

RESSALVA

Atendendo a solicitação do autor, o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 21/04/2024.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

MARIA PAULA HÊNGLING CHRISTÓFANI MORAES

**AGLOMERANTE ALTERNATIVO AO CIMENTO PORTLAND PRODUZIDO COM
ÓXIDO DE MAGNÉSIO E METACAUIM**

Ilha Solteira
2023

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MARIA PAULA HÊNGLING CHRISTÓFANI MORAES

**AGLOMERANTE ALTERNATIVO AO CIMENTO PORTLAND
PRODUZIDO COM ÓXIDO DE MAGNÉSIO E METACAULIM**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Unesp como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre. Especialidade: Engenharia de construção civil.

Prof. Dr. Cesar Fabiano Fioriti
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M828a Moraes, Maria Paula Hêngling Christófani.
Agglomerante alternativo ao cimento portland produzido com óxido de magnésio e metacaulim / Maria Paula Hêngling Christófani Moraes. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2023
99 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Engenharia de Construção Civil, 2023

Orientador: César Fabiano Fioriti

Inclui bibliografia

1. Óxido de magnésio. 2. Metacaulim. 3. Aglomerante alternativo. 4. Cimento magnésiano. 5. Sustentabilidade.


Amanda Sertori dos Santos

Bibliotecária - CRB/8-9061
Seção Técnica de Referência, Atendimento ao
Usuário e Documentação
Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

Impacto potencial desta pesquisa

Esta pesquisa visa contribuir com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil (ODSs), relacionada ao objetivo nº12 [Consumo e Produção Responsáveis], em que pesa o uso eficiente dos recursos naturais; a redução da geração de resíduos; e o desenvolvimento de capacidades científicas e tecnológicas na mudança para padrões mais sustentáveis.

Potential impact of this research

This research aims to contribute to the Sustainable Development Goals in Brazil (SDGs), related to objective nº12 [Responsible Consumption and Production], which includes the efficient use of natural resources; reducing waste generation; and the development of scientific and technological capabilities in moving towards more sustainable standards.

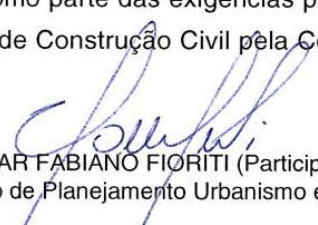
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

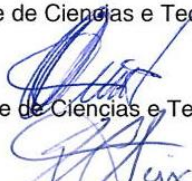
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: AGLOMERANTE ALTERNATIVO AO CIMENTO PORTLAND PRODUZIDO COM ÓXIDO DE MAGNÉSIO E METACAULIM

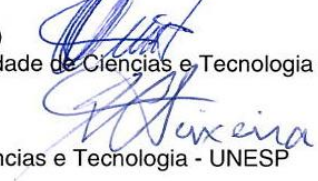
AUTORA: MARIA PAULA HÊNGLING CHRISTÓFANI MORAES

ORIENTADOR: CÉSAR FABIANO FIORITI

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Civil, área: Engenharia de Construção Civil pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. CÉSAR FABIANO FIORITI (Participação Virtual)
Departamento de Planejamento Urbanismo e Ambiente / Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP


Prof. Dr. FERNANDO SÉRGIO OKIMOTO (Participação Virtual)
Departamento de Planejamento, Urbanismo e Ambiente / Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP


Prof. Dr. SILVIO RAINHO TEIXEIRA (Participação Virtual)
Departamento de Física, Química e Biologia / Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP

Ilha Solteira, 11 de outubro de 2023

Ao Rei eterno, o Deus único, imortal e invisível,
sejam honra e glória para todo o sempre. Amém!

1 Timóteo 1:17

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me capacitar em todo o processo de realização deste trabalho e em toda a minha trajetória até este momento.

Agradeço minha família, esposo Matheus por toda dedicação, paciência, auxílio em diversas questões e por ser meu suporte para a realização deste trabalho. Aos meus pais e irmão que sempre estiveram ao meu lado, me apoiando e me permitindo viver meus sonhos.

Ao meu professor e orientador Cesar Fioriti, por me acompanhar desde a graduação, me instruir não só na realização do trabalho, mas em todas as questões que me cercaram ao longo desses anos. Obrigada pela paciência, pelo ensino passado a mim, pela preocupação e amor que sempre demonstrou com seus alunos e amigos.

As minhas companheiras de laboratório e amigas Letícia Pagoto e Denise Chotolli, sem as quais não haveria realizado e enfrentando os desafios desta pós-graduação. Obrigada pela ajuda física, mental e pela amizade e companheirismo que construímos. Assim como elas, agradeço aos amigos que tive a oportunidade de conhecer e conviver nesse período, que também estiveram ao meu lado e me auxiliaram sempre que puderam.

Agradeço aos professores parte de nossa equipe, Jorge Akasaki e Alex Sanches pela orientação e conselhos que permitiram o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos técnicos dos laboratórios que estiveram ao nosso lado nos ajudando e permitindo a realização deste trabalho, além disso, me acolhendo com todo amor abrindo as portas para mim dentro da universidade, obrigada Flávio, Gilson, Osías, Natália e todos os outros que estiveram ao meu lado.

Por fim, agradeço também a todos meus amigos, pastores, irmãos que estiveram em oração por mim ao longo deste processo, me fortalecendo em espírito e encorajando em palavras, sem vocês nada disso seria possível.

