


unesp  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GABRIEL HIDEKI HONDA MAEDA

**INVESTIGAÇÃO DE PASTAS COM AGLOMERANTE À BASE DE ÓXIDO DE
MAGNÉSIO E SÍLICA ATIVA**

Ilha Solteira – SP

2024

unesp  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

GABRIEL HIDEKI HONDA MAEDA

**INVESTIGAÇÃO DE PASTAS COM AGLOMERANTE À BASE DE ÓXIDO DE
MAGNÉSIO E SÍLICA ATIVA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
UNESP como parte dos requisitos para
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki
Orientador

Ilha Solteira – SP

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M184i Maeda, Gabriel Hideki Honda.
Investigação de pastas com aglomerante à base de óxido de magnésio e sílica ativa / Gabriel Hideki Honda Maeda. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
67 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2024

Orientador: Jorge Luís Akasaki

Inclui bibliografia

1. Óxido de magnésio. 2. Sílica ativa. 3. Materiais alternativos.

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURSO : ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: CONSTRUÇÃO CIVIL
REALIZADA EM : 23-07-2024
DISCENTE : **GABRIEL HIDEKI MAEDA HONDA**
COMISSÃO EXAMINADORA:

1. Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki (Orientador)
2. Prof. Dr. Alex Otávio Sanches (Examinador)
3. Eng. Me. Marcelo Bortoletto (Examinador)

TÍTULO: "INVESTIGAÇÃO DE PASTAS COM AGLOMERANTE À BASE DE ÓXIDO DE MAGNÉSIO E SÍLICA ATIVA."

Local: meet.google.com/upn-jxri-yqe – Via Google Meet

Horário de início: 10 horas

Em sessão pública, após exposição em torno de 40 (quarenta minutos), o discente foi arguido oralmente, e no final da exposição foi "**APROVADO**" pelos membros componentes da Comissão Examinadora. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ATA, a qual é assinada pelos membros da Comissão Examinadora e pelo discente Gabriel Hideki Honda Maeda.....

Ilha Solteira, 23 de julho de 2024.



Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki
(Orientador)



Prof. Dr. Alex Otávio Sanches
(Examinador)



Eng. Me. Marcelo Bortoletto
(Examinador)

Ciente:
Discente:


Gabriel Hideki Honda Maeda

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe, Regina Terumi Honda, e ao meu irmão, Erick Yuji Honda Maeda, pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Regina Terumi Honda, por ser um exemplo de pessoa em quem eu me espelho, por sempre acreditar no meu potencial e me apoiar ao longo de toda a minha vida.

Ao meu irmão, Erick Yuji Honda Maeda, por todo o apoio e companheirismo durante a graduação.

Ao meu pai, Sérgio Hiroshi Maeda, por todo o suporte e carinho, mesmo estando a trabalho no Japão.

Ao meu professor e orientador, Jorge Luís Akasaki, por todos os ensinamentos, experiências, auxílio e confiança para realizar minha iniciação científica e meu trabalho de conclusão de curso.

As minhas parceiras de pesquisa Letícia, Maria Paula e Denise por toda ajuda nas atividades realizadas no laboratório;

Aos técnicos do Laboratório de Engenharia Civil de Ilha Solteira, pela ajuda durante os ensaios realizados e por sempre estarem à disposição. Em especial, ao técnico Ozias Porto, meu agradecimento pelo auxílio em práticas e experimentos laboratoriais essenciais para este trabalho.

A todos os docentes e funcionários da UNESP – Ilha Solteira por contribuírem para a minha formação.

Aos meus amigos da graduação, que passaram esses 5 anos ao meu lado, compartilhando os momentos bons e ruins, além dos inúmeros desafios e sessões de estudo, sempre com muita parceria.

Ao engenheiro civil Fabrício Fernandes Vieira, pela oportunidade de estágio na área de segurança de barragens.

RESUMO

Atualmente, a indústria da construção civil é responsável por expressivos impactos ambientais, como o grande consumo de matérias-primas e energia, geração de resíduos e elevada emissão de dióxido de carbono (CO_2). Dessa forma, o estudo de alternativas ao cimento Portland (CP) está se tornando cada vez mais relevante no meio científico. O cimento de magnésia reativa vem se destacando como alternativa ao CP, principalmente com o uso de fosfato de magnésio. Por outro lado, a pesquisa sobre cimentos à base de óxido de magnésio (MgO) e sílica ativa (SA) não é tão amplamente abordada na literatura, tornando relevante o estudo destes materiais. A reação do MgO e da SA na presença de água resulta na formação de um gel conhecido como Silicato de Magnésio Hidratado (MSH), que é o principal responsável pela resistência mecânica da mistura. Portanto, este estudo tem como objetivo analisar diferentes proporções de MgO e SA, como aglomerante, na produção de pastas (sem uso de aditivo), visando obter as melhores proporções. Para isto, foram realizados ensaios de resistência à compressão e, para a melhor proporção, ensaios adicionais de difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV), espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), termogravimetria (TG) e expansão linear. Foi observado um aumento na resistência à compressão ao longo do tempo de cura para a maioria das proporções e uma redução na resistência à compressão com o aumento da relação w/b para todas as proporções analisadas. Para a pasta Si40_0,6 (melhor proporção), foi verificado o aumento da resistência à compressão ao longo do tempo, com um valor de 18,61 MPa aos 28 dias. A partir dos resultados obtidos e dos ensaios adicionais realizados, concluiu-se que o aumento da resistência à compressão com o passar do tempo se deve à formação contínua de produtos de hidratação, principalmente o gel de MSH.

Palavras-chave: Óxido de magnésio; Sílica ativa; Materiais alternativos

ABSTRACT

Nowadays, the construction industry is responsible for significant environmental impacts, such as the large consumption of raw materials and energy, waste generation and high carbon dioxide (CO₂) emissions. Therefore, the study of alternatives to Portland cement (CP) is getting more and more relevant in the scientific world. Reactive magnesia cement has been highlighted as an alternative to CP, mainly with the use of magnesium phosphate. On the other hand, research into cements based on magnesium oxide (MgO) and silica fume (SA) is not as widely covered in the literature, making it relevant to study these materials. The reaction of MgO and SA in the presence of water results in the formation of a gel known as Magnesium-Silicate-hydrate (M-S-H), which is the main responsible for providing the mechanical resistance of the mixture. Therefore, this study aims to analyze different proportions of MgO and SA, as a binder, in the production of pastes (without the use of additives), aiming to obtain the best proportions. For this, compressive strength tests were carried out and, for the best proportion, additional tests of X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), thermogravimetry (TG) and linear expansion. Increases in compressive strengths were observed over curing time for most proportions and also reductions in compressive strengths with increasing w/b ratio for all proportions analyzed. For the Si40_0.6 paste (best proportion), an increase in compressive strength was observed over time, with a value of 18.61 MPa at 28 days. From the results obtained and the additional tests carried out, it was concluded that the increase in compressive strength over time is due to the continuous formation of hydration products, mainly the M-S-H gel.

Key words: Magnesium oxide; Silica fume; Alternative materials

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concentração global de CO ₂ ao longo dos anos (em ppm).....	17
Figura 2 - MgO utilizado para a preparação das pastas.....	34
Figura 3 - SA utilizada para a preparação das pastas.....	35
Figura 4 - Tanque de água deionizada.....	36
Figura 5 - Molde metálico nas dimensões 50 x 50 x 50 mm	37
Figura 6 - Corpos de prova em condição selada e com identificação	38
Figura 7 - Prensa EMIC para ensaio de resistência à compressão.....	39
Figura 8 - Evolução da resistência para as pastas estudadas	43
Figura 9 - Difração de raios X do MgO.....	46
Figura 10 - Difração de raios X da sílica ativa	47
Figura 11 - Difração de raios X para a pasta Si40_0,6 em diferentes idades	48
Figura 12 - Ensaio de MEV da pasta Si40_0,6 com 28 dias	50
Figura 13 - Ensaio de MEV da pasta Si40_0,7 com 28 dias	50
Figura 14 - Ensaio de FTIR para a pasta Si40_0,6 em idades de 1, 7 e 28 dias	52
Figura 15 - Curvas de TG e DTG da pasta Si40_0,6 (1 dia)	53
Figura 16 - Curvas de TG e DTG da pasta Si40_0,6 (7 dias)	54
Figura 17 - Curvas de TG e DTG da pasta Si40_0,6 (28 dias).....	54
Figura 18 - Expansão (mm) x Idade (dias) da pasta Si40_0,6	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização do óxido de magnésio utilizado nas pastas	34
Tabela 2 - Caracterização da sílica ativa utilizada nas pastas	35
Tabela 3 - Resistências individuais (MPa) das pastas estudadas	42
Tabela 4 - Resistências médias (MPa) das pastas estudadas	42
Tabela 5 - Desvio Padrão (DP) para as pastas estudadas	43
Tabela 6 - Coeficiente de variação (CV) para as pastas estudadas.....	43
Tabela 7 - Leituras de expansão (pasta Si40_0,6) em idades de 1 dia e de 3 dias ..	56
Tabela 8 - Leituras de expansão (pasta Si40_0,6) em idades de 7 dias e de 14 dias	56
Tabela 9 - Leituras de expansão (pasta Si40_0,6) em idades de 21 dias e de 28 dias	56
Tabela 10 - Valores de expansão média (mm) da pasta Si40_0,6.....	56
Tabela 11 - Variação dimensional e variação de massa (pasta Si40_0,6).....	57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo geral	15
2.2 Objetivos específicos	15
3 REVISÃO DE LITERATURA	16
3.1 A indústria do cimento	16
3.2 Materiais cimentícios suplementares (MCSs)	18
3.3 Sílica ativa	19
3.4 Cimento à base de Óxido de Magnésio	24
3.5 Estudos de cimentos à base de Óxido de Magnésio e Sílica Ativa	27
4 METODOLOGIA	34
4.1 Materiais	34
4.2 Preparação das pastas e condições de cura	36
4.3 Resistência à compressão	38
4.4 Ensaio adicionais	39
4.4.1 Difração de raios X (DRX)	40
4.4.2 Microscopia de varredura eletrônica (MEV)	40
4.4.3 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	40
4.4.4 Termogravimetria (TG)	40
4.4.5 Expansão linear	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
5.1 Resistência à compressão	42
5.2 Difração de raios X (DRX)	46
5.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	49
5.4 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)	51
5.5 Termogravimetria (TG)	53
5.6 Expansão linear	55
6 CONCLUSÕES	59
REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

A indústria global da construção civil é responsável por um grande consumo de matérias-primas (em média, 60% de todo o montante extraído da litosfera) e de energia e geração de grande quantidade de resíduos, sendo também o segundo maior emissor de carbono, com cerca de 30 a 35% das emissões globais (BRIBIÁN *et al.*, 2011; WU *et al.*, 2018). Além disso, aproximadamente 4,4 bilhões de toneladas de concreto são produzidas anualmente no mundo, sendo que a previsão para o ano de 2050 é que tal produção terá um aumento de mais de 5,5 bilhões de toneladas (SAHOO *et al.*, 2021).

O cimento Portland (CP) é obtido por meio da moagem e da mistura do clínquer com gesso (gipsita) e outras adições, como o calcário, sendo indispensável para uma ampla gama de edifícios, infraestrutura e sistemas de transporte (SCHNEIDER, 2019; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT (WBCSD), 2010). A indústria do cimento é responsável por aproximadamente 7% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), um dos principais gases de efeito estufa (GEE) (DIXIT *et al.*, 2022; MENG *et al.*, 2023; ROADMAP, 2019), principalmente devido ao processo de clínquerização, que emite de 850 a 1200 kg de CO₂ por tonelada de clínquer (PAYÁ *et al.*, 2022).

Nesse contexto, a sustentabilidade na construção civil é essencial para mitigar os impactos ambientais, principalmente com relação à redução das emissões de CO₂ e da possibilidade do esgotamento dos recursos naturais (MOHAMAD *et al.*, 2022), e melhoria da eficiência energética (RUAN e UNLUER, 2017). Para isso, existem algumas iniciativas globais, dentre elas: substituição parcial de cimento por materiais de baixa emissão de carbono, subprodutos e resíduos industriais; uso de matérias-primas alternativas, fontes renováveis de energia e métodos de produção com baixo consumo de energia; desenvolvimento de novas formulações de cimento com menor consumo de energia e pegadas de carbono, como os cimentos de óxido de magnésio (MgO) reativo (UNLUER e AL-TABBAA, 2013); aplicação de tecnologias recentes para fabricar o cimento Portland convencional, incluindo captura, utilização e armazenamento de carbono; e substituição de constituintes tradicionais por ligantes alternativos, agregados reciclados e água não potável (COFFETTI *et al.*, 2022).

Uma das alternativas que vem ganhando cada vez mais espaço e notoriedade no mundo científico é o uso de materiais cimentícios suplementares (MCSs), dentre

eles a cinza de casca de arroz (CCA), cinzas volantes escórias de alto forno e a sílica ativa (SA), em substituição parcial ao cimento Portland, visto que promove a reutilização de materiais e reduz a poluição proveniente da produção de cimento (ADNAN *et al.*, 2022) e o custo de construção, com um desempenho semelhante ao CP (APRIANTI *et al.*, 2015).

Os MCSs vêm sendo estudados e utilizados como materiais pozolânicos (criam resistência extra por reação pozolânica) ou hidráulicos em concretos de alta resistência, melhorando a durabilidade e reduzindo a permeabilidade, como adição ou substituição ao cimento Portland, contribuindo para a redução da demanda de CP e mitigação dos impactos ambientais na construção, além de melhorar a resistência à compressão pelo efeito *filler* e pela reação pozolânica (APRIANTI *et al.*, 2015).

Para que um MCS possa ser utilizado, ele deve ter propriedades físicas e químicas adequadas, reatividade e volumes de fornecimento adequados, porém sem efeitos negativos significativos na consistência, hidratação, desenvolvimento de resistência, durabilidade e compatibilidade ambiental (SNELLINGS *et al.* 2023).

O uso de resíduos industriais na construção, como cinzas volantes, escórias e sílica ativa, permite que materiais normalmente descartados em aterros sejam aproveitados para melhorar as propriedades do concreto (APRIANTI *et al.*, 2015). Contudo, a disponibilidade de MCSs tem sido percebida como a principal limitação para a implementação como substitutos parciais do CP (SNELLINGS *et al.*, 2023).

