite clays in development of a low carbon MgO-clay binder system. *Cement and Concrete Research*, v. 144, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106422>. (2021b).
- SONAT, C; DUNG, N. T; UNLUER, C. Performance and microstructural development of MgO–SiO<sub>2</sub> binders under different curing conditions. *Construction and Building Materials*, v. 154, p. 945-955, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.020>.
- SONAT, C; UNLUER, C. Investigation of the performance and thermal decomposition of MgO and MgO-SiO<sub>2</sub> formulations. *Thermochimica Acta*, v. 655, p. 251-261, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.07.009>.
- SONAT, C; UNLUER, C. Development of magnesium-silicate-hydrate (M-S-H) cement with rice husk ash. *Journal of Cleaner Production*, v. 211, p. 787-803, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.246>.
- SURYANTO, B.; BUCKMAN, J. O.; MCCARTER, W. J.; et al. In-situ dynamic WetSEM imaging and electrical impedance measurements on Portland cement during early hydration, *Materials Characterization*, v. 142, p. 86-100, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.05.028>.
- SZCZERBA, J. Influence of time and temperature on ageing and phases synthesis in the MgO–SiO<sub>2</sub>–H<sub>2</sub>O system. *Thermochimica Acta*, v. 567, p. 57-64, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.05.028>.

tca.2013.01.018.

TRAN, H. M; SCOTT, A. Strength and workability of magnesium silicate hydrate binder systems. *Construction and Building Materials*, v. 131, p. 526-535, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.109>.

UNLUER, C; AL-TABBAA, A. Enhancing the carbonation of MgO cement porous blocks through improved curing conditions, *Cement and Concret Research*, v. 59, p. 55–65, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.02.005>.

UNLUER, C; AL-TABBAA, A. Impact of hydrated magnesium carbonate additives on the carbonation of reactive MgO cements, *Cement and Concret Research*, v. 54, p. 87–97, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.08.009>.

UNLUER, C; AL-TABBAA, A. The role of brucite, ground granulated blastfurnace slag, and magnesium silicates in the carbonation and performance of MgO cements. *Construction and Building Materials*, v. 94, p. 629-643, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.105>.

WALLING, S. A; PROVIS, J. L. Magnesia-Based Cements: A journey of 150 years, and cements for the future? *Chemical Reviews*, v. 116, p. 4170–4204, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.5b00463>.

YEDRA, E.; FERRÁNDEZ, D.; MORÓN, C.; et al. New test methods to determine water absorption by capillarity. Experimental study in masonry mortars. *Construction and Building Materials*, v. 319, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125988>.

ZHANG, T; CHEESEMAN, C. R; VANDEPERRE, L. J. Development of low pH cement systems forming magnesium silicate hydrate (M-S-H). *Cement and Concrete Research*, v. 41, p. 439–442, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.016>.