RESUMO

O cimento Portland se destaca como um dos materiais mais consumidos atualmente em todo o mundo. Entretanto todo o seu processo de produção exige um grande emprego de recursos naturais, alto consumo de energia, além de ser uma das principais fontes de emissão dos chamados gases de efeito estufa. Desta forma, formulações alternativas ao aglomerante vem sendo estudadas, dentre eles, destaca-se o cimento magnesiano que dentre diversas formulações, pode ser produzido pela junção do óxido de magnésio (MgO) e um material silicioso, ou seja, rico em dióxido de silício (SiO_2 – também chamado de sílica), resultando em um ligante com características semelhantes ao cimento Portland e que apresenta diversos aspectos sustentáveis. Diante do exposto, este trabalho visou estudar o comportamento de um aglomerante alternativo composto por MgO e metacaulim, como fonte de SiO_2 para o sistema, e compará-lo a um sistema referencial mais estudado composto por MgO e sílica ativa (fonte de SiO_2 mais empregada). Para isso foram confeccionadas e analisadas pastas com duas proporções distintas dos constituintes (40/60 e 60/40 – em massa) e com duas diferentes relações água/aglomerante (a/a) (0,6 e 0,7). O programa experimental contou com ensaios de fluorescência de raio-x (FRX); difração de raio-x (DRX); espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR); microscopia eletrônica de varredura (MEV); termogravimetria (TG); resistência à compressão; temperatura por tempo e absorção de água por capilaridade. Os resultados obtidos permitiram compreender que a combinação de MgO com metacaulim, produz produtos de hidratação capazes de fornecer resistência a compressão as pastas, assim como ocorre com o sistema MgO e sílica ativa, e ainda devido a presença de alumina na composição química do metacaulim, a formação de outro produto de hidratação, chamado hidrotalcita, foi confirmada. A resistência a compressão atingida com as pastas de metacaulim foi inferior ao do sistema de referência com sílica ativa, e assim estudos futuros devem ser conduzidos visando o aprimoramento do sistema.

Palavras-chave: óxido de magnésio; metacaulim; aglomerante alternativo; cimento magnesiano; sustentabilidade.

ABSTRACT

Portland cement stands out as one of the most consumed material worldwide today. However, its entire production process requires a large use of natural resources, high energy consumption, besides to be one of the main sources of emission of greenhouse gases. In this way, alternative formulations to the binder have been studied, among them, magnesium cement stands out, which, among several formulations, can be produced by the combination of magnesium oxide (MgO) and a siliceous material (a material rich in silicon dioxide - SiO_2 – also called silica), resulting in a binder with characteristics similar to PC and which presents several sustainable aspects. Given the above, this work aimed to study the behavior of an alternative binder composed of MgO and metakaolin, as a source of SiO_2 for the system, and compare it to a more studied reference system composed of MgO and silica fume (a most used source of SiO_2). For this purpose, pastes with two different proportions of the constituents (40/60 and 60/40 – by mass) and with two different water/binder ratios (0.6 and 0.7) were prepared and are being analyzed. The experimental program included x-ray fluorescence (FRX); x-ray diffraction (XRD); Fourier transform infrared spectroscopy FTIR); scanning electron microscopy (SEM); thermogravimetry (TG); compressive strength; temperature by time and absorption by capillarity. The results obtained allowed us to understand that the combination of MgO with metakaolin produces hydration products capable of providing compressive strength to the pastes, as well as with the system MgO and silica fume, and also due to the presence of alumina in the chemical composition of metakaolin, the formation of another hydration product, called hydrotalcite, was confirmed. The compressive strength achieved with metakaolin pastes was lower than the reference system with silica fume, and thus, future studies should be conducted in order to improve the system.

Keywords: magnesium oxide; metakaolin; alternative binder; magnesian cement; sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Consumo de cimento no Brasil	21
Figura 2 - Liberação de CO ₂ durante a produção do Clínquer	22
Figura 3 - Caulim	34
Figura 4 - Fluxograma do Programa experimental	39
Figura 5 - Fluxograma de preparação das pastas	44
Figura 6 - Amostras das pastas em pó para ensaios microestruturais	47
Figura 7 - Detalhe da máquina universal de ensaios da EMIC – INSTRON	48
Figura 8 - Realização do ensaio de resistência à compressão em CP contendo sílica ativa	48
Figura 9 - Realização do ensaio de Temperatura por Tempo	49
Figura 10 - Difração de raio-x do MgO	55
Figura 11 - Difração de raio-x da sílica ativa	56
Figura 12 - Difração de raio-x do metacaulim	57
Figura 13 - Resistências à compressão média das pastas de sílica ativa	59
Figura 14 - Resistências à compressão média das pastas de metacaulim	62
Figura 15 - Coeficiente de capilaridade médio das pastas confeccionadas	84
Figura 16 - Reta gerada a partir do coeficiente de capilaridade médio das pastas.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Proporções das pastas	43
Tabela 2 - Ensaios a serem realizados nas pastas e suas variáveis	47
Tabela 3 - Composição química (%)	53
Tabela 4 - Resultados das pastas de sílica ativa	59
Tabela 5 - Resultados das pastas de metacaulim	62

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estudos do sistema $\text{MgO} + \text{SiO}_2$	30
Quadro 2 - Materiais utilizados no trabalho	38
Quadro 3 - Exemplo de preparação das pastas contendo metacaulim	44
Quadro 4 - Moldagem e cura dos CPs	46
Quadro 5 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	52
Quadro 6 - Comparação das pastas de sílica ativa e metacaulim	64
Quadro 7 - Ensaio de temperatura por tempo nas pastas confeccionadas	65
Quadro 8 - Comparação do DRX das pastas de sílica ativa e de metacaulim aos 28 dias	66
Quadro 9 - Difração de raio-x para pastas Si40_0,6 e MK40_0,6 em diferentes idades	69
Quadro 10 - Curvas de TG e DTG das pastas de sílica ativa com 28 dias	71
Quadro 11 - Curvas de TG e DTG das pastas de metacaulim com 28 dias	73
Quadro 12 - Curvas de TG e DTG das pastas Si40_0,6 e MK40_0,6 com diferentes idades	76
Quadro 13 - Ensaio de FTIR para os materiais anidros e todas as proporções de pastas com 28 dias.....	78
Quadro 14 - Ensaio de FTIR para a pasta Si40_0,6 e MK40_0,6 em diferentes idades	80
Quadro 15 - Ensaio de MEV dos materiais anidros e das pastas com 28 dias	82