O grupo MAC (Materiais Alternativos de Construção), da UNESP de Ilha Solteira, conta com diversos estudos na área da construção civil, como a utilização de materiais alternativos em substituição às matérias-primas convencionais, com o objetivo de melhorar as propriedades dos compostos e encontrar aplicações para resíduos sem finalidade específica ou que não possam mais ser reciclados. Além do uso de materiais como cinza volante, metacaulim, cinzas da casca de arroz, utiliza-se também a sílica ativa, uma fonte de sílica (SiO_2), que recentemente passou a ser estudada com o óxido de magnésio (MgO) na tentativa de substituição ao CP.

O cimento de magnésia reativa também vem ganhando notoriedade e atenção como alternativa ao CP, principalmente devido à sua temperatura de produção mais baixa (de 700 a 1000° C) quando comparada com a do cimento Portland (cerca de 1450° C), além da capacidade de ganhar resistência ao capturar CO_2 em misturas de

concreto (RUAN e UNLUER, 2017). Um dos principais temas dos estudos envolve a utilização de fosfato de magnésio e algum MCS, como cinzas volantes e sílica ativa.

O cimento de fosfato de magnésio (abreviado do termo em inglês, “MPC”) é composto por óxido de magnésio, fosfato ácido e retardador. Verificou-se que a sílica ativa e as cinzas volantes melhoram propriedades como a fluidez e a resistência à água (DONG *et al.*, 2023), além de um teor ótimo de substituição de SA (5%) em substituição parcial no MPC (com cinzas volantes e SA), com um aumento nos valores de resistência de 20 a 25% para tal teor, em relação ao corpo de prova de controle (apenas com MPC), e a densificação da microestrutura (HAQUE *et al.*, 2022).

Entretanto, a pesquisa sobre cimentos à base de óxido de magnésio e sílica ativa não é tão amplamente abordada na literatura quanto os cimentos de fosfato de magnésio, tornando relevante o estudo desses materiais para o meio científico.

A reação $MgO - SiO_2$ na presença de água leva à formação de géis de Silicato de Magnésio Hidratado, no inglês “*Magnesium-Silicate-Hydrate*” (MSH), que contribuem para a resistência do concreto (SONAT e UNLUER, 2019). Ademais, a formação de gel de M-S-H pela reação entre uma fonte à base de Mg, como o MgO, e uma fonte de sílica, como a sílica ativa, resulta em um aglutinante que pode ser usado em diversas aplicações, como encapsulamento de resíduos (ZHANG *et al.*, 2011; ZHANG *et al.*, 2012a; ZHANG *et al.*, 2012b) e resíduos tóxicos/radioativos (SIMONI *et al.*, 2023), concretos refratários (SZCZERBA *et al.*, 2013) e em materiais de construção (ZHANG *et al.*, 2014). A utilização do MgO com a SA também apresenta vantagens ambientais, como o reaproveitamento de resíduos e a redução das emissões de GEE, dentre eles o CO_2 , com potencial de melhorar as propriedades do concreto, como a durabilidade e a resistência (SONAT e UNLUER, 2019).

Portanto, com base em literaturas anteriores, é nítida a importância do estudo de formas alternativas ao CP. Um desses casos envolve a utilização do óxido de magnésio e da sílica ativa em substituição ao cimento Portland, sendo este o tema de estudo deste trabalho.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este estudo teve como objetivo analisar diferentes proporções de óxido de magnésio e sílica ativa, visando a obtenção das melhores proporções para a produção de pastas com aglomerante à base destes dois materiais, sem o uso de aditivo.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar diferentes proporções de MgO e SA por meio de ensaios de resistência à compressão;
- Realizar, para a proporção com os melhores resultados de resistência à compressão, ensaios adicionais de difração de raios X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) de fratura, espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR), termogravimetria (TG) e expansão linear.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A indústria do cimento

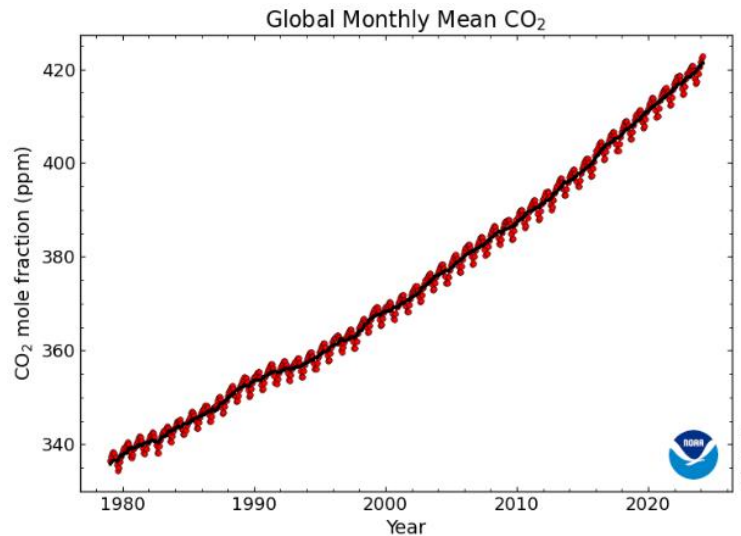
O concreto é o material mais utilizado no mundo, depois da água, e, conseqüentemente, o cimento Portland, seu principal componente, também está entre os mais usados (SCHNEIDER, 2019). A indústria do cimento vem aumentando sua produção global a cada ano, sendo a China a principal responsável por tal feito, contando com mais de 50% de toda a produção global (NIDHEESH *et al.*, 2019).

Em 2015, a produção global de cimento foi de 4,6 bilhões de toneladas, com um crescimento anual de 2,5% e podendo aumentar até 2,5 vezes até o ano de 2050 para atender às necessidades globais (HAMADA *et al.* 2023). Essa crescente demanda provoca uma série de problemas ambientais, como o enorme consumo de energia e de matérias-primas e, conseqüentemente, um possível esgotamento dos recursos naturais, a emissão elevada de poluentes, incluindo o CO₂ (que é um dos principais gases responsáveis pelo aquecimento global e mudanças climáticas), e a geração de elevada quantidade de resíduos (MOHAMAD *et al.*, 2022; NIDHEESH *et al.*, 2019).

Além disso, o processo de fabricação de cimento gera poluição por poeira, reduzindo a qualidade e a visibilidade do ar e contaminando a água, o que pode prejudicar o bem-estar humano e animal, além de causar desequilíbrio ecológico devido aos impactos na fauna e na flora (MOHAMAD *et al.*, 2022).

Apesar das inovações tecnológicas em fábricas de cimento modernas, como novos equipamentos de moagem e fornos de processo seco, a produção de clínquer ainda demanda uma enorme quantidade de energia térmica (próxima de 3,4 GJ/t) (COFFETTI *et al.*, 2022). Além disso, atualmente, é possível observar uma maior preocupação com relação às emissões de gases poluentes, dentre eles o CO₂. Com base nos dados e nas informações da Global Monitoring Laboratory (GML) (GLOBAL MONITORING LABORATORY, 2024), em fevereiro de 2024, a concentração global de CO₂ foi de 422,86 partes por milhão (ppm) e vem aumentando gradativamente a cada ano, conforme mostrado na Figura 1:

Figura 1 - Concentração global de CO₂ ao longo dos anos (em ppm)



Fonte: Global Monitoring Laboratory (2024)

As informações da Figura 1 corroboram com os dados do Painel Intergovernamental das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (IPCC), que prevê que em 2050 a concentração de CO₂ na atmosfera atingirá 550 ppm, provocando um aumento na temperatura média do planeta de 1,4 a 5,8° C, o que pode resultar em eventos cada vez mais fortes e recorrentes, tais como seca extrema, incêndios florestais, aumento do nível do mar provocado pelo agravamento do aquecimento global, inundações e destruições, escassez de alimentos para uma grande parcela da população mundial (IPCC, 2005), e a liberação de CO₂ devido ao degelo do solo permafrost em torno dos polos. Desse modo, a indústria da construção enfrenta o desafio de conciliar a preservação do meio ambiente com o fornecimento de habitação e infraestrutura para a população crescente (COFFETTI *et al.*, 2022).

Tendo em vista tal situação, sabe-se que o cimento apresenta alguns óxidos em maiores proporções, sendo um deles o SiO₂, conhecido como dióxido de silício ou sílica (ADNAN *et al.*, 2022), e que também está presente em diversos materiais alternativos pozolânicos, como a sílica ativa.

Assim, muitas pesquisas sobre alternativas ao CP vêm sendo realizadas, sendo um desses casos envolvendo a utilização de MCSs, como os resíduos agrícolas e industriais, por exemplo a sílica ativa, além de técnicas de captura, utilização e armazenamento de carbono; materiais alcalinos ativados, agregados reciclados e artificiais e água não potável; aditivos inovadores (COFFETTI *et al.*, 2022).

3.2 Materiais cimentícios suplementares (MCSs)

Materiais cimentícios suplementares são pós solúveis siliciosos, aluminossilicosos ou aluminossilicosos de cálcio usados como substitutos parciais do clínquer em cimentos ou como substitutos parciais do cimento Portland em misturas, sendo atualmente uma das principais ferramentas para reduzir as emissões de dióxido de carbono associadas à produção de concreto e cimento (JUENGER *et al.*, 2019). Os MCSs incluem resíduos industriais, pozolanas naturais e minerais ativados, que possuem propriedades hidráulicas ou pozolânicas, tais como o calcário, cinzas volantes, escórias de alto forno, metacaulim e sílica ativa, e sob condições aquosas alcalinas ou em contato com hidróxido de cálcio, são capazes de reagir quimicamente (reação pozolânica) e formar produtos de hidratação semelhantes aos dos sistemas de cimento Portland (SKIBSTED e SNELLINGS, 2019).

Pesquisadores têm investigado a viabilidade e a disponibilidade de resíduos pozolânicos, dentre eles os MCSs, para melhorar o desempenho do concreto, reduzir os custos da construção e promover o reaproveitamento de resíduos (APRIANTI *et al.*, 2015; RUAN e UNLUER, 2017).

No entanto, fatores como baixa reatividade, impactos negativos na hidratação do cimento, problemas de desempenho e de durabilidade, escassez de recursos, baixa velocidade de produção e maiores necessidades de controle de qualidade podem dificultar a utilização desses materiais alternativos na construção civil (JUENGER *et al.*, 2019). Para mitigar tais problemas, são utilizados processos de beneficiamento, que variam desde métodos simples e econômicos, como secagem, britagem, moagem, peneiramento ou classificação por tamanho, até abordagens com uso intensivo de energia e produtos químicos, como tratamentos ácidos, de carbonatação mineral, calcinação, vitrificação e processamento hidrotérmico. Em alguns casos, o CO_2 pode ser capturado durante o processamento para compensar parcialmente os custos (SNELLINGS *et al.*, 2023).

Na utilização de MCSs é importante considerar a disponibilidade de água na mistura para a hidratação dos materiais. A cinética da reação e a reatividade tem influência da finura e do tamanho das partículas, à medida que a dissolução aumenta com o aumento da área superficial, além de outros parâmetros como a composição química e a estrutura dos componentes da mistura (SKIBSTED e SNELLINGS, 2019).

Sendo assim, percebe-se que as metas de mitigação das alterações climáticas combinadas com a busca pelo melhor reaproveitamento de resíduos e a necessidade de descarbonizar a produção de cimento desencadearam uma intensa investigação envolvendo o uso e o desenvolvimento contínuo de novos tipos de MCSs (SNELLINGS *et al.*, 2023). Assim, apesar de ser improvável que os MCSs substituam completamente o CP em um curto período de tempo, eles já vêm se mostrando boas alternativas com potenciais para diversas aplicações (SHAH e SCOTT, 2021a).

Entretanto, com a crescente demanda por cimento, não se sabe se a disponibilidade de MCSs será capaz de cobrir as necessidades globais no futuro, ressaltando a importância de desenvolvimento e estudos contínuos de novos materiais alternativos (SKIBSTED e SNELLINGS, 2019), como é o caso da sílica ativa e do óxido de magnésio.

3.3 Sílica ativa

Os impactos ambientais provocados pelo setor da construção civil levaram a muitos estudos sobre MCSs, tais como cinza volante, metacaulim, cinza de casca de arroz (SELVARANJAN *et al.*, 2021) e sílica ativa (SA), com o intuito de obter alternativas ao CP. Ademais, as atividades de pesquisa envolvendo os MCSs vêm se expandindo rapidamente nos últimos anos, principalmente a partir de 2010, mostrando a importância da busca por novos materiais e a necessidade de investigação contínua dos MCSs (SNELLINGS *et al.*, 2023).

Desse modo, um material cimentício suplementar bastante utilizado é a sílica ativa, devido ao alto teor de sílica amorfa, o que contribui para o fortalecimento das pastas de cimento (QURESHI *et al.*, 2020; SIDDIQUE, 2011).

A SA é um subproduto da indústria de silício e ferrosilício, com partículas esféricas e ultrafinas, ideais para preencher vazios e melhorar o grau de hidratação nas idades iniciais. É gerada em grandes quantidades durante a redução do quartzo de alta pureza a silício em temperaturas por volta de 2000° C, o que resulta na formação de vapores de sílica (SiO₂), que se oxidam em baixa temperatura e condensam em partículas minúsculas, consistindo de sílica não cristalina. O teor de SiO₂ na SA está associado à qualidade do material (HAMADA *et al.*, 2023) e ao tipo de liga produzida. Por exemplo, os subprodutos de liga de ferrosilício com 50% de silício apresentam um teor de sílica baixo e menos pozolânico quando comparado

com os subprodutos de silício metálico, que contém cerca de 87 a 98% de sílica não cristalina (sílica amorfa) (SIDDIQUE, 2011). Também foi relatado que a quantidade de SiO_2 contido na sílica ativa varia de 85% a 97%, sendo o principal contribuinte para a natureza pozolânica do material, além de alumina, óxido de ferro e óxido de cálcio (CaO), em pequenas proporções (SINGH e SINGH, 2024).

O descarte inadequado da sílica ativa pode ocasionar problemas como a poluição do ar e da água, contaminação de áreas cultiváveis e problemas de saúde (LOU *et al.*, 2023). Apesar disso, a utilização da SA como um MCS possui diversas vantagens, tais como o aumento da resistência à compressão e à flexão (podendo ser utilizadas em concretos de ultra alto desempenho), alta resistência à compressão inicial, durabilidade aprimorada, baixa permeabilidade à intrusão de cloreto e água, e alta reatividade. O reaproveitamento da sílica ativa em argamassas aprimora as propriedades mecânicas e a durabilidade em comparação com a argamassa contendo apenas CP, devido à melhoria da ligação agregado-pasta e à microestrutura aprimorada mais densa (SIDDIQUE, 2011; SONG *et al.*, 2010), além de reduzir o consumo de energia, recursos naturais e emissões de CO_2 (LOU *et al.*, 2023), e também contribuir para a produção de cimento de baixo carbono, conforme a equação (2), com a formação de nesquehonita, que “sequestra” carbono, resultando assim em um processo de carbono negativo (SHANKS *et al.*, 2024).

Assim sendo, a SA em materiais de construção conta com várias aplicações: como aditivo mineral em concretos de ultra alto desempenho; reforço significativo em materiais de concreto preparados a partir de subprodutos industriais/agrícolas reciclados, arranha-céus, plataformas de estacionamento, túneis, pontes rodoviárias e estruturas marítimas (devido ao seu potencial para reparar estacas e colunas marítimas e reabilitar as pontes deterioradas); estabilização de rochas e solos e rejuntamento de poços de petróleo (HAMADA *et al.*, 2023); concretos de alto desempenho para pontes rodoviárias, estacionamentos, estruturas marítimas e revestimentos de pontes; produtos de reparo cimentícios (SIDDIQUE, 2011); e, mais recentemente, como aditivo mineral na impressão 3D de concreto (ZAID e OUNI, 2024). Assim, o uso da SA como substituto parcial do cimento Portland na produção de concreto, promove o consumo de resíduos e a redução do uso de cimento, representando um cenário favorável do ponto de vista ambiental e econômico (DIXIT *et al.*, 2022).

Com relação ao desempenho da sílica ativa, um estudo obteve que ao aumentar a quantidade de SA à mistura de concreto, aumenta-se as quantidades de água e de superplastificante necessárias para atingir a consistência normal padrão devido à sua maior finura (ultrafinura) (MEDDAH *et al.*, 2018), com o tamanho médio das partículas de cimento chegando a ser cerca de 100 vezes maior que o tamanho médio das partículas de SA, que em geral é inferior a $1 \mu\text{m}$ (SINGH e SINGH, 2024). Os efeitos benéficos relacionados à utilização da sílica ativa, e o aumento da resistência à compressão em decorrência da reação pozolânica (KAREIN *et al.*, 2017) e de características de durabilidade aprimoradas (ADIL *et al.*, 2020; SIDDIQUE *et al.*, 2017) tornam relevante o estudo desse material. O uso de SA como um material cimentício suplementar melhora a microestrutura e o desempenho dos compósitos. Ademais, na maior parte da literatura foi relatado o aumento na durabilidade com a incorporação de sílica ativa, com uma proporção ideal de sílica ativa no concreto (nos compósitos cimentícios) na faixa de 15 a 25% em massa de cimento (LOU *et al.*, 2023), podendo ser benéfico como substituto parcial do CP devido à alta reatividade com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) gerado durante a hidratação do cimento (HAMADA *et al.*, 2023).

Também foram estudadas substituições com mais de um material (cinza de casca de arroz, sílica ativa e pó de pedreira), variando de 10%, 20% e/ou 30% de cimento para a sílica ativa e cinza da casca de arroz, e 20% para o pó de pedreira, com uma relação água/aglutinante de 0,4 para todas as substituições, bem como o uso de superplastificante (0,8% em peso do aglutinante) e fibra de vidro (0,25%; 0,50%; e 0,75% de volume), com cura em um tanque de água doce a 27°C até as idades de teste (7, 14 e 28 dias). Foi observado o potencial desses materiais na produção de cimento “sustentável”, reduzindo o uso de CP e mitigando os impactos ambientais (PATIL *et al.*, 2022).

Outro estudo avaliou a aplicabilidade da substituição parcial de cimento Portland comum por cinza de casca de arroz e sílica ativa em concreto de alta resistência, com substituições de 2,5% a 12,5% de SA e de 5% a 25% de CCA, alcançando resultados muito próximos à argamassa de controle (sem substituição de CP), principalmente no caso da substituição de 5% SA + 10% CCA, com resistência à compressão de 23,5 MPa aos 28 dias, muito próxima ao valor de 24 MPa para a argamassa de controle na mesma idade (JAYARAMAN *et al.*, 2023).

Ainda falando de substituições de cimento por outros materiais, foi analisado o efeito da nanossílica (pó de sílica amorfa de alta pureza), sílica ativa e escória de aço

para reforço no concreto. Observou-se que a adição desses materiais ao concreto aumenta a resistência quando comparado com o concreto sem substituições, além de ter potencial para reduzir o preço do produto final em relação ao concreto convencional (KANSAL e GOYAL, 2021).

Também foi estudada a utilização de sílica ativa e escória granulada moída de alto forno (GGBS, do termo em inglês “*Ground granulated blast furnace slag*”) em substituição parcial ao cimento Portland comum para a produção de concreto, utilizando 3 proporções para comparação com o concreto “referência” (sem substituição): 40% GGBS, 50% GGBS e 60% GGBS (e 10% de substituição de SA nos três casos), com relação água-cimento de 0,45 e sem uso de aditivo. Na análise da resistência à compressão, o concreto sem substituição apresentou os melhores resultados em todas as idades de teste de 3, 7 e 28 dias, alcançando-se valores próximos para os concretos com 40% GGBS e 50% GGBS. Além disso, obteve-se que a substituição de 50% GGBS pode ser viável para a utilização em elementos estruturais que suportarão determinada carga de flexão (MOHAN e HAYAT, 2021).

Além disso, a incorporação de adições minerais ao concreto, dentre elas cinzas volantes, escória granulada de alto-forno, pozolanas naturais e a própria sílica ativa, leva a um decréscimo na permeabilidade e na absorção, sendo mais significativo em concretos com adição de SA e CCA devido à alta pozolanicidade. Estes materiais reagem com o hidróxido de cálcio, resultante da hidratação do cimento, gerando assim compostos estáveis e resistentes (FONSECA, 2010) e possibilitando o uso da SA em concretos de alto desempenho (TOMÉ, 2014).

Agora falando sobre a substituição parcial apenas de SA no CP, um estudo comparou, por meio da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV), amostras de concreto sem SA e com 10% de SA. Observou-se que as amostras desprovidas de sílica ativa apresentavam mais vazios e espaços entre as partículas, enquanto que as amostras com sílica ativa preencheram os vazios da matriz, além de diminuir a permeabilidade. A SA atua como efeito “*filler*”, promovendo hidratação e melhorando a microestrutura do compósito, o que pode ter um impacto positivo na resistência mecânica e na durabilidade (LOU *et al.*, 2023).

Em outra pesquisa, com a análise de MEV (que identifica as propriedades microestruturais da amostra), foi observado que a SA melhora as estruturas cavitárias da pasta de cimento, principalmente na zona de transição. A análise de difração de raios X (DRX, ou XRD do termo em inglês “*X-ray diffraction*”), um método analítico

rápido utilizado principalmente para a determinação da composição mineralógica de um material, mostrou a SA como um material não cristalino (amorfo) (HAMADA *et al.*, 2023).

Além disso, foi relatado que a substituição de cimento por SA na faixa de 10 a 25% resultou no aumento das resistências à compressão, tração e flexão, levando ao desenvolvimento do gel secundário de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) ao reagir com o hidróxido de cálcio. Contudo, a adição de SA além deste limite pode ter um impacto adverso nas características gerais da mistura (SINGH e SINGH, 2024).

Também foi relatado que a diminuição da relação água/cimento e o aumento do nível de substituição de CP por SA resultaram em valores de resistência à compressão mais elevados, chegando a 87 MPa para a substituição de 20% e relação água/cimento igual a 0,45 (MEDDAH *et al.*, 2018). A influência da adição de SA na trabalhabilidade de materiais cimentícios foi considerada contraditória, pois a maior parte da literatura afirma uma diminuição na trabalhabilidade da mistura com o aumento de substituição de SA devido à maior área superficial do material (HAMADA *et al.*, 2023), embora alguns estudos indiquem um aumento nessa trabalhabilidade com a incorporação de SA, devido ao efeito redutor de água da sílica ativa de formato esférico. Portanto, mais estudos precisam ser realizados para investigar melhor esse efeito em misturas cimentícias (LOU *et al.*, 2023).

Em um estudo do uso da SA como substituição parcial do cimento em misturas de argamassas, observou-se que o aumento da substituição de cimento por SA resultou na redução da absorção de água e do índice de vazios, obtendo-se taxas de absorção de água de 4,1%, 3,3%, 2,8% e 2,4% para as substituições de 0%, 5%, 10% e 15% de sílica ativa, respectivamente, enquanto que para os índices de vazios foram obtidos os valores de 10,4%, 7,9%, 7,1% e 6,4% para as mesmas substituições. A enorme proporção de sílica presente na SA reage com o hidróxido de cálcio (fornecido pela hidratação do cimento), o que leva à formação de gel adicional de hidrato de silicato de cálcio (C-S-H), que é responsável pela resistência da mistura. Ademais, o aumento do gel C-S-H resulta no aumento da resistência à compressão do concreto e na diminuição da porosidade, sendo esta influenciada também pelas propriedades pozolânicas da sílica ativa e pela alta finura do material, que contribui para uma microestrutura mais densa (HATUNGIMANA *et al.*, 2019).

Vale dizer que ao incorporar até mesmo uma pequena quantidade de SA em substituição parcial ao cimento Portland na produção de concreto, tende a reduzir os

impactos ambientais associados ao setor da construção civil (especialmente a indústria do concreto/cimento), promovendo uma produção mais limpa e sustentável e possibilitando mitigar os danos ao meio ambiente (MEDDAH *et al.*, 2018).

Dessa forma, percebe-se que o estudo da otimização da proporção de SA na mistura vem atraindo cada vez mais a atenção de acadêmicos e pesquisadores, se mostrando de extrema relevância para a análise de suas propriedades.

3.4 Cimento à base de Óxido de Magnésio

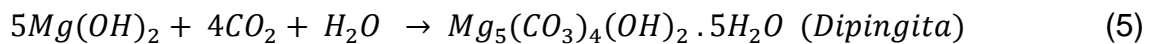
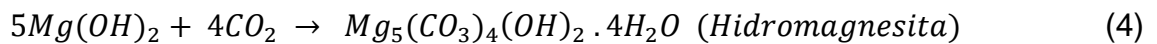
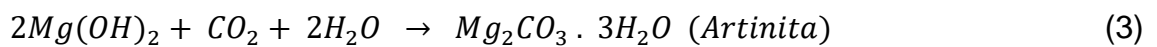
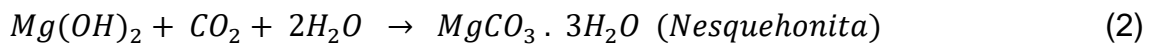
O MgO reativo geralmente é obtido com a calcinação a 700-1000° C (temperaturas inferiores comparadas com a do CP (aproximadamente 1450° C)) a partir de fontes contendo Mg, como brucita ($Mg(OH)_2$), dolomita ($CaMg(CO_3)_2$) e magnesita ($MgCO_3$). Possui cristalinidade baixa, alta área de superfície específica e, conseqüentemente, uma alta reatividade, e capacidade de ganhar resistência enquanto “sequestra” CO_2 em misturas de concreto (ABDEL-GAWWAD *et al.*, 2020; JIN e AL-TABBAA, 2014; RUAN e UNLUER, 2017).

Sendo assim, um sistema alternativo ao cimento Portland comum é o cimento à base de MgO. Foi relatado que a substituição do cimento Portland por óxido de magnésio resultou na formação de MgO-cimento (GONÇALVES *et al.*, 2019), apresentando vantagens em relação ao CP, como uma maior capacidade e potencial de captura de CO_2 , bem como uma maior resistividade do produto de hidratação e carbonatação a meios agressivos, aumentando assim a possibilidade de aproveitamento de diversos subprodutos industriais por apresentarem menor sensibilidade a impurezas (UNLUER e AL-TABBAA, 2013).

Ademais, os cimentos à base de magnésio, em geral, são rotulados como ecocimento, cimento de baixa emissão de carbono ou sustentável, sendo estudados tanto como substitutos parciais do cimento Portland quanto em aglomerantes à base de MgO ou em conjunto com outros materiais. Apesar disso, foi encontrado um estudo contraditório sobre a capacidade de captura de CO_2 , levantando dúvidas quanto à eficácia como um cimento de baixo carbono em substituição ao cimento Portland, que é de alta emissão de carbono (SHEN *et al.*, 2016).

Estudos sobre o cimento à base de MgO abordam o ganho de resistência através da carbonatação (LISKA e AL-TABBAA, 2008) ou da formação de MSH dentro de

sistemas MgO – SiO₂ – H₂O (JIN e AL-TABBAA, 2014; TRAN e SCOTT, 2017; ZHANG *et al.*, 2014). Nos sistemas de MgO carbonatados, tem-se a formação de carbonatos de magnésio hidratados (“HMCs”, do termo em inglês “*hydrated magnesium carbonates*”) para ganho de resistência. Tal processo geralmente se inicia com a reação de hidratação do MgO em brucita (Eq. (1)), seguida pela reação de carbonatação para formar uma gama de HMCs (Eq. (2) – (5)) (SONAT e UNLUER, 2017).



A extensão da reação de carbonatação, juntamente com a morfologia dessas fases carbonatadas, são responsáveis por controlar o desempenho mecânico dos sistemas MgO carbonatados e, assim sendo, o desenvolvimento da resistência desses ligantes está associado ao aumento da densidade da amostra (SONAT e UNLUER, 2017).

Dessa forma, é possível capturar CO₂ nos carbonatos de magnésio gerados, aumentando a resistência à água, com capacidade máxima de “sequestro” de carbono maior do que a do cimento Portland (110% e 58%, respectivamente), podendo ser utilizado para aplicações como unidade de alvenaria porosa e produtos de concreto pré-moldado devido à vantagem de ganhar resistência por meio da carbonatação. Nos cimentos de MgO reativo, uma umidade relativa (UR) de cerca de 78% e a escolha da proporção ideal de água para cimento são essenciais para fornecer água suficiente para as reações de hidratação e carbonatação, porém sem inibir a difusão do CO₂. Ademais, outros fatores afetam a carbonatação, como as condições e tempo de cura (temperatura, umidade relativa, duração), pois a carbonatação prolongada pode afetar negativamente as propriedades mecânicas, e uso de aditivos, que pode promover efetivamente as reações de carbonatação (MENG *et al.*, 2023).