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Considerações Gerais	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo geral.....	17
1.2.2	Objetivos específicos.....	17
1.3	Justificativa	17
1.4	Estrutura do trabalho	19
2	REVISÃO DA LITERATURA.....	21
2.1	Impactos ambientais gerados pela produção do cimento Portland	21
2.2	Cimento de óxido de magnésio	23
2.2.1	Óxido de magnésio	23
2.2.2	Processo de produção	24
2.2.3	Mecanismos e produto de hidratação	25
2.2.4	Aglomerantes à base de MgO	26
2.3	Sistema de ligação MgO + SiO₂	27
2.3.1	Materiais fonte de SiO ₂	28
2.4	Aglomerante de MgO e metacaulim	32
2.4.1	Contexto geral	33
2.4.2	O Caulim.....	33
2.4.3	Metacaulim	35
2.4.4	Produto de hidratação.....	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	38
3.1	Materiais	38
3.2	Metodologia empregada.....	39
3.2.1	Caracterização dos materiais	39
3.2.2	Pré-teste para definição das pastas	41
3.2.3	Confecção das pastas	43
3.2.4	Ensaio do programa experimental nas pastas	47
4	RESULTADOS	53
4.1	Caracterização dos materiais	53
4.1.1	Fluorescência de raios X (FRX)	53
4.1.2	Difração de raios X (DRX)	55

4.1.3	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) ..	58
4.1.4	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	58
4.2	Ensaio nas pastas.....	58
4.2.1	Resistência à compressão.....	58
4.2.2	Temperatura por tempo	64
4.2.3	Difração de raios X (DRX)	66
4.2.4	Termogravimetria (TG)	70
4.2.5	Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) ..	77
4.2.6	Microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	81
4.2.7	Absorção de água por capilaridade	84
5	CONCLUSÃO.....	87
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	89
	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

O cimento Portland se destaca como um dos materiais mais consumidos atualmente em todo o mundo. No ano de 2022, apenas no Brasil foram vendidas cerca de 63,1 milhões de toneladas do material, e estima-se um aumento no número de vendas para o ano seguinte (ABCP, 2023). O cimento é muito utilizado no setor da construção civil, sendo empregado para diversas aplicações e finalidades, caracterizando-o assim como um produto versátil.

Entretanto, a produção do material causa diversos impactos ao ambiente, que são evidenciados principalmente pelo seu alto consumo. Entre os diversos pontos normalmente relatados, os principais efeitos da produção do cimento se relacionam com um grande consumo de energia, necessário para atender a demanda de altas temperaturas requeridas no processo de calcinação do clínquer (matéria prima do cimento), além de ser considerado um dos principais responsáveis pelas emissões dos denominados gases de efeito estufa, contribuindo com cerca de 4% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) (ANDREW, 2018; HAY; CELIK, 2020; OLIVIER, 2022; SCRIVENER, 2014; WALLING; PROVIS, 2016).

Uma maneira de minimizar tais impactos ambientais, é com a busca por materiais aglomerantes alternativos, assunto que vêm sendo amplamente estudado (DHAKAL, *et al.* 2021; DOLORES, 2017; SHAH; SCOTT, 2021a; SHAH; SCOTT, 2021b; SONAT; DUNG; UNLUER, 2017; SONAT; UNLUER, 2017; TRAN; SCOTT, 2017; WALLING; PROVIS, 2016). Dentre as buscas por estes novos materiais, os cimentos a base de óxido de magnésio (MgO) tem se apresentado como uma alternativa promissora, devido suas diversas características sustentáveis, a se dizer: a possibilidade de calcinação dos materiais utilizados na composição à temperaturas mais baixas do que as utilizadas no processo de produção do cimento Portland; o emprego de resíduos industriais e de pozolanas naturais como componentes do sistema; e pela habilidade apresentada principalmente por algumas formulações, em capturar CO₂ da atmosfera ao longo de sua vida útil, pelo processo de carbonatação, tema bastante abordado por recentes estudos (HAY; CELIK, 2020; SHAH; SCOTT, 2021b; SONAT; UNLUER, 2017; WALLING; PROVIS, 2016).

Além das características sustentáveis dos cimentos de MgO citadas acima, os ligantes ainda alcançam os critérios da engenharia que são necessários para que um material possa ser aplicado na indústria da construção, sendo ele a capacidade de

atingir as propriedades mecânicas (HAY, *et al.* 2021). Os autores que estudaram o sistema de ligação composto por MgO e SiO₂, relataram resistências superiores a 10 MPa, e em alguns casos próximas que 40 MPa (SHAH; SCOTT, 2021; SONAT; DUNG; UNLUER, 2017; SONAT; UNLUER, 2017; TRAN; SCOTT, 2017; UNLUER; AL-TABBAA, 2015).

O cimento magnesiano pode ser produzido pela sua combinação com carbonatos ou oxissais e também pela reação entre o MgO e fosfatos ácidos pela via de cimentos ácido-base (WALLING; PROVIS, 2016). Além disso, diversos estudos têm demonstrado a eficiência no sistema de ligação entre o MgO e materiais siliciosos, ou seja, ricos em dióxido de silício (SiO₂), como as diversas cinzas já empregadas atualmente em forma de adições no cimento e como os Materiais Cimentícios Suplementares (SCMs) já existentes, como é o caso da sílica ativa e as argilas cauliniticas como o caulim e o metacaulim, uma vez que essa junção é capaz de produzir ligantes que atuam de forma semelhante ao cimento Portland (SHAH; SCOTT, 2021a; SHAH; SCOTT, 2021b; DHAKAL, *et al.*, 2021).

O metacaulim é um material que possui cerca de 50% de SiO₂ em sua composição, o que torna propício a sua utilização no sistema. Por ser uma argila natural, possui ampla disponibilidade na natureza, baixo custo, facilidade de produção em escala industrial e se apresenta como um material com menor impacto ambiental, uma vez que seu processo de calcinação também se dá a temperaturas inferiores (600°C à 800°C) ao do cimento Portland (SCRIVENER, 2014). Além disso, a utilização do metacaulim contribui também com o aumento das possibilidades de confecção dos cimentos a base de MgO, uma vez que se apresenta como outro material alternativo a ser utilizado nas formulações do cimento (SHAH; SCOTT, 2021a; SHAH; SCOTT, 2021b; SONAT; DUNG; UNLUER, 2017; SONAT; UNLUER, 2017; TRAN; SCOTT, 2017; UNLUER; AL-TABBAA, 2015). Desta forma, o metacaulim é visto como uma fonte alternativa de SiO₂ ao sistema, contribuindo para a produção do aglomerante.

1.2 Objetivos

Para melhor compreensão, os objetivos deste trabalho foram divididos em objetivo geral e específicos.

1.2.1 Objetivo geral

Estudar o comportamento de um aglomerante alternativo ao cimento Portland composto por óxido de magnésio (MgO) e metacaulim e compará-lo a um aglomerante mais consolidado composto por MgO e sílica ativa.