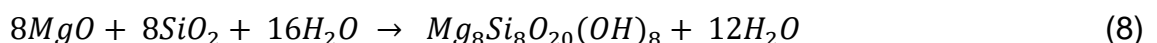
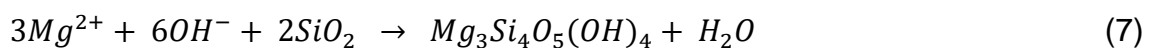
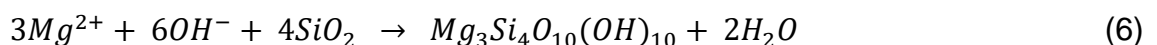
Também foi investigado o potencial de reciclagem e reutilização de concretos à base de cimento de MgO reativo (RMC, do termo em inglês “*reactive MgO cement*”) carbonatado. A reciclagem envolve a conversão das fases finais do processo de carbonatação (HMCs) em fases iniciais (MgO) através da calcinação sob

temperaturas elevadas, enquanto a “reutilização” está relacionada à preparação e ao uso de amostras recicladas para o mesmo propósito das amostras iniciais. Quando submetidas a altas temperaturas, as fases carbonáticas ($MgCO_3$ e HCMs) podem se decompor novamente em MgO, e esse reprocessamento de materiais pode proporcionar benefícios econômicos e ambientais, como a redução na extração de matérias-primas (SONAT *et al.*, 2017).

Ainda no contexto da reciclagem e reutilização, é importante considerar fatores como a possibilidade de alterações na reatividade do MgO e nas propriedades dos agregados, visto que temperaturas elevadas podem enfraquecer os agregados, reduzindo a resistência e aumentando a porosidade e a absorção de água. Apesar disso, foi relatado que a calcinação entre 700-900°C é viável para a reciclagem, embora tenha sido observada uma redução média de 15 a 20% na resistência, atribuída às mudanças na reatividade do MgO e à redução no tamanho dos agregados. Essa queda na resistência poderia ser minimizada por meio da separação dos agregados da pasta de cimento circundante antes do processo de reciclagem, permitindo a manutenção da integridade do agregado e, simultaneamente, minimizando a perda de resistência e o uso de energia durante o processo de reciclagem, porém é necessário a realização de mais estudos em relação ao reaproveitamento desse material (SONAT *et al.*, 2017).

Agora, em relação aos sistemas de MgO – SiO₂ – H₂O envolvendo misturas de MgO com uma fonte de sílica, principalmente com a utilização de sílica ativa devido ao seu ótimo desempenho, foi relatado que a reação da brucita ($Mg(OH)_2$) com a sílica ativa leva à formação de gel de MSH à temperatura ambiente, sendo o principal responsável pela resistência da mistura, e com potencial como um novo material para ser utilizado na construção e de forma mais sustentável do que o CP (JIN e AL-TABBAA, 2014; RUAN e UNLUER, 2017; SIMONI *et al.*, 2023).

A microestrutura e a composição química do MSH estão relacionadas com a proporção dos reagentes e regimes de cura hidrotérmica (TRAN e SCOTT, 2017). Análises de microestrutura sugerem reações químicas potenciais, formando o gel de MSH à temperatura ambiente (Eq. (6), (7) e (8)) (LI *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2014):



Foram estudadas amostras a 20, 50 e 70° C, com proporções de MgO para SiO_2 de 0,7 a 1,6. As amostras a 20° C foram colocadas em um agitador horizontal, enquanto que para 50° C e 70° C foram agitadas manualmente por uma semana. Notou-se que a formação de MSH é um processo lento, sendo observado no primeiro dia a rápida dissolução de MgO e a precipitação de brucita e uma pequena quantidade de MSH, com uma dissolução mais lenta da sílica ativa, porém com soluções mais equilibradas em relação à sílica amorfa após uma semana ou mais. Após 2 dias, as soluções estavam subsaturadas em relação à brucita, indicando que a dissolução dela é a etapa limitante da taxa para a formação de MSH (BERNARD *et al.*, 2017).

Estudos sobre a utilização de outras fontes de sílica (além da sílica ativa) em sistemas à base de MgO vêm sendo realizados. Em um deles, foi feita a comparação do uso da SA (um tipo de sílica amorfa) e da farinha de sílica (que contém principalmente sílica cristalina) em combinação com óxido de magnésio, sendo observada uma melhor reação da SA com o MgO em relação à farinha de sílica (sílica cristalina) e o MgO, devido à presença de sílica amorfa (JIN e AL-TABBAA, 2014).

Assim, com base em literaturas anteriores, percebe-se que a maior parte dos estudos está relacionada à sílica ativa como sendo a principal fonte de sílica para a utilização em sistemas à base de MgO devido ao seu ótimo desempenho.

3.5 Estudos de cimentos à base de Óxido de Magnésio e Sílica Ativa

O uso de materiais alternativos ao CP nos sistemas $MgO - SiO_2 - H_2O$ vem se tornando uma boa opção na produção de MSH devido ao seu alto teor de SiO_2 solúvel em condições alcalinas, além de apresentar um baixo impacto ambiental, se mostrando uma alternativa sustentável ao CP (SONAT e UNLUER, 2019).

Estudos anteriores relataram o uso de MgO reativo em combinação com a SA como sendo as principais fontes de magnésio e sílica, respectivamente, para formar o MSH em misturas cimentícias (JIN e AL-TABBAA, 2014; LI *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2014). A mistura de MgO, SA e água resulta em MgO hidratado para formar brucita, que simultaneamente reage com a sílica dissolvida e leva à formação do MSH em temperatura ambiente (JIN e AL-TABBAA, 2014), além de fornecer características de ligação semelhantes ao ligante convencional de cimento Portland (TRAN e SCOTT, 2017; ZHANG *et al.*, 2014). Em um estudo com amostras contendo MgO e SA em seis

proporções molares diferentes de Mg/Si (0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,3 e 1,7), foi relatado que o MSH é o principal produto de hidratação após um ano de cura a 20° C ou três meses de cura a 50° C (NIED *et al.*, 2016).

A formação, extensão e propriedades finais do gel de MSH vão depender de parâmetros como a composição química e as propriedades das matérias-primas, a relação Mg/Si inicial, as condições de cura, uso de aditivos (SONAT e UNLUER, 2019), e cristalinidade e reatividade da sílica (JIN e AL-TABBAA, 2014). Ademais, foi relatado que em misturas contendo alto teor inicial de MgO, pode-se ter MSH com MgO não reagido e brucita ($Mg(OH)_2$) (SONAT e UNLUER, 2017), enquanto que para proporções mais baixas de Mg/Si tem-se a presença de sílica não reagida (NIED *et al.*, 2016), sendo notada a presença de brucita em amostras reativas nos sistemas de MgO – SiO₂ mesmo após 90 dias de cura (LI *et al.*, 2017).

A sílica cristalina apresenta reação limitada com o MgO, com valores baixos de resistência (4 MPa em 90 dias), sendo mais baixos do que em relação às amostras puramente baseadas em MgO; enquanto que a sílica amorfa apresentou graus de reação e desenvolvimento de resistência mais elevados (JIN e AL-TABBAA, 2014).

Também foi analisada a influência de diferentes condições de cura por 56 dias em concretos utilizando 50% MgO e 50% SA, com 60% em peso de agregados graúdos e 40% de aglomerante: cura selada (com UR de 95%, temperatura ambiente e concentração de CO₂ ambiente) e cura carbonatada (temperatura ambiente e 10% de concentração de CO₂). Em ambas foi observado um ganho contínuo de resistência, atribuído à formação de MSH ao longo dos 56 dias de cura. A cura por carbonatação aumentou em até 57% a resistência das amostras de MgO – SiO₂, além de um rápido desenvolvimento de resistência inicial, o que pode ser atribuído à formação simultânea de diferentes fases carbonáticas, tais como nesquehonita, artinita, hidromagnesita e dippingita (conforme as equações (2) a (5)), densificando a microestrutura das amostras, o que possibilitou o desenvolvimento de uma rede carbonática densa e interconectada dentro das amostras submetidas à cura por carbonatação, porém com necessidade de mais estudos sobre o assunto. Vale dizer que os resultados de resistência à compressão foram apoiados por análises microestruturais, como DRX e TG (SONAT e UNLUER, 2017).

Em uma pesquisa com MgO em pó (com teor de 87,81% de MgO, 5,61% de SiO₂ e 3,22% de CaO) e SA (com teor de 97,34% de SiO₂), foram estudadas diferentes

condições de cura para as proporções em massa de MgO/SA de 2:3, 1:1 e 3:2 (razões molares Mg/Si de 1,0, 1,5 e 2,25, respectivamente), com relação água/aglutinante de 0,5 e uso de $NaPO_3$ como agente redutor de água. Para a caixa de cura padrão (temperatura $20 \pm 3^\circ C$ e umidade relativa $\geq 90\%$), com desmolde após 24 horas e posterior cura nas mesmas condições, foram obtidas resistências à compressão aos 90 dias variando entre 47,81 MPa a 51,68 MPa. Nesse mesmo estudo, para o ensaio de DRX observou-se pequenas alterações a longo prazo nas posições dos picos e intensidades das fases em todas as amostras sob diferentes condições de cura. Para a análise de termogravimetria (TG), a perda de peso ΔM do cimento hidratado de silicato de magnésio (com MgO e SA) foi dividida em 4 etapas: $\Delta M1$: $30^\circ C - 250^\circ C$ (perda de peso da água livre e ligada); $\Delta M2$: $250^\circ C - 400^\circ C$ (decomposição por desidratação do $Mg(OH)_2$); $\Delta M3$: $400^\circ C - 600^\circ C$ (dissociação hidroxila do gel de MSH); $\Delta M4$: $600^\circ C - 1000^\circ C$ (decomposição de $MgCO_3$ e silanol Si - OH). As amostras curadas em alta temperatura apresentaram uma taxa de crescimento dos produtos de hidratação significativamente menor (devido à conexões de interface mais fracas entre a SA e o gel MSH a longo prazo) quando comparada com a cura em caixa padrão para idades de 3 para 90 dias, porém com um melhor grau de hidratação inicial e uma grande quantidade de gel MSH, que conectou firmemente as substâncias na matriz e aumentou significativamente a densidade estrutural, resultando em uma redução significativa na porosidade e melhorando a resistência inicial das amostras. Com relação à MEV, observou-se que as partículas de SA começaram a se dissociar, formando uma camada de encapsulamento. Após 90 dias de cura na caixa padrão, a microestrutura apresentou densificação, que foi atribuída à formação de uma quantidade significativa de gel MSH, que encapsulou a sílica (LUO *et al.*, 2023).

Em uma outra análise envolvendo pastas contendo MgO em pó (levemente calcinado, com teor de MgO de 84,67% e de SiO_2 de 9,67%), SA (com teor de SiO_2 de 97,34%) e hexametáfosfato de sódio (2% da massa total dos materiais ligantes), com relação w/b = 0,50 e razão em massa de 1:1 de MgO em pó para SA, foram estudados os impactos de diferentes umidades de cura na resistência à compressão. O maior valor de resistência obtido foi para a UR de 75%, porém com pequenas diferenças aos 28 dias para a umidade de 58% (42,29 MPa e 41,02 MPa, respectivamente). Já para umidades relativas de 33%, 97% e cura submersa notou-se reduções significativas na resistência à compressão (29,21 MPa, 24,57 MPa e 15,37 MPa respectivamente), em comparação com a UR de 75% (LI *et al.*, 2024).

Um estudo analisou dois tipos de MgO reativo (MgO-1 e MgO-2) e diferentes proporções de MgO e SA para a produção de pastas sem uso de aditivo, com cura em tanque de água deionizada. Para a proporção com 70% MgO e 30% SA, com w/b de 0,70 e 0,73 para o MgO-1 e MgO-2, respectivamente, foram encontrados valores baixos de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de 1 MPa e 5 MPa (para o MgO-1) e de 4 MPa e 5,5 MPa (para o MgO-2). Para a proporção com 50% MgO e 50% SA, com w/b de 0,79 e 0,87 para o MgO-1 e MgO-2, respectivamente, foram encontrados valores baixos de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de 2 MPa e 9 MPa (para o MgO-1) e de 2 MPa e 10,5 MPa (para o MgO-2). Além disso, a proporção com 50% MgO e 50% SA, mesmo com uma relação w/b maior (o que poderia enfraquecer a pasta), apresentou os maiores valores de resistência para todas as idades de teste (7, 28, 56 e 90 dias) em relação à pasta com 70% MgO e 30% SA, exceto na idade de 7 dias para o MgO-2. Assim, concluiu-se que a resistência à compressão aumentou com o aumento da quantidade de SA (até 50%) e do tempo de cura até 56 dias, visto que a cura posterior não ocasionou em nenhum aumento de resistência, chegando até a ocorrer uma redução em alguns casos, e o aumento da proporção de SA levou à um aumento na relação água/aglomerante (w/b) (JIN e AL-TABBAA, 2014).

Também foi investigada a produção de pastas com diferentes proporções de MgO e SA, com w/b = 0,40, 3% de aditivo superplastificante à base de polímero (Viscocrete-5-555) para obter trabalhabilidade adequada e cura em água a 20°C, sendo a demanda de água muito maior em comparação ao CP devido ao alto teor de SA (para evitar relações w/b muito elevadas, foi utilizado o aditivo). Foi relatado que, contraditoriamente a alguns estudos, o aumento do teor de SA provocou uma redução na resistência à compressão, com valores de 42,8 MPa, 39,3 MPa e 29,9 MPa aos 28 dias, para as proporções com 40% SA, 50% SA e 60% SA, respectivamente. Sendo assim, a pasta com 60% MgO e 40% SA foi relatada como a proporção ideal de ligante para estes dois materiais. Percebeu-se também que a formação de MSH não é o único fator contribuinte para a resistência do aglutinante, dependendo também da trabalhabilidade, densidade de compactação e teor de água. Nas análises de DRX, todas as amostras de pastas mostraram picos de brucita (diminui com a redução do teor de MgO) distintos após 1 dia de hidratação (independentemente da relação MgO/SiO₂), enquanto que picos amplos da SA foram observados entre 20° e 30° (2θ). Para a pasta com 40% MgO e 60% SA, verificou-se a presença de SiO₂ cristalino, e o

consumo de praticamente toda a brucita após 28 dias, diferentemente das proporções com menores teores de SA (TRAN e SCOTT, 2017).

Em outro estudo também foi observado um comportamento semelhante para a pasta contendo 40% MgO e 60% SA, curada em caixa selada e com UR acima de 98% para evitar que as amostras secassem, verificando-se que toda a brucita reagiu com a SA e se converteu em gel de MSH, desde que tenha água em quantidade suficiente, além do uso de aditivo superplastificante em 1% para melhorar a trabalhabilidade. Foi observado que a resistência à compressão aumenta significativamente com a redução da relação w/b. Para as idades de 7, 14, 28 e 90 dias encontrou-se valores próximos de 13, 17, 24 e 32 MPa, respectivamente (w/b = 0,8), e de 20, 42, 48 e 54 MPa, respectivamente (w/b = 0,6) (ZHANG *et al.*, 2014).