1.2.2 Objetivos específicos

Por objetivos específicos teve-se:

- Realização de levantamento bibliográfico a respeito dos aglomerantes alternativos produzidos com óxido de magnésio e suas generalidades;
- Execução da caracterização física e química dos materiais: óxido de magnésio; sílica ativa e metacaulim; com ensaios de fluorescência de raio-x (FRX) e difração de raio-x (DRX); além de ensaios de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) para os materiais metacaulim e sílica ativa, os quais foram utilizados para comparação com os mesmos ensaios realizados nas pastas formuladas com esses materiais.
- Realização de pré-testes laboratoriais para definição de proporções a serem utilizadas para confecção das pastas; relação água/aglomerante (a/a); tempo de mistura; moldagem e cura dos corpos de prova (CPs);
- Confecção das pastas com as proporções e relações a/a definidas (40/60 e 60/40 em massa; e a/a = 0,6 e 0,7), tanto para o sistema contendo metacaulim, quanto para o sistema referencial contendo sílica ativa;
- Execução do programa experimental estabelecido que contou com ensaios de resistência à compressão; temperatura por tempo; difração de raio-x (DRX); termogravimetria (TG); espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR); microscopia eletrônica de varredura (MEV) e absorção de água por capilaridade, realizados nas pastas produzidas.

1.3 Justificativa

A escolha do tema justifica-se principalmente por sua importância do ponto de vista sustentável e ambiental. A necessidade de se encontrar produtos cimentícios que mantenham as características e vantagens proporcionadas pelo cimento Portland, porém, que se apresentem como ambientalmente amigáveis com uma melhor pegada ambiental, é de vital importância, uma vez que a produção e utilização do material se

sobressai em questões relacionadas a utilização de recursos naturais, como as matérias primas utilizadas em sua confecção, elevado gasto de energia, necessária para o processo de produção do material e pela elevada liberação do CO₂ um dos gases causadores do efeito estufa (CAPELO, 2019; MOUMIN *et al.*, 2020; UNLUER; AL-TABBAA, 2015).

Desta forma, 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 MgO. (CELIK, K. *et al.*, 2014; HAY; CELIK, 2020; CELIK, K. *et al.*, 2019; KUMAR *et al.*, 2020; MOUMIN *et al.*, 2020). O cimento de MgO, também conhecido como cimento magnesiano, é um material atraente devido as características aglutinantes que apresenta; seu perfil mais sustentável; e também pelas diversas possíveis aplicações demonstradas para o sistema.

Primeiramente o material tem sido estudado como um possível substituído do cimento Portland devido as características mecânicas atingidas, como as altas resistências a compressão alcançadas e relatadas em diversos estudos analisados (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 comum, o que impulsionam ainda mais o seu uso.

Porém, o fator que mais tem chamado atenção nos estudos deste novo aglomerante, é que os cimentos à base de MgO tem apresentado um perfil mais sustentável do que o cimento Portland em relação ao seu processo de produção. De acordo com Hay *et al.*, (2021); Liska *et al.*, (2012) e Unluer e Al-Tabbaa (2013), as temperaturas para produção do denominado MgO reativo são mais baixas que a de produção do clínquer do cimento Portland, ficando em torno de 700°C – 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; PROVIS, 2016). Outro ponto destacado entre as formulações de cimentos a base de MgO é a possibilidade de destinação de vários materiais e resíduos, que são utilizados como compostos no sistema, conferindo a ele 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, diversos estudos

recentes têm demonstrado a capacidade do material em absorver e armazenar CO₂ 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).

Além das características mais sustentáveis apresentadas pelos cimentos produzidos a base de MgO, diversos estudos têm demonstrado maiores vantagens relacionados ao seu emprego para determinadas finalidades, do que do sistema comum de cimento Portland. Dolores (2017) relatou que o uso de 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, muitos pesquisadores relatam vantagens no emprego dos ligantes a base de MgO para confecção de materiais refratários, uma vez que o mesmo suporta altas temperaturas, além de outros estudos demonstrarem os 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, T; CHEESEMAN, C. R; VANDEPERRE, L. J., 2011).

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

1.4 Estrutura do trabalho

Para melhor compreensão do estudo proposto, este trabalho foi elaborado em 5 capítulos.

O capítulo 1 foi composto pela introdução ao assunto abordado, bem como pela apresentação dos objetivos, justificativa do tema escolhido e apresentação da estrutura do texto.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica acerca do tema, abordando a problemática que influenciou o desenvolvimento desse estudo; os benefícios que se busca apostando em um aglomerante alternativo e um relato dos materiais a serem

utilizados, abordando seus processos de obtenção e produção, bem como seus mecanismos químicos de hidratação e produtos formados.

O capítulo 3 apresenta os materiais e a metodologia empregada tanto nos procedimentos de caracterização física e química, quanto nos ensaios das pastas propostos pelo programa experimental.

O capítulo 4 abordou os resultados obtidos tanto na fase de caracterização física e química dos materiais quanto os resultados obtidos para as amostras das pastas produzidas.

Por fim, o capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho, com ideias para continuação e abordagem de trabalhos futuros.

5 CONCLUSÃO

A conclusão será disposta abordando os principais pontos de análises obtidos com a execução de cada ensaio.

O ensaio de resistência a compressão demonstrou que as pastas formuladas com ambos os materiais são capazes de atingir certa resistência e que esta é maior com o passar dos dias, devido a formação contínua de produtos de hidratação que conferem esta característica ao sistema, confirmado posteriormente com os ensaios microestruturais. As proporções que obtiveram os melhores resultados no ensaio foram confeccionadas com 40% de material fonte de SiO_2 e 60% de MgO , e com uma relação $a/a = 0,6$. Exclusivamente para as pastas com metacaulim, uma queda na resistência foi observada de 7 para 28 dias para todas as proporções estudadas, nesse sentido acredita-se que a formação de hidrotalcita tida como um produto de hidratação volumoso, pode ter causado fissuras internas nas pastas, levando aos resultados obtidos. Por fim, as pastas de sílica ativa apresentaram maiores resistências a compressão do que as pastas de metacaulim, devido a maior reatividade da sílica ativa, somado a presença de quartzo nas pastas de metacaulim, o que cooperou com a menor formação de produtos de hidratação e assim com menores resistências a compressão.