Ademais, em testes iniciais com pastas de 40% MgO e 60% SA, relação w/b igual a 0,50 e 1% de aditivo superplastificante (hexametáfosfato de sódio), foram observadas rachaduras quando tais amostras foram secas, o que pode ser resultado da perda de água da estrutura do MSH. Posteriormente, modificou-se a relação w/b para 0,60 e com 2% de aditivo, com teor de areia variando de 50% a 75% em peso, sendo observada, nas argamassas, que a retração por secagem aumentou para maiores teores de água e/ou menor teor de areia, sendo consistente com as observações para as argamassas à base de CP e, mantendo as proporções de MgO e SA, percebeu-se que o aumento do teor de areia resultou na diminuição da resistência à compressão (ZHANG *et al.*, 2016).

Em outro estudo de pastas e argamassas, visando fornecer uma base experimental e teórica, foram analisadas propriedades físico-químicas de materiais cimentícios MgO-SA quando expostos a altas temperaturas (100° C, 200° C, 300° C, 400° C, 600° C e 800°C), por meio de técnicas como DRX, espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) e microscopia eletrônica de varredura-espectômetro de energia (SEM-EDS). As proporções analisadas foram: 40% MgO + 60% SA, 50% MgO + 50% SA e 60% MgO + 40% SA, ambas com relação w/b = 0,45, redutor de água de alta gama tipo policarboxilato (HRWR) igual a 2%, e relação areia/ligante igual a 2,0 para as argamassas. Concluiu-se que as amostras MgO-SA têm boa resistência a altas temperaturas, com resistência à compressão residual entre 43,19% a 66,18%. Notou-se um aumento do volume macroscópico dos poros em temperaturas mais elevadas; ademais, foi relatado que o gel de MSH tem uma estabilidade térmica mais forte do que a brucita (MA *et al.*, 2022).

Existem casos nos quais foram estudadas proporções diferentes de MgO e SA (60% MgO e 40% SA; 50% MgO e 50% SA) assim como relações w/b distintas (0,50 e 0,60) na produção de pastas (SHAH e SCOTT, 2021a). Observou-se que o aumento da relação w/b de 0,5 para 0,6 mantendo-se a mesma proporção de 60% MgO e 40% SA, levou a reduções significativas nas resistências em todas as idades, principalmente em idades mais avançadas (36 MPa para 23 MPa, respectivamente, em 90 dias). Além disso, mantendo a relação w/b igual a 0,5, porém analisando-se dois casos (60% MgO e 40% SA; e 50% MgO e 50% SA), percebeu-se que o aumento da quantidade de SA ocasiona uma diminuição na resistência à compressão das amostras (SHAH e SCOTT, 2021a).

Foram encontradas pesquisas que utilizaram diferentes proporções: 40% MgO e 60% SA (ZHANG *et al.*, 2014; ZHANG *et al.*, 2016); e 50% MgO e 50% SA (SONAT e UNLUER, 2019). Em uma delas (ZHANG *et al.*, 2014), verificou-se uma alta demanda de água nos ensaios realizados, o que levou ao estudo do efeito da adição de um dispersante/superplastificante, o hexametáfosfato de sódio (NaHMP), com o intuito de melhorar a fluidez dos sistemas de MgO e SA (WEI *et al.*, 2011; ZHANG *et al.*, 2014), assim como constatado também em trabalhos anteriores.

Em um outro caso, foi utilizado 4% (do ligante total) de aditivo hexametáfosfato de sódio, com 70% de MgO e 30% SA e relação w/b de 0,60 e 0,75 para pastas e argamassas, respectivamente, e agregado miúdo 0,5:1 (do volume de cada argamassa) com cura em temperatura de 30° C e UR de 65% (até as idades de teste de 3, 7 e 28 dias). Entretanto, só foram estudadas a resistência à compressão das argamassas, que ganharam a maior parte da sua resistência nos primeiros 3 dias, com 24,8 MPa (postulando a formação de MSH ao invés de brucita), indicando que a produção de gel de ligação (por hidratação ou carbonatação) acelera nos primeiros dias e depois diminui significativamente, sem ganhos significativos nas demais idades (chegando até cerca de 28 MPa para a idade de 28 dias). A alta resistência inicial pode ser devido ao alto valor da relação w/b, o que facilita a rápida hidratação enquanto ocorre a formação de uma barreira contra os produtos de hidratação, inibindo outras reações. Já o aditivo foi responsável por impedir a precipitação da brucita e fornecer mais íons Mg^{2+} para a formação de gel de MSH (TAJ *et al.*, 2022).

Foi relatado que a adição de hexametáfosfato de sódio reduz a água necessária nos sistemas de MgO/SA, melhorando a resistência à compressão (acima de 70 MPa com idade de teste de 90 dias e próximo a 70 MPa aos 28 dias) e possibilitando a

produção de pastas com uma proporção w/b igual a 0,4, semelhante à proporção padrão do cimento Portland, além do aumento de resistência com o tempo, indicando a hidratação continua ao longo dos 90 dias analisados (ZHANG *et al.*, 2014). A relação w/b tem grande influência na resistência porque o excesso de água na pasta de cimento leva a um aumento da porosidade, o que “enfraquece” o material (VANDEPERRE *et al.*, 2008). Em outro estudo de pastas de cimento MgO/SiO_2 também analisou a importância do aditivo de hexametáfosfato de sódio, adicionado à água da mistura antes da adição de MgO e SiO_2 , resultando em produtos de reação extensos, alta resistência à compressão e baixa porosidade (JIA *et al.*, 2016).

Ademais, mesmo pequenas alterações na proporção de MgO/SiO_2 influenciam a resistência das misturas endurecidas em virtude de alguns aspectos, como a redução da gravidade específica do ligante com o aumento no teor de SA, o impacto da mudança da razão molar Mg/Si nas proporções de gel de MSH e brucita nos produtos de hidratação e a diminuição da trabalhabilidade com altos teores de SA (TRAN e SCOTT, 2017).

Dessa forma, percebe-se que existem muitos estudos sobre o uso da sílica ativa com óxido de magnésio, porém o uso destes materiais sem aditivo ainda não foi totalmente investigado até o momento, visto que se trata de um assunto relativamente recente e, portanto, tal tema se mostra relevante para o meio científico, possibilitando redução da relação w/b da mistura, o reaproveitamento de resíduos industriais e a mitigação dos impactos ambientais, além de ser uma alternativa sustentável ao CP.

4 METODOLOGIA

A revisão de literatura foi responsável por subsidiar a parte prática deste estudo (produção das pastas), com a busca por artigos, dissertações, teses, livros e materiais para reunir informações sobre o tema. A seguir serão apresentados os materiais utilizados, as proporções analisadas, o processo de preparação das pastas, as condições de cura e os ensaios realizados.

4.1 Materiais

- **Óxido de Magnésio**

O óxido de magnésio usado na preparação das pastas, mostrado na Figura 2, foi fabricado pela empresa Minérios Ouro Branco. As informações e dados sobre o material estão mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização do óxido de magnésio utilizado nas pastas

Propriedade	Especificado	Encontrado	Método
Aspecto	Pó fino	Pó fino	Visual
Retenção # 100	4,30% MÁX.	0,04%	ASTM-C-110-94a
Absorção à óleo	30,00 – 40,00%	36,58%	ASTM-D-1483-84
Absorção à óleo	40,00 – 50,00%	42,16%	ASTM-D-281-84
Densidade aparente	0,70 – 0,90 g/mL	0,74 g/mL	BS-1460-1967
Volume aparente	30,00 – 45,00 mL/40g	40,00 mL/40g	BS-1460-1967
Umidade	1,00% MÁX.	0,22%	ASTM-C-25-94a

Fonte: MINÉRIOS OURO BRANCO (2023)

Figura 2 - MgO utilizado para a preparação das pastas



Fonte: Próprio autor

- **Sílica ativa**

A sílica ativa utilizada na preparação das pastas, conforme a Figura 3, foi fabricada pela Companhia de Ferro “Ligas da Bahia” (FERBASA). As informações e dados sobre a SA estão mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização da sílica ativa utilizada nas pastas

Sílica Ativa	
Tamanho médio de partícula	0,40 μm
Retido na peneira 45 μm (micrômetro)	$\leq 10\%$
Índice de atividade pozolânica no Cimento Portland (aos 7 dias)	$> 105\%$
Área específica BET	15 a 30 m^2/g
SiO_2	$> 85\%$
Na_2O	$< 1,5\%$
Umidade	$< 3,0\%$
Perda ao fogo	$< 6,0\%$

Fonte: ECOIMPER (2023)

Figura 3 - SA utilizada para a preparação das pastas



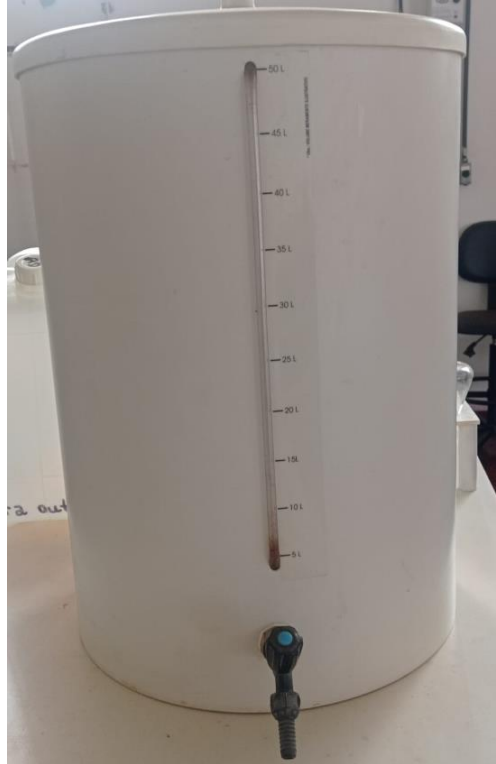
Fonte: Próprio autor

Devido às suas propriedades químicas (alto teor de SiO_2) e físicas (superfície específica média de 20 m^2/g), a SA é proposta como um material alternativo para melhorar as características de concretos e argamassas de revestimento superficial (Ecoimper, 2023), sendo uma excelente pozolana, principalmente devido ao alto índice de material amorfo.

- **Água**

A água utilizada para a produção das pastas foi a água deionizada, produzida no Laboratório de Engenharia Civil da FEIS/UNESP (Figura 4)

Figura 4 - Tanque de água deionizada



Fonte: Próprio autor

4.2 Preparação das pastas e condições de cura

Foram estudadas diferentes proporções de MgO e SA (0,7/0,3; 0,6/0,4; 0,5/0,5; 0,4/0,6) e de água/aglomerante (w/b) (0,50; 0,60; e 0,70), visando obter as melhores proporções. Sendo assim, foram confeccionadas pastas utilizando o óxido de magnésio e a sílica ativa, como aglomerante, e água, ou seja, sem o uso de aditivo superplastificante.

Para a preparação das pastas, foi adotado o seguinte procedimento:

- 1) Pesagem dos materiais;
- 2) Umedecimento da cuba da argamassadeira;
- 3) Adição de toda a água na argamassadeira;
- 4) Inserção de forma gradativa do óxido de magnésio e da sílica ativa e mistura dos materiais por 10 minutos.

Após o processo de preparação, transferiu-se a pasta para formas metálicas nas dimensões 50 x 50 x 50 mm (Figura 5) ou nas dimensões 25 x 25 x 285 mm (para o ensaio de expansão linear), conforme a NBR 15261 (ABNT, 2005). Utilizou-se uma camada de vaselina industrial como desmoldante, com o adensamento em mesa vibratória com frequência de 40 hertz. No caso das pastas com relação w/b de 0,7, devido ao seu estado mais plástico, o preenchimento ocorreu em três etapas intercaladas com 5 golpes de queda em bancada de concreto.

Devido à finura dos compostos utilizados, a mistura tende a ser mais seca, necessitando de uma grande quantidade de água ou o uso de um aditivo superplastificante para melhorar a trabalhabilidade. Para este trabalho, optou-se por não utilizar o aditivo superplastificante nas misturas (para não afetar as reações) e, com isso, as pastas feitas com uma relação w/b de 0,5 apresentaram baixa trabalhabilidade, não sendo possível a sua moldagem. Sendo assim, foram utilizadas apenas as relações w/b de 0,6 e 0,7.

Figura 5 - Molde metálico nas dimensões 50 x 50 x 50 mm

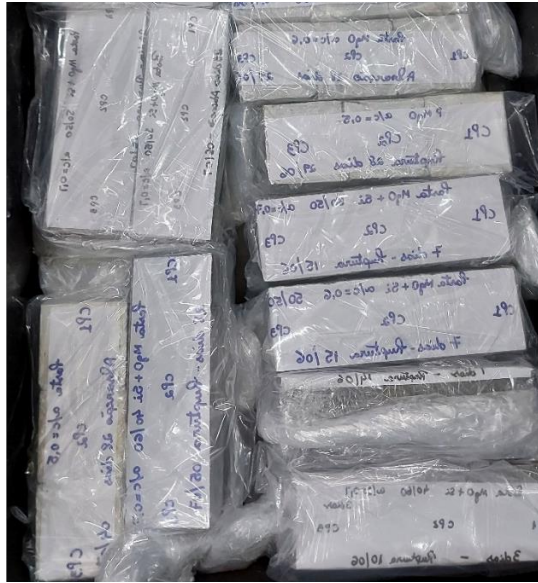


Fonte: Próprio autor

Em relação às condições de cura até as idades de teste, o procedimento adotado está descrito abaixo:

- 1) Armazenamento dos corpos de prova (CPs) em câmara úmida e em condição selada (CPs com plástico filme e envoltos em um saco plástico – Figura 6);
- 2) Desmolde dos CPs após 24 horas;
- 3) Cura selada em câmara úmida até as idades de teste, com as devidas identificações.

Figura 6 - Corpos de prova em condição selada e com identificação



Fonte: Próprio autor

Sobre a nomeação das pastas:

- 1) Indicação da sílica ativa (Si: Sílica ativa);
- 2) Proporção do material na mistura total (exemplo: Si60 indica a utilização de 60% de sílica ativa na mistura, ou seja, corresponde à proporção de 40% MgO + 60% SA);
- 3) Relação w/b utilizada (exemplo: Si40_0,6 indica a proporção de 60% MgO + 40% SA e relação w/b = 0,6).

4.3 Resistência à compressão

O comportamento mecânico das pastas foi avaliado mediante a realização do ensaio de resistência à compressão, no qual foram moldados três corpos de prova nas dimensões 50 x 50 x 50 mm para cada proporção de MgO e SA estudada e para cada relação w/b, em idades de 1, 3, 7 e 28 dias, segundo a NBR 7215 (ABNT, 2019).