Com o estudo da temperatura interna das pastas, pode-se confirmar a existência de reações químicas com liberação de calor nas primeiras horas de mistura das pastas. As mesmas já haviam sido relatadas por alguns autores e se relacionaram com os processos iniciais de dissolução e hidratação do MgO . As pastas com sílica ativa demonstraram liberar mais calor do que as com metacaulim, e esse fato se relacionou aos estudos de caracterização dos materiais que demonstraram que a sílica ativa utilizada é mais reativa do que o metacaulim.

No DRX das pastas foi confirmado que as proporções com 40% de material fonte de SiO_2 e relação $a/a = 0,6$ formaram maior quantidade de produtos de hidratação, o que contribuiu para aumento na resistência a compressão. Além disso, no estudo ao longo dos dias das proporções que obtiveram maiores resistências, observou-se a contínua formação de produtos de hidratação que conferem resistência a compressão as pastas, o que justifica o aumento na resistência com o passar dos dias e ressalta ainda a existência de acontecimentos de outras naturezas que devam

ter ocasionado a queda de resistência observada para as pastas de metacaulim de 7 para 28 dias.

O ensaio de TG também esteve de acordo com o observado nos ensaios anteriores e corroborou com as premissas. Nele foi possível constatar que com o passar dos dias a perda de massa total das pastas produzidas com ambos materiais aumenta, o que se relaciona com a contínua dissolução do MgO e formação de produtos de hidratação que conferem resistências ao sistema. Além disso, para as pastas de metacaulim houve a indicação da formação da hidrotalcita nas misturas.

Com o FTIR foi possível identificar a formação e a presença de brucita, M-S-H e de hidrotalcita, também confirmando as premissas obtidas anteriormente. O ensaio demonstrou que as pastas formuladas com maior porcentagem de materiais fonte de SiO₂ acabaram por apresentar maior quantidade desse composto químico não reagido na mistura, o que leva a entender que houve a necessidade de MgO para se completar as ligações e formar produtos de hidratação. O ensaio também confirmou que para as pastas de sílica ativa a reação química foi maior do que para as pastas de metacaulim, levando aos resultados de resistência a compressão obtidos.

Pelo ensaio de MEV se confirmou o especulado com o ensaio de resistência a compressão a respeito da formação de poros internos nas pastas contendo relação a/a = 0,7 o que colaborou para a queda na resistência destas. O ensaio mostrou que para ambos os materiais as proporções com maior quantidade de água formaram estruturas mais porosas, bem como foi possível observar também que os componentes das pastas de sílica ativa reagiram melhor entre si e formaram estruturas mais compactas do que as pastas de metacaulim, que demonstraram maior presença de materiais soltos o que confirma também os resultados de resistência a compressão obtidos.

Por fim, realizou-se o ensaio de absorção de água por capilaridade, que visou compreender a formação de poros no interior das pastas, bem como a relação dos materiais com a água. Com este ensaio pode-se compreender que as pastas produzidas com sílica ativa corroboram com os ensaios microestruturais e de resistência a compressão, uma vez que mostra uma relação direta entre o aumento do coeficiente de absorção de água com a redução dos valores de resistência a compressão. O mesmo, porém, não pôde ser afirmado para as pastas produzidas com metacaulim, que tiveram um comportamento oposto e mostraram uma redução no coeficiente de absorção de água conforme também reduziu os resultados de

resistência a compressão, compreendendo-se então, que o comportamento do material à água é 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.

Diante do exposto, é possível concluir que a combinação de MgO com metacaulim, como material fonte de SiO_2 , 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, juntamente com menores resultados de resistência a compressão. Desta forma, destaca-se que para aprimoramento do sistema, estudos mais aprofundados devem ser realizados visando melhorias nos pontos levantados.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como forma de continuar os estudos iniciados com este trabalho, bem como aprimorar e solucionar questões aqui levantadas, algumas ideias para estudos futuros são cogitadas, entre elas:

- Estudar novos procedimentos de cura para as pastas visando aumentar as resistências a compressão atingidas;
- Estudar novas proporções de mistura, tendo em vista que alterações significativas foram observadas com as variações aqui propostas;
- Incluir a utilização de superplastificantes para reduzir a relação a/a e buscar melhorias nas características finais das pastas;
- Fazer estudos de granulometria e avaliar sua influência sobre a reatividade e formação dos produtos de hidratação;
- Utilizando as mesmas proporções propostas, refazer procedimento de parada de hidratação para consolidação do mesmo;
- Investigar a formação de hidrotalcita nas pastas de metacaulim e compreender seus efeitos sobre as características finais das pastas;
- Analisar o comportamento de pastas formuladas com MgO e metacaulim frente a água;
- Realizar estudos de durabilidade nas pastas confeccionadas com os materiais.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Vendas de cimento crescem 11% em 2020**. São Paulo: ABCP, 2021. Disponível em: <https://abcp.org.br/vendas-de-cimento-crescem-11-em-2020/>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP. **Vendas de cimento fecham o ano com queda de 2,8%**. São Paulo: ABCP, 2023. Disponível em: <https://abcp.org.br/vendas-de-cimento-fecham-o-ano-com-queda-de-28/>

ABDEL-GAWWAD, H. A. *et al.* Towards a clean environment: The potential application of ecofriendly magnesia-silicate cement in CO₂ sequestration. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 252, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119875.

ABRÃO, P. C. R. A. **O uso de pozolana como materiais cimentícios suplementares**: disponibilidade, reatividade, demanda de água e indicadores ambientais. 2019. 144 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Engenharia de construção civil e urbana) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

ALI, M.B; SAIDUR, R; HOSSAIN, M.S. A review on emission analysis in cement industries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Oxford, v. 15, p. 2252-221, 2011. DOI: 10.1016/j.rser.2011.02.014.

AMARAL, L. F. *et al.* Temperature and common-ion effect on magnesium oxide (MgO) hydration. **Ceramics International**, Oxford, v. 36, p. 1047–1054, 2010. DOI: 10.1016/j.ceramint.2009.12.009

AMARAL, L. F. **Mecanismos de controle da hidratação da magnésia visando sua utilização em concretos refratários**. 2009. 163 f. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal de São Carlos, 2009.

ANDREW, R. M. Global CO₂ emissions from cement production. **Earth Syst. Sci. Data**, Goettingen, v. 10, p. 195–217, 2018. DOI: 10.5194/essd-10-195-2018

ARRUDA, C. C. **Processos de Hidroxilação do óxido de magnésio (MgO)**: sínter e magnésia cáustica. 2014. 81 f. Dissertação (Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais e Área de concentração em desenvolvimento, caracterização e aplicação de materiais) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7215** - Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

BERNARD, E. *et al.* Aluminum incorporation into magnesium silicate hydrate (M-S-H). **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 128, 2020. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105931

BERNARD, E. *et al.* Stability of hydrotalcite (Mg-Al layered double hydroxide) in presence of different anions. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 152, 2022. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106674

BIRCHAL, V. S. S. *et al.* A Simplified Mechanistic Analysis of the Hydration of Magnesia. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, Hoboken, v. 79, 2001.

BIRCHAL, V. S. S; ROCHA, S. D. F; CIMINELLI, V. S. T. The effect of magnesite calcination conditions on magnesia hydration. **Minerals Engineering**, [s. l.], v. 13, p. 1629-1633, 2000.

BORTOLETTO, M. **Estudo de geometrias alternativas de blocos vazados utilizando concreto autoadensável**. 2020. 141 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2020.

B, WIYANTOKO; KURNIAWATI, P; PURBANINGTIAS, T; I, FATIMAH. Synthesis and Characterization of Hydrotalcite at Different Mg/Al Molar Ratios. **Procedia Chemistry**, Amsterdam, v. 17, p. 21-26, 2015. DOI: 10.1016/j.proche.2015.12.115.

CAO, Y. *et al.* Recent progress of utilization of activated kaolinitic clay in cementitious construction materials. **Composites Part B: Engineering**, Oxford, v. 211, 2021. DOI: 10.1016/j.compositesb.2021.108636.

CAPELO, A. R. S. M. **Cimento à base de óxido de magnésio e cinza da casca de arroz**. 2021. 96 f. 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. *et al.* High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for portland cement in self-compacting and sustainable concrete, **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 45 (2014) 136–147. DOI: doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.09.003.

CELIK, K. *et al.* Moon, Effect of volcanic ash pozzolan or limestone replacement on hydration of Portland cement, **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 197 (2019) 803–812. DOI: doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.193

CHEN, C. *et al.* A striking growth of CO₂ emissions from the global cement industry driven by new facilities in emerging countries. **Environmental Research Letters**, Bristol, v. 17, 2022. DOI: 10.1088/1748-9326/ac48b5

DHAKAL, M. *et al.* Development of a MgO-metakaolin binder system. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 284, 2021. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2021.122736.

DOLORES, G. M. **Low-alkalinity matrix composites based on magnesium oxide cement reinforced with cellulose fibres**. 2017. 161 f. 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.

DUNG, N. T. *et al.* Formation of carbonate phases and their effect on the performance of reactive MgO cement formulations. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 125, 2019. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105894.

DUNG, N.T; UNLUER, C. Carbonated MgO concrete with improved performance: The influence of temperature and hydration agent on hydration, carbonation and strength gain. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 82, p. 152-164, 2017. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2017.06.006

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.

GUO, R. *et al.* Global CO₂ uptake by cement from 1930 to 2019. **Earth System Science Data**, [s. l.], v. 13, p. 1791–1805, 2021. DOI: 10.5194/essd-13-1791-2021

HABERT, G. *et al.* Cement production technology improvement compared to factor 4 objectives. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 40, p. 820-826, 2010. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.09.031

HAY, R. *et al.* Mechanical and microstructural changes in reactive magnesium oxide cement-based concrete mixes subjected to high temperatures. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 118, 2021. DOI: 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**, Oxford, v. 128, 2020. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105941.

ISTUQUE, D. B. **Estudo da influência da cinza de lodo de esgoto como material não-convencional na produção de geopolímeros à base de metacaulim**. 2017. 82 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2017.

ISTUQUE, D. B. *et al.* Behaviour of metakaolin-based geopolymers in incorporating sewage sludge ash (SSA). **Materials Letters**, Amsterdam, v. 180, p. 192-195, 2016. DOI: 10.1016/j.matlet.2016.05.137.

ISTUQUE, D. B. *et al.* Effect of sewage sludge ash on mechanical and microstructural properties of geopolymers based on metakaolin. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 203, p. 95-103, 2019. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.093

ISTUQUE, D. B. *et al.* Evaluation of the long-term compressive strength development of the sewage sludge ash/metakaolin-based geopolymer. **Materiales de Construcción**, Madrid, v. 71, 2021. DOI: 10.3989/mc.2021.13220

ISTUQUE, D. B. *et al.* Impedance Spectroscopy as a Methodology to Evaluate the Reactivity of Metakaolin Based Geopolymers. **Materials**, Basel, 2020. DOI: 10.3390/ma15238387.

JIN, F; AL-TABBAA, A. Thermogravimetric study on the hydration of reactive MgO and silica mixture at room temperature, **Thermochimimica Acta**, Amsterdam, v. 566, p. 162-168, 2013. DOI: 10.1016/j.tca.2013.05.036

JIN, F. 2 - Magnesium oxychloride cement. *In: Magnesia Cements: From Formulation to Application*, p. 29-74, 2020. DOI: 10.1016/B978-0-12-391925-0.00009-1.

JIN, F; AL-TABBAA, A. Characterisation of diferente commercial reactive magnesia. **Advances in Cement Research**, London, v. 26(2), p. 101–113, 2014. DOI: 10.1680/adcr.13.00004. (2014b).

JIN, F; AL-TABBAA, A. Strength and hydration products of reactive MgO–silica pastes. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 52, p. 27-33, 2014. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2014.04.003. (2014a).

JIN, F; GU, K; AL-TABBAA, A. Strength and hydration properties of reactive MgO-activated ground granulated blastfurnace slag paste. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 57, p. 8-16, 2015.

JUNIOR, G. P. S. **Caracterização de um novo aglomerante pozolânico originado da mistura de argila e folha de cana-de-açúcar**. 2022. 107 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2022.