Para o ensaio, foi utilizada a Prensa EMIC 200 toneladas, sendo operada conforme mostra a Figura 7 (a), e o ensaio é realizado em uma outra parte (integrada com o local de controle da carga aplicada), conforme a Figura 7 (b), sendo que os resultados da resistência à compressão já são obtidos diretamente por meio de um sistema com um computador conectado à prensa.

Figura 7 - Prensa EMIC para ensaio de resistência à compressão



(a) Operação da prensa EMIC



(b) Local de inserção dos CPs para o ensaio de resistência à compressão

Fonte: Próprio autor

4.4 Ensaios adicionais

Para a proporção de MgO/SA e do fator w/b que obteve os melhores valores de resistência à compressão (pasta "Si40_0,6"), foram executados ensaios adicionais de DRX (Difração de raios X), MEV (Microscopia eletrônica de varredura) de fratura, TG (Termogravimetria), FTIR (Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier) e expansão linear, com o intuito de analisar tanto as características físicas quanto as características químicas dos materiais e das pastas elaboradas.

Além disso, para a realização dos ensaios microestruturais de DRX, MEV, FTIR e TG, foi necessária a interrupção dos processos de hidratação das pastas pelo método de troca de solvente em cada uma das idades conforme os ensaios analisados. Para isso, foi adotado o seguinte procedimento:

1) Fragmentos advindos dos ensaios mecânicos foram macerados até virar pó, submetendo o pó obtido à imersão em acetona por 15 minutos;

2) Posteriormente, o material foi pré-secado à vácuo por 3 minutos (para remoção da acetona);

3) Em seguida, foi utilizada uma estufa para secagem e esterilização à 60° C por 30 minutos;

4) Para os ensaios de DRX, FTIR e TG, após esse período, o material resultante foi macerado novamente visando a sua redução a um pó fino capaz de passar em uma peneira de 75 μm ;

5) Por fim, o material passante foi armazenado em microtubos de centrifugação (tipo eppendorf) de 1,5 ml para posterior utilização.

4.4.1 Difração de raios X (DRX)

Foi realizado o ensaio de difração de raios X nas idades de 1, 7 e 28 dias do MgO e da SA utilizados neste estudo. Também foi feito o ensaio de DRX para a proporção de 60% MgO + 40% SA e relação w/b = 0,60, visando compreender os processos que ocorreram ao longo do tempo. Utilizou-se um equipamento do modelo XRD-6000 da empresa Shimadzu, com comprimento de onda $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ e uma taxa de varredura de 2°/min na faixa de 10° a 70°, a 40 kV e 30 mA.

4.4.2 Microscopia de varredura eletrônica (MEV)

O ensaio de MEV foi realizado para as pastas Si40_0,6 e Si40_0,7 na idade de 28 dias, com o intuito de compreender a queda de resistência ocorrida com o aumento da relação w/b. Tal ensaio permite a visualização, captura e análise de imagens de alta resolução da superfície das amostras fraturadas. Utilizou-se um microscópio eletrônico de varredura EVO LS15 – Zeiss, com a disposição das amostras em suportes de alumínio devidamente recobertos com uma fita condutiva de carbono e metalizados com ouro.

4.4.3 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

O ensaio de FTIR foi realizado para as idades de 1, 7 e 28 dias tanto para a sílica ativa antes da mistura (material anidro) quanto para a pasta Si40_0,6, objetivando compreender melhor sobre os processos ocorridos ao longo do tempo. Tal ensaio permite entender as diferentes ligações/estruturas químicas (moléculas) presentes na

amostra. Foi utilizado o espectrômetro Bruker, modelo Invenio®, equipado com módulo ATR de cristal de diamante, com a realização das medidas no intervalo de 400 a 4000 cm^{-1} , com resolução de 2 cm^{-1} e 120 scans.

4.4.4 Termogravimetria (TG)

O ensaio de termogravimetria mostra a variação da massa de uma determinada amostra em relação à variação de temperatura e, para este trabalho, foi realizado para as amostras com as maiores resistências à compressão, nas idades de 1, 7 e 28 dias, buscando compreender os processos ocorridos ao longo do tempo. Para sua realização, foi utilizado um equipamento da empresa TA Instruments, modelo SDTQ600. Ademais, as medidas foram realizadas na faixa de temperatura de 25°C à 1000°C, empregando atmosfera de nitrogênio com fluxo de 100 ml/min; a rampa de aquecimento empregada foi de 10°C/min; e a massa de material foi de 10 mg, com a utilização de cadinhos de alumina em todas as medidas.

4.4.5 Expansão linear

As análises do ensaio de expansão linear foram feitas mediante a NBR 15261 (ABNT, 2005), sendo realizado para as idades de 1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias para a proporção com os melhores resultados de resistência à compressão (60% MgO + 40% SA e relação $w/b = 0,60$). Foi empregado um aparelho da marca Solotest, com relógio de precisão de 0,001 mm, sendo calibrado antes de cada medição e as amostras armazenadas novamente em cura selada (após a medição) até a próxima leitura.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado para todas as proporções definidas na metodologia (tópico 4), porém, como comentado anteriormente no tópico 4.2, as pastas com relação $w/b = 0,5$ apresentaram baixa trabalhabilidade, não sendo possível a sua moldagem. Além disso, a pasta com proporção de 40% MgO + 60% SA e $w/b = 0,6$ (pasta Si60_0,6) também não apresentou a trabalhabilidade necessária para a sua moldagem e, portanto, não foi possível a realização do ensaio de resistência à compressão para tal proporção.

Sendo assim, os resultados individuais, as resistências médias, os desvios-padrão (DP) e os coeficientes de variação (CV) para as demais proporções de pastas são apresentados a seguir nas Tabelas 3, 4, 5 e 6, respectivamente:

Tabela 3 - Resistências individuais (MPa) das pastas estudadas

Resistências individuais (MPa)							
Idade	Pasta Si60_0,7	Pasta Si50_0,6	Pasta Si50_0,7	Pasta Si40_0,6	Pasta Si40_0,7	Pasta Si30_0,6	Pasta Si30_0,7
1 dia	1,83	2,85	1,61	3,01	1,24	3,55	1,83
	1,78	2,26	1,29	2,37	1,29	4,14	1,61
	1,83	2,69	1,78	3,01	1,56	3,88	1,67
3 dias	3,77	8,83	5,65	9,33	5,83	6,46	3,28
	3,98	9,53	5,54	8,61	5,54	6,89	4,58
	4,25	8,02	4,31	9,37	5,69	7,70	4,58
7 dias	6,35	12,65	9,85	16,04	12,70	19,92	11,47
	6,19	11,47	9,64	16,80	12,65	17,17	11,90
	5,98	12,54	8,45	17,12	12,22	16,74	13,08
28 dias	11,41	20,13	13,30	19,06	12,54	15,45	11,41
	10,50	19,11	16,20	19,70	12,11	17,28	12,65
	10,93	17,71	14,75	17,06	12,87	18,30	10,87

Fonte: Próprio autor

Tabela 4 - Resistências médias (MPa) das pastas estudadas

Resistência média (MPa)							
Idade	Pasta Si60_0,7	Pasta Si50_0,6	Pasta Si50_0,7	Pasta Si40_0,6	Pasta Si40_0,7	Pasta Si30_0,6	Pasta Si30_0,7
1 dia	1,81	2,60	1,56	2,80	1,36	3,86	1,70
3 dias	4,00	8,79	5,17	9,10	5,69	7,02	4,15
7 dias	6,17	12,22	9,31	16,65	12,52	17,94	12,15
28 dias	10,95	18,98	14,75	18,61	12,51	17,01	11,64

Fonte: Próprio autor

Tabela 5 - Desvio Padrão (DP) para as pastas estudadas

Desvio padrão (DP)							
Idade	Pasta Si60_0,7	Pasta Si50_0,6	Pasta Si50_0,7	Pasta Si40_0,6	Pasta Si40_0,7	Pasta Si30_0,6	Pasta Si30_0,7
1 dia	0,03	0,31	0,25	0,37	0,17	0,30	0,11
3 dias	0,24	0,76	0,74	0,43	0,15	0,63	0,75
7 dias	0,19	0,65	0,76	0,55	0,26	1,73	0,83
28 dias	0,46	1,21	1,45	1,38	0,38	1,44	0,91

Fonte: Próprio autor

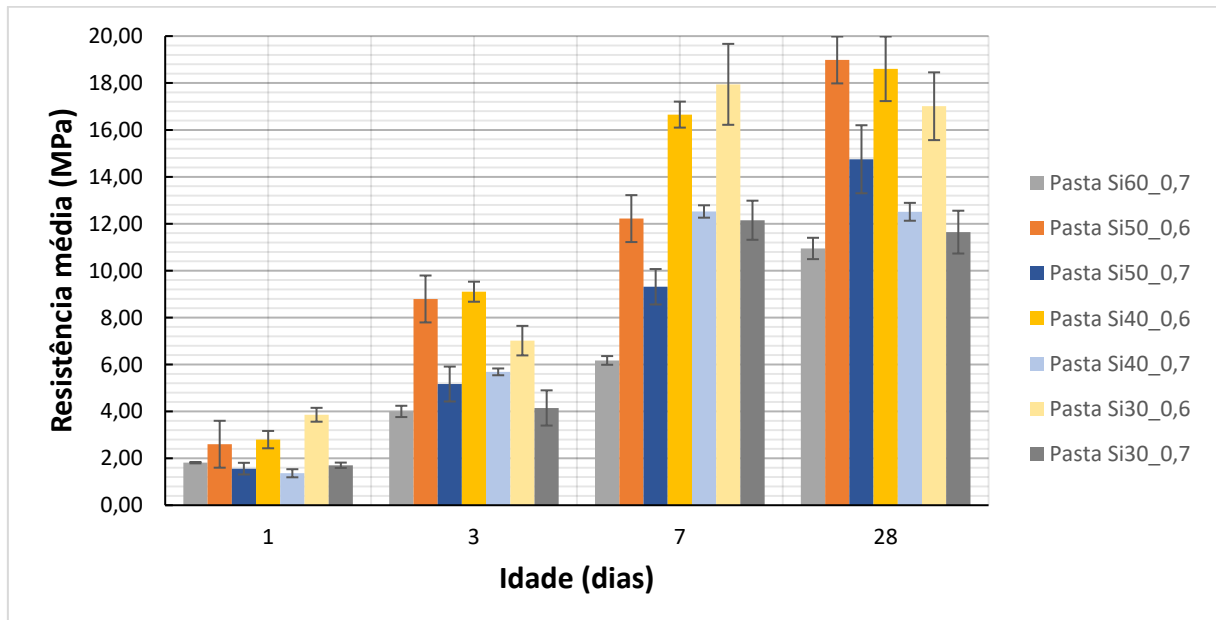
Tabela 6 - Coeficiente de variação (CV) para as pastas estudadas

Coeficiente de variação (CV)							
Idade	Pasta Si60_0,7	Pasta Si50_0,6	Pasta Si50_0,7	Pasta Si40_0,6	Pasta Si40_0,7	Pasta Si30_0,6	Pasta Si30_0,7
1 dia	1,59	11,74	15,95	13,21	12,63	7,67	6,68
3 dias	6,02	8,59	14,40	4,70	2,55	8,97	18,10
7 dias	3,01	5,33	8,11	3,33	2,11	9,62	6,86
28 dias	4,16	6,40	9,83	7,40	3,05	8,49	7,84

Fonte: Próprio autor

Com os dados obtidos, construiu-se um gráfico mostrando a evolução das resistências e a comparação dos resultados para as pastas analisadas, conforme mostrado na Figura 8:

Figura 8 - Evolução da resistência para as pastas estudadas



Fonte: Próprio autor

É possível observar um aumento da resistência à compressão ao longo das idades de teste para a maior parte das proporções estudadas, com exceção das

idades de 7 para 28 dias para as pastas Si40_0,7, Si30_0,6 e Si30_0,7. Esse aumento na resistência à compressão ao longo do tempo sugere a contínua formação de produtos de hidratação, responsáveis pelo ganho de resistência das misturas.

Nota-se também reduções nas resistências com o aumento da relação w/b para todas as idades de teste (1, 3, 7 e 28 dias) e proporções analisadas (40 MgO/60 SA; 50 MgO/50 SA; 60 MgO/40 SA; e 70 MgO/30 SA). Além disso, um alto teor de SA (60%) parece influenciar negativamente a resistência à compressão, obtendo-se os menores valores de resistência da relação w/b = 0,7 para a pasta Si60_0,7.

De modo a embasar os resultados obtidos, foram utilizadas literaturas anteriores para efeitos de comparação.

Foi verificada uma alta demanda de água em literaturas anteriores, o que levou ao estudo do efeito da adição de um dispersante/superplastificante (hexametáfosfato de sódio (NaHMP)), com o intuito de melhorar a fluidez dos sistemas de MgO e SA (ZHANG *et al.*, 2014). A relação w/b tem grande influência na resistência porque o excesso de água na pasta de cimento leva a um aumento da porosidade, o que “enfraquece” o material (VANDEPERRE *et al.*, 2008). Sendo assim, essa abordagem pode ser uma solução para evitar a utilização de relações w/b muito elevadas e, conseqüentemente, baixas resistências à compressão.

Um alto teor de SA leva à diminuição da trabalhabilidade e da resistência à compressão (TRAN e SCOTT, 2017), o que está de acordo com os resultados obtidos para a pasta Si60_0,7 e poderia explicar o fato de não ter sido possível alcançar uma trabalhabilidade adequada para a pasta Si60_0,6 (com maior proporção de SA).

Em um estudo analisou-se dois tipos de MgO reativo (MgO-1 e MgO-2) e diferentes proporções de MgO e SA para a produção de pastas sem uso de aditivo, com cura em tanque de água deionizada. Para a proporção com 70% MgO e 30% SA, com w/b de 0,70 e 0,73 para o MgO-1 e MgO-2, respectivamente, foram encontrados valores baixos de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de 1 MPa e 5 MPa (para o MgO-1) e de 4 MPa e 5,5 MPa (para o MgO-2). Para a proporção com 50% MgO e 50% SA, com w/b de 0,79 e 0,87 para o MgO-1 e MgO-2, respectivamente, foram encontrados valores baixos de resistência à compressão aos 7 e 28 dias de 2 MPa e 9 MPa (para o MgO-1) e de 2 MPa e 10,5 MPa (para o MgO-2). Concluiu-se que a resistência à compressão aumentou com o aumento da quantidade de SA (até 50%) e do tempo de cura até 56 dias, e o aumento da proporção de SA levou à um aumento na relação água/aglomerante (w/b) (JIN e AL-TABBAA, 2014). Comparando com os

resultados obtidos neste trabalho para as mesmas proporções citadas, percebe-se que as relações w/b utilizadas são inferiores à da literatura analisada e as resistências são superiores para as duas idades, o que pode reforçar que o aumento da relação w/b resulta em reduções na resistência à compressão.

Em uma pesquisa, foram estudadas proporções diferentes de MgO e SA (60% MgO e 40% SA; 50% MgO e 50% SA) assim como relações w/b distintas (0,50 e 0,60). Com isso, observou-se que o aumento da relação w/b de 0,5 para 0,6 mantendo-se a mesma proporção de 60% MgO e 40% SA, levou a reduções significativas nas resistências em todas as idades, principalmente em idades mais avançadas (23 MPa e 36 MPa, respectivamente, em 90 dias). Além disso, mantendo a relação w/b igual a 0,5, porém analisando-se dois casos (60% MgO e 40% SA; e 50% MgO e 50% SA), percebeu-se que o aumento da quantidade de SA ocasiona uma diminuição na resistência à compressão das amostras (SHAH e SCOTT, 2021a), o que também pode ser percebido neste trabalho, principalmente no caso da pasta Si60_0,7 (ou seja, com o maior teor de SA), que de modo geral apresentou os menores valores e ganhos de resistência para as idades analisadas.

Além disso, foi investigada a produção de pastas com uma relação w/b = 0,40 e 3% de aditivo para evitar relações w/b muito elevadas. Dessa forma, foi relatado que o aumento do teor de SA provocou uma redução na resistência à compressão, porém alcançando-se valores de resistência muito maiores em comparação com o presente estudo (42,8 MPa, 39,3 MPa e 29,9 MPa aos 28 dias, para as proporções com 40% SA, 50% SA e 60% SA, respectivamente), principalmente devido à menor relação w/b utilizada. Também foi relatada a pasta com 60% MgO e 40% SA como sendo a proporção ideal de ligante, e novamente o teor de água foi apontado como um dos fatores que influenciam a resistência das amostras (TRAN e SCOTT, 2017).

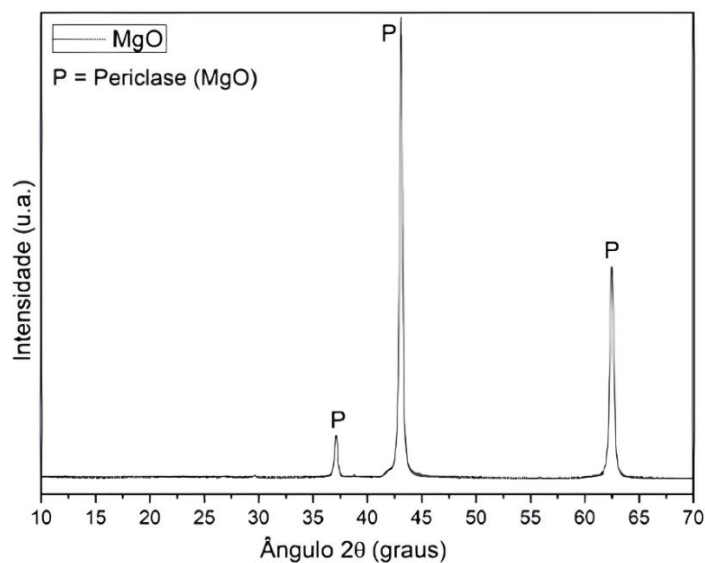
Portanto, a pasta Si40_0,6, com exceção da idade de 28 dias, apresentou melhores resultados de resistência à compressão em relação à pasta Si50_0,6, principalmente na idade de 7 dias (16,65 MPa e 12,22 MPa, respectivamente). Já para a comparação com a pasta Si30_0,6, notou-se um comportamento semelhante ao de um estudo anterior (JIN e AL-TABBAA, 2014), com uma queda na resistência na pasta Si30_0,6 da idade de 7 para 28 dias, apesar de ser esperado um aumento na resistência conforme observado para as demais proporções de pastas (com 40%, 50% e 60% de SA). Sendo assim, com base nas constatações realizadas e nas

informações da literatura, optou-se por utilizar a pasta Si40_0,6 para a realização dos ensaios adicionais.

5.2 Difração de raios X (DRX)

Os resultados do ensaio de DRX do óxido de magnésio e da sílica ativa estão mostrados a seguir (Figuras 9 e 10, respectivamente).

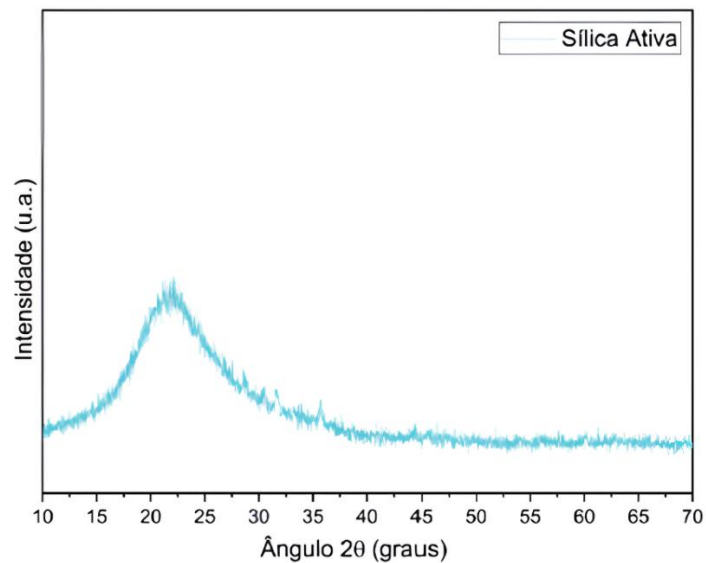
Figura 9 - Difração de raios X do MgO



Fonte: Próprio autor

Assim, é possível observar que o DRX do MgO apresentou picos bem definidos, os quais foram identificados como periclase, característica do MgO, em torno de $2\theta = 37^\circ$, 43° e 63° , estando em concordância ao que foi encontrado em literaturas anteriores (SONAT e UNLUER, 2019; ZHANG *et al.*, 2014). Além disso, em uma outra pesquisa foi relatada a presença de picos de periclase (MgO) em torno de $2\theta = 42,9^\circ$ e $62,3^\circ$ (DHAKAL *et al.*, 2021). Desse modo, o MgO identificado no difratograma obtido é composto em sua maioria pelo óxido “MgO”.

Figura 10 - Difração de raios X da sílica ativa



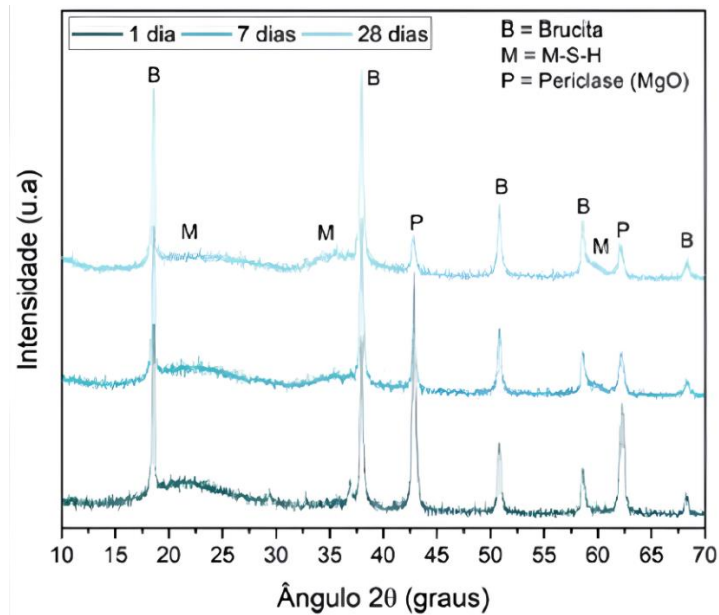
Fonte: Próprio autor

Já no caso da sílica ativa, a análise de DRX apresentou um difratograma de um material predominantemente amorfo. Segundo Capelo (2021), no que tange à fase amorfa apresentada no difratograma, quanto mais aberto e menos intenso for o pico encontrado, maior será a amorficidade do composto analisado, porém faz-se necessário um estudo mais aprofundado para a quantificação desse teor de fase amorfa (CAPELO, 2021).

Além disso, o difratograma deste trabalho é semelhante aos difratogramas encontrados em outros estudos para a sílica ativa (CAPELO, 2021; SHAH e SCOTT, 2021b; ZHANG *et al.*, 2014), com um halo amorfo localizado entre $2\theta = 10^\circ$ e $2\theta = 40^\circ$, corroborando com os resultados obtidos no presente trabalho. Também foi relatada uma ampla protuberância amorfa em torno de $2\theta = 15^\circ$ e 27° , que corresponde à sílica amorfa (SONAT e UNLUER, 2019). Essa fase amorfa de SiO_2 promove à sílica ativa uma elevada reatividade como material pozolânico, com potencial para utilização em substituição ao CP e reação com o MgO.

Com o intuito de compreender melhor a formação dos produtos ao longo do processo de hidratação e reação química das pastas, a proporção de pasta de MgO/SA e relação w/b com os maiores valores de resistência à compressão (pasta Si40_0,6) foi escolhida para a realização de ensaios de DRX em diferentes idades (1, 7 e 28 dias), conforme a Figura 11:

Figura 11 - Difração de raios X para a pasta Si40_0,6 em diferentes idades



Fonte: Próprio autor

Observando os resultados obtidos, para a pasta Si40_0,6 (ou seja, proporção de 60 MgO/40 SA e $w/b = 0,6$), os picos de MgO (periclase) são mais intensos no primeiro dia de hidratação, reduzindo-se ao longo das demais idades de teste (7 dias e 28 dias); já os picos de brucita são menos intensos inicialmente (1 dia), porém aumentam ao longo do tempo. Isso sugere que, conforme vai sendo consumida a periclase (MgO), vai ocorrendo a formação da brucita, que é uma precursora do gel de MSH, que por sua vez é o principal responsável pela resistência mecânica das pastas.

Além disso, tem-se um aumento nos picos de MSH ao longo dos dias, indicando que o consumo de MgO (periclase) também ocorre para a formação de MSH. Tal acontecimento se relaciona com o ganho de resistência ao passar do tempo, que pôde ser observado nos resultados do ensaio de resistência à compressão.

Agora, com relação à outras pesquisas realizadas, em um estudo de pastas foi relatado que a brucita reage com a SA para formar o gel MSH (ZHANG *et al.*, 2014). Em outro estudo, com a preparação de pastas com uso de aditivo superplastificante para melhorar a trabalhabilidade e armazenamento a 20°C e UR de 65% até a idade de teste de compressão. Para a análise de DRX, no caso de 60% MgO + 40% SA com $w/b = 0,5$, notou-se que os picos de periclase (MgO) reduziram à medida que a hidratação progredia, o que está de acordo com o que foi obtido neste estudo, e a hidratação do MgO leva à precipitação da brucita para todas as idades; já no caso de

50% MgO + 50% SA, observou-se a presença de picos de MgO não reagido e MgO formado a partir da desidroxilação da brucita aos 90 dias (SHAH e SCOTT, 2021a).

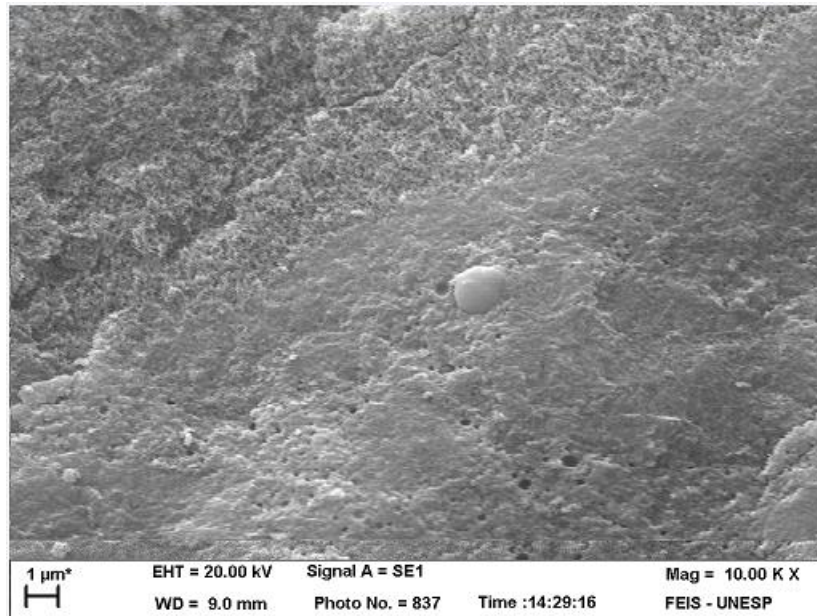
Também foi observado que a intensidade dos picos de MgO e brucita diminuíram ao longo dos dias (7, 28 e 90 dias), indicando assim a transição contínua de MgO para brucita (devido à hidratação do MgO) e, simultaneamente, o consumo de brucita ao reagir com a SA para a formação de gel de MSH. Assim, confirmou-se a formação de MSH amorfo à temperatura ambiente, sendo uma alternativa para a produção de adsorventes e materiais de construção de baixo custo. Também notou-se que a reatividade do MgO é de grande importância, visto que quanto maior a reatividade, maior será a quantidade de brucita e Mg^{2+} disponíveis para a reação. (JIN e AL-TABBAA, 2014). Em outra pesquisa, foram identificados picos largos indicativos de MSH amorfo (2θ : 17-28°, 32-39° e 58-62°), porém também observou-se a presença de MgO mesmo após 56 dias de cura, indicando hidratação incompleta. Para as amostras curadas por 7 dias, notou-se picos claros de brucita e também a presença do pico de sílica amorfa em torno de $2\theta = 22^\circ$, sugerindo a dissolução incompleta da sílica aos 7 dias. Também foi observado um aumento nítido na intensidade dos picos de MSH e uma diminuição no conteúdo de brucita de 7 para 56 dias, indicando a utilização de brucita na formação de MSH, o que poderia explicar o aumento contínuo na resistência à compressão até 56 dias (SONAT e UNLUER, 2019).

No entanto, no presente estudo observou-se uma intensificação dos picos de brucita até a idade de 28 dias, indicando que provavelmente para esta idade de teste ainda não ocorreu a reação da brucita com toda a sílica presente na mistura para a formação de gel de MSH, o que poderia fornecer resistências maiores em idades posteriores.