JUNIOR, T. S. **Controle da hidratação do óxido de magnésio: fundamentos físico-químicos e aplicação tecnológica**. 2016. Dissertação (mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

KUMAR, S. *et al.* Performance of reactive magnesia cement formulations containing fly ash and ground granulated blast-furnace slag. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 232, 2020. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117275

LI, S; FENG, Y; YANG, J. xpansion Mechanism and Properties of Magnesium Oxide Expansive Hydraulic Cement for Engineering Applications. **Advances in Materials Science and Engineering**, London, 2021. DOI: 10.1155/2021/5542072

LI, Z; XU, Y; LIU, H; ZHANG, J; WEI, J; YU, Q. Effect of the MgO/silica fume ratio on the reaction process of the MgO-SiO₂-H₂O system. **Materials**, Basel, v. 12, p. 1–12, 2018. DOI: 10.3390/ma12010080.

LISKA, M. *et al.* Scaled-up commercial production of reactive magnesium cement pressed masonry units. Part I: Production. **Construction Materials**, Basel, ICE Publishing, v. 165, 2012.

LUZ, A. B. *et al.* Argila – Caulim. *In: Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações*. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2008. p. 2559-294. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1101/1/12%20CAULIMmar%C3%A7o%20Revisado%20B%20ertolino%20e%20Scorzelli.pdf>. Acesso em: 13 de fevereiro, 2023.

MADEJ, D. *et al.* Calorimetry and other methods in the studies of reactive magnesia–hydratable alumina–microsilica hydrating mixtures. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Budapest, v. 126, p. 1133–1142, 2016. DOI: 10.1007/s10973-016-5634-0

MÁRTIRES, R. A. C. Caulim. *In: ECONOMIA Mineral do Brasil*. Brasília, DF: Agência Nacional de Mineração, 2009. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/6-2-caulim#:~:text=Caulim%20%C3%A9%20uma%20rocha%20formada,de%20ferro%20e%20tit%C3%A2nio%2C%20etc>. Acesso em: 20 de fevereiro, 2023.

MILLER, S. A. *et al.* Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 114, p. 115-124, 2018. DOI: 10.1016/j.cemconres.2017.08.026

MOUMIN, G. *et al.* CO₂ emission reduction in the cement industry by using a solar calciner. **Renewable Energy**, Oxford, v. 145, p. 1578-1596, 2020. DOI: 10.1016/j.renene.2019.07.045.

MURRAY, H. H. Overview - clay mineral applications. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v. 5, p. 379-395, 1991. DOI:10.1016/0169-1317(91)90014-Z.

OLIVIER, J. G. J. Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions: 2021 Summary Report. **PBL Publishers**, Hague, 2022. Disponível em: https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2022-trends-in-global-co2-and_total-greenhouse-gas-emissions-2021-summary-report_4758.pdf. Acesso em: 08 de fevereiro, 2023.

OURO BRANCO. Minérios Ouro Branco, s.d. Disponível em: <http://www.ourobranco.com.br/caulim.php>.

PAGOTO, L. M. **Estudo do comportamento à água em argamassas de revestimento incorporadas com borracha de pneus**. 2018. 167 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2018.

POON, C. S. *et al.* Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 31, p. 1301–1306, 2001.

QUESADA, D. E. *et al.* Geopolymers made from metakaolin sources, partially replaced by Spanish clays and biomass bottom ash. **Journal of Building Engineering**, Oxford, v. 40, 2021. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.102761

RASHAD, A. M. Metakaolin as cementitious material: History, sources, production and composition – A comprehensive overview. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 42, p. 303-318, 2013. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.001.

RASHAD, A. M; ZEEDAN, S. R. The effect of activator concentration on the residual strength of alkali-activated fly ash pastes subjected to thermal load. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 25, p. 3098-3107, 2011. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.12.044

REPORTLINKER. Kaolin Global Market Report 2023. Disponível em: https://www.reportlinker.com/p06320360/Kaolin-Global-Market-Report.html?utm_source=GNW. Acesso em: 10 de fevereiro, 2023.

ROCHA, S. D. F; MANSUR, M. B; CIMINELLI, V. S. T. Kinetics and mechanistic analysis of caustic magnesite hydration. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, Oxford, v. 79, p. 816-821, 2004. DOI: 10.1002/jctb.1038

RODRIGUES, D. A. E. **Efeitos da adição de metacaulim na absorção capilar e profundidade de carbonatação de concretos**. 2014. 61 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Química) Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

RUAN, S., *et al.* Assessment of the properties and environmental impact of carbonated reactive magnesite containing industrial waste. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 706, 2021. DOI: 10.1016/j.tca.2021.179051

RUAN, S; UNLUER, C. Comparative life cycle assessment of reactive MgO and Portland cement production. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 137, p. 258-273, 2016. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.07.071

RUAN, S; UNLUER, C. Influence of supplementary cementitious materials on the performance and environmental impacts of reactive magnesite cement concrete. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 159, p. 62-73, 2017. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.05.044

SAKAMOTO, C. A. **Argamassas mistas de revestimento com emprego de borracha de pneus: desempenho perante o comportamento à água**. 2020. 268 f.

Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2020.

SALOMÃO, R. *et al.* Novel insights into MgO hydroxylation: Effects of testing temperature, samples' volume and solid load. **Ceramics International**, Oxford, v. 40, p. 14809–14815, 2014. DOI: 10.1016/j.ceramint.2014.06.074

SAMET, B; MNIF, T; CHAABOUNI, M. Use of a kaolinitic clay as a pozzolanic material for cements: Formulation of blended cement, **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 29, p. 741, 2007.

SANTOS, J. A. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos piezoelétricos de pzt com matriz cimentícia e borracha natural**. 2018. 123 f. Dissertação (mestrado em Ciência dos Materiais) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2018.

SCRIVENER, K. L. Options for the future of cement. **The Indian Concrete Journal**, Thane, v. 88, p. 11-21, 2014.

SCRIVENER, K, L; JOHN, V, M; GARTNER, E, M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 114, p. 2-26. 2018. DOI: 10.1016/j.cemconres.2018.03.015.

SCRIVENER, K. L; KIRKPATRICK, R. J. Innovation in use and research on cementitious material. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 38, p. 128–136, 2008. DOI: doi:10.1016/j.cemconres.2007.09.025.

SHAH, V; SCOTT, A. Hydration and microstructural characteristics of MgO in the presence of metakaolin and silica fume. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 121, 2021. DOI: 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**, Oxford, v. 144, 2021. DOI: 10.1016/j.cemconres.2021.106422. (2021b)

SHAHBAZ, F. *et al.* Life cycle assessment of brucite and synthetic MgO produced from reject brine using different álcalis. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 380, 2022. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.135071

SHAND, M. A. **The chemistry and technology of magnesia**. Hoboken: Wiley-Interscience, 2006.

SHAND, M. A. Manufacture of magnesium oxide for magnesia cements. *In*: MAGNESIA cements: from formulation to application. Saint Louis: Elsevier, 2020. p. 13-28. DOI: 10.1016/B978-0-12-391925-0.00008-X.

SHAND, M. A; JIN, F. Introduction: haracterization of MgO. *In*: MAGNESIA cements: from formulation to application. Saint Louis: Elsevier, 2020. DOI: 10.1016/B978-0-12-391925-0.00006-6.

SIDDIQUE, R. Metakaolin. *In: WASTE Materials and By-Products in Concrete*. Berlin: Springer, 2008. DOI: 10.1007/978-3-540-74294-4_2.

SILVA, S. P. CAULIM. **Balanço Mineral Brasileiro**, Brasília, DF, 2001.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO – SNIC. **Relatório anual**. Rio de Janeiro: SNIC, 2021. Disponível em: http://snic.org.br/assets/pdf/relatorio_anual/rel_anual_2021.pdf. Acesso em: 04 de abril, 2023.

SONAT, C. *et al.* Recycling and reuse of reactive MgO cements – A feasibility study. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 157, p. 172-181, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.09.068

SONAT, C; DUNG, N.T; UNLUER, C. Performance and microstructural development of MgO–SiO₂ binders under different curing conditions. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 154, p. 945-955, 2017. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.08.020

SONAT, C; UNLUER C. Investigation of the performance and thermal decomposition of MgO and MgO-SiO₂ formulations. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 655, p. 251-261, 2017. DOI: 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**, Amsterdam, v. 211, p. 787-803, 2019. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.11.246

SOUSA, V; BOGAS, J. A. Comparison of energy consumption and carbon emissions from clinker and recycled cement production. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 306, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127277

SPÓSITO, F. A. **Análises não destrutivas de argamassas mistas de revestimento com incorporação de resíduos de PET**. 2020. 175 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2020.

SURYANTO, B. *et al.* In-situ dynamic WetSEM imaging and electrical impedance measurements on Portland cement during early hydration, **Materials Characterization**, Philadelphia, v. 142, p. 86-100, 2018. DOI: 10.1016/j.matchar.2018.05.028.

SZCZERBA, J. Influence of time and temperature on ageing and phases synthesis in the MgO–SiO₂–H₂O system. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 567, p. 57-64, 2013. DOI: 10.1016/j.tca.2013.01.018

TEMUJIN, J; OKADA, K; MACKENZIE, K. J. D. The role of Water in the Mechanochemical Reactions of MgO–SiO₂ Systems. **Journal of solid state chemistry**, Maryland Heights, v. 138, 1998.

TIMPERLEY, J. **Why cement emissions matter for climate change**. Carbon Brief, 2018. Disponível em: <https://www.carbonbrief.org/qa-why-cement-emissions-matter-for-climate-change/>.

TIRONI, A. *et al.* Thermal treatment of kaolin: effect on the pozzolanic activity. At 11th International Congress on Metallurgy & Materials. **Procedia Materials Science** **1**, Amsterdam, p. 343 – 350, 2012.

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

TURVEY, C. C; WYNANDS, E. R; DIPPLE, G. M. A new method for rapid brucite quantification using thermogravimetric analysis. **Thermochimica Acta**, Amsterdam, v. 718, 2022. DOI: 10.1016/j.tca.2022.179366

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY – USGS. Mineral Commodity Summaries 2022. <http://pubs.er.usgs.gov/publication/mcs2022>. DOI: 10.3133/mcs2022

UNLUER, C; AL-TABBAA, A. Enhancing the carbonation of MgO cement porous blocks through improved curing conditions, **Cement and Concret Research**, Oxford, v. 59, p. 55–65, 2014. DOI: 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**, Oxford, v. 54, p. 87–97, 2013. DOI: 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**, Amsterdam, v. 94, p. 629-643, 2015. DOI: 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**, Washington, v. 116, p. 4170–4204, 2016. DOI: 10.1021/acs.chemrev.5b00463.

YEDRA, E. *et al.* New test methods to determine water absorption by capillarity. Experimental study in masonry mortars. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 319, 2022. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125988.

ZHANG, B. *et al.* Effect of metakaolin and magnesium oxide on flexural strength of ultra-high performance concrete. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 131, 2022. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104582

ZHANG, R; ARRIGONI, A; PANESAR, D. K. Could reactive MgO cement be a green solution? The effect of CO₂ mineralization and manufacturing route on the potential global warming impact. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 124, 2021. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2021.104263

ZHANG, S. *et al.* M- S-H formation in MgO-SiO₂ slurries via wet milling for magnesia based castables. **Ceramics International**, Oxford, v. 47, 2021. DOI: 10.1016/j.ceramint.2020.12.207

ZHANG, T. *et al.* Control of drying shrinkage in magnesium silicate hydrate (m-s-h) gel mortars. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 88, p. 36–42, 2016. DOI: 10.1016/j.cemconres.2016.05.011

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**, Oxford, v. 41, p. 439–442, 2011. DOI: 10.1016/j.cemconres.2011.01.016

ZHANG, T; VANDEPERRE, L. J; CHEESEMAN, C. R. Formation of magnesium silicate hydrate (M-S-H) cement pastes using sodium hexametaphosphate. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 65, p. 8–14, 2014. DOI: 10.1016/j.cemconres.2014.07.001.

ZHANG, T. *et al.* Characterization of Magnesium Silicate Hydrate (MSH) Gel Formed by Reacting MgO and Silica Fume. **Materials**, Basel, v. 11, 2018. DOI: 10.3390/ma11060909

WIYANTOKO, B; *et al.* Synthesis and Characterization of Hydrotalcite at Different Mg/Al Molar Ratios. **Procedia Chemistry**, Amsterdam, v. 17. 2014. DOI: 10.1016/j.proche.2015.12.115.