5.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

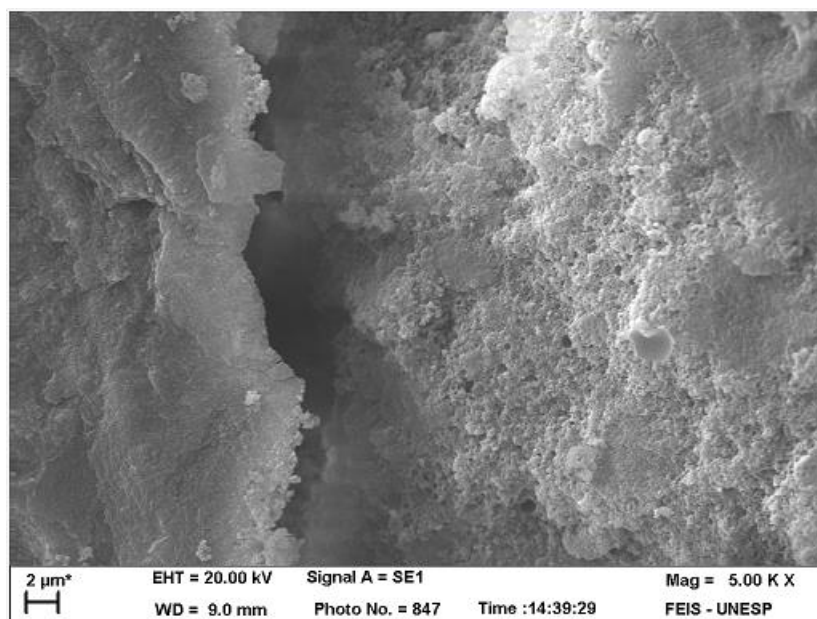
O ensaio de microscopia eletrônica de varredura foi realizado para a idade de 28 dias para a proporção de pastas (e relação w/b) que obteve as maiores resistências à compressão (Si40_0,6), bem como para as pastas de mesma proporção, porém com relação w/b = 0,7 (Si40_0,7, ou seja, proporção de 60 MgO/40 SA e w/b = 0,7), buscando compreender a queda ocorrida na resistência à compressão das pastas com relação w/b de 0,6 para 0,7 (Figuras 12 e 13, respectivamente).

Figura 12 - Ensaio de MEV da pasta Si40_0,6 com 28 dias



Fonte: Próprio autor

Figura 13 - Ensaio de MEV da pasta Si40_0,7 com 28 dias



Fonte: Próprio autor

Dessa forma, para a pasta Si40_0,6 (Figura 12), é possível perceber uma estrutura mais compacta e densa, sem a presença de muitos poros e sem muito material solto (ou seja, que não reagiu), o que está de acordo com o ensaio de resistência à compressão, no qual a pasta Si40_0,6 obteve os melhores resultados.

Já para a pasta Si40_0,7, ou seja, com a mesma proporção de material seco (MgO e SA), porém com uma relação $w/b = 0,7$, observa-se uma estrutura mais porosa, com a presença de irregularidades e uma “grande fissura” (Figura 13). Tais pontos destacados são apontados como os principais responsáveis pela queda da resistência à compressão de $w/b = 0,6$ para $w/b = 0,7$.

Dessa forma, é necessário se atentar à relação w/b , pois o excesso de água na pasta leva a um aumento da porosidade, o que “enfraquece” o material (VANDEPERRE *et al.*, 2008).

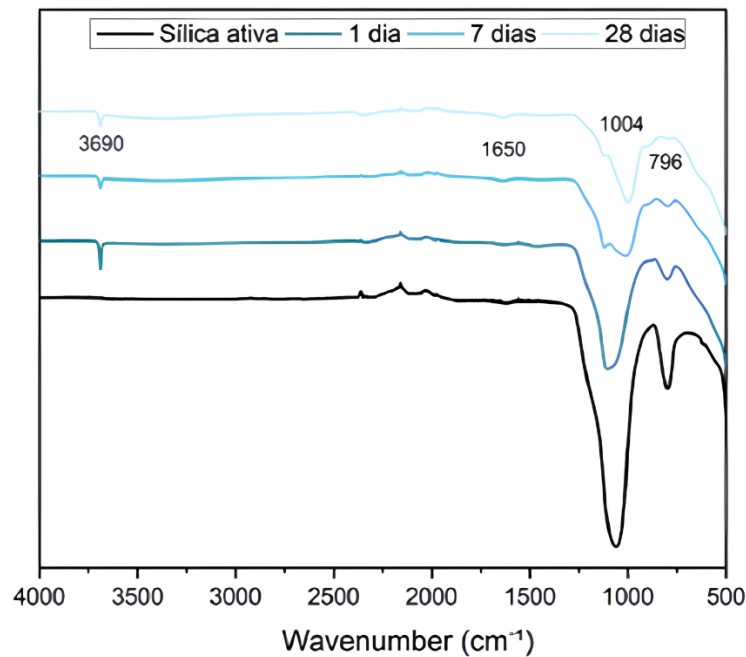
Agora, comparando-se os resultados com outros estudos de microestrutura, foi relatado que as partículas de SA foram dispersas na matriz e ligadas pelos géis, tornando assim a microestrutura mais densa, o que influencia na resistência à compressão (JIN e AL-TABBAA, 2014). Também foi relatada a presença de sílica não reagida aos 7 dias, e uma microestrutura mais densa, principalmente devido à formação de MSH, para a idade de 56 dias (SONAT e UNLUER, 2019), o que poderia explicar as baixas resistências à compressão em idades iniciais e o aumento da resistência em idades posteriores.

Em outro estudo com análise de MEV para pastas com 40% MgO e 60% SA, 50% MgO e 50% SA, e 60% MgO e 40% SA, percebeu-se que há uma melhora na homogeneidade e densidade das pastas à medida que o teor de SA diminui, com uma estrutura mais porosa para as pastas com maior teor de SA (ZHANG *et al.*, 2014), o que pode reforçar que a escolha da pasta Si40_0,6 foi adequada para a realização dos ensaios adicionais. Entretanto, para este estudo, foi analisada apenas a pasta com 40% de SA aos 28 dias, sendo uma possibilidade para estudos futuros uma melhor investigação na análise de MEV para mais proporções de MgO e SA e diferentes idades.

5.4 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR)

A pasta com os melhores resultados de resistência à compressão foi escolhida para analisar o FTIR ao longo do tempo (idades de 1 dia, 7 dias e 28 dias), juntamente com o FTIR da sílica ativa antes da mistura (material anidro) para comparação. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 14:

Figura 14 - Ensaio de FTIR para a pasta Si40_0,6 em idades de 1, 7 e 28 dias



Fonte: Próprio autor

É possível observar uma banda de absorção em torno de 3690 cm^{-1} (característica da formação da brucita) e em 1650 cm^{-1} (que se refere à presença de MSH). No caso da banda que ocorre em 3690 cm^{-1} , foi atribuída como sendo referente ao estiramento das ligações O–H dentro do $Mg(OH)_2$ (SHAH e SCOTT, 2021b; SONAT *et al.*, 2017), sendo essa banda maior em idades iniciais e diminuindo com o tempo. Já a segunda banda em 1650 cm^{-1} foi atribuída às vibrações de dobramento O–H dos produtos de hidratação brucita e/ou MSH (SHAH e SCOTT, 2021a; SHAH e SCOTT, 2021b), e foi possível perceber que tal banda se “intensifica” no decorrer das idades de teste, o que explica o aumento da resistência à compressão ao longo do tempo. Dessa forma, tais observações se referem e identificam a presença desses produtos de hidratação nas amostras analisadas, o que está de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão e de DRX.

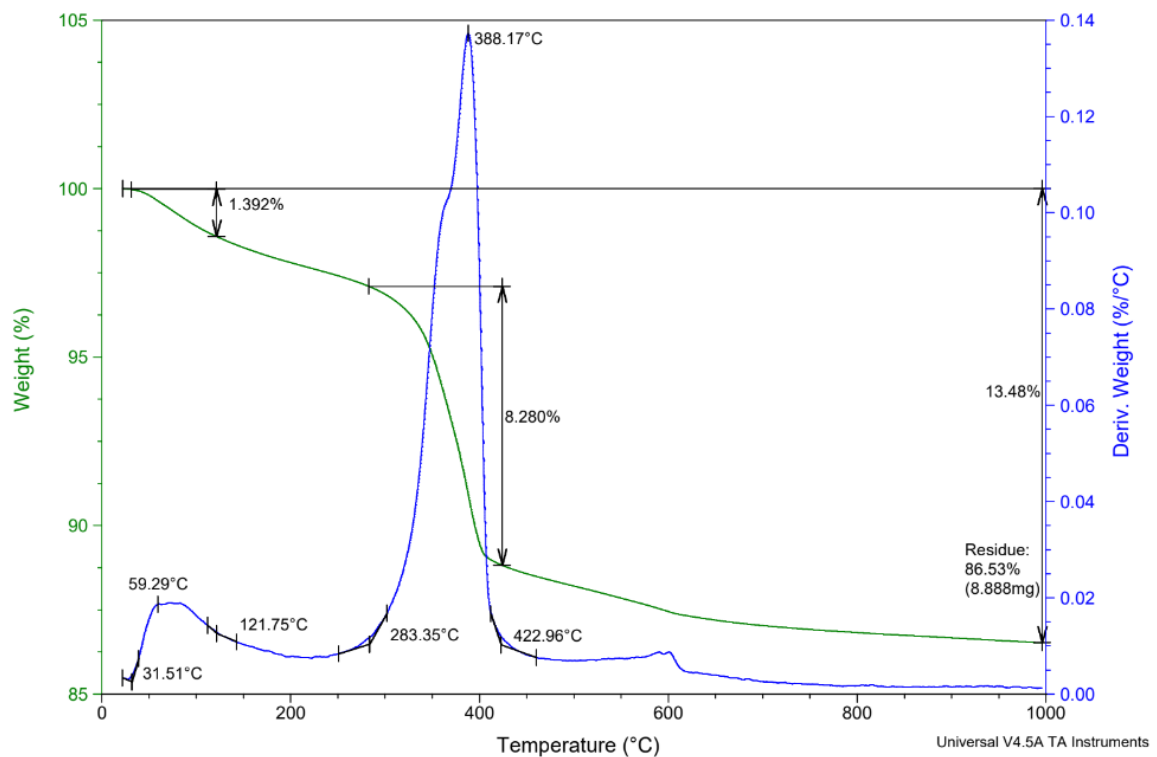
Também foi observada uma banda em torno de 1115 e 800 cm^{-1} , atribuída ao estiramento Si–O, indicando a presença de sílica não reagida, relacionada com a dissolução e reação do dióxido de silício (SiO_2) para formar o gel de MSH e, conseqüentemente, com os valores de resistência à compressão (SHAH e SCOTT, 2021b; SONAT *et al.*, 2017). Quanto maior a porcentagem de sílica não reagida na mistura, menor a formação de produtos de hidratação que conferem a resistência da

pasta. Além disso, é possível observar uma redução na banda de absorção em torno de 1115 e 800 cm^{-1} conforme as idades (antes da mistura, 1 dia, 7 dias e 28 dias), o que confirma o desenvolvimento da reação, com o consumo de SiO_2 presente na mistura para a formação do produto de hidratação MSH (SONAT *et al.*, 2017).

5.5 Termogravimetria (TG)

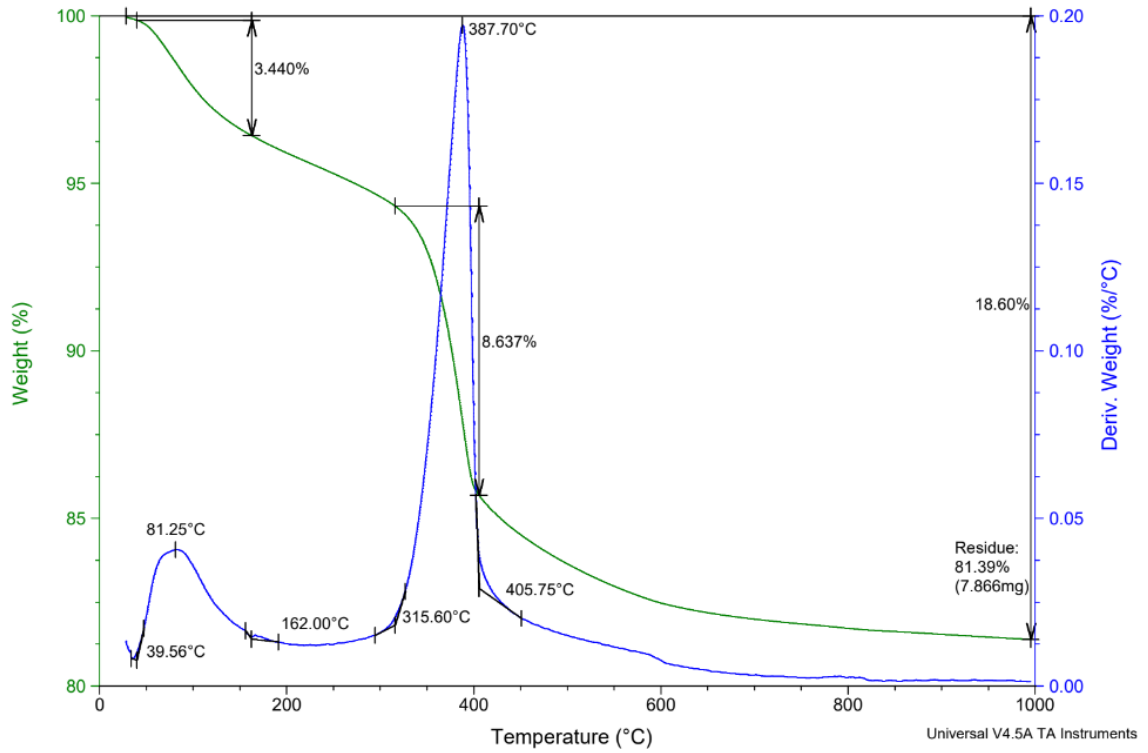
O ensaio de TG foi realizado nas idades de 1, 7 e 28 dias para a pasta que apresentou os melhores resultados de resistência a compressão (pasta Si40_0,6), visando compreender e analisar o desenvolvimento dos produtos de hidratação e as reações químicas ocorridas ao longo do tempo. As Figuras 15, 16 e 17 apresentam os termogramas obtidos para as idades de 1, 7 e 28 dias, respectivamente:

Figura 15 - Curvas de TG e DTG da pasta Si40_0,6 (1 dia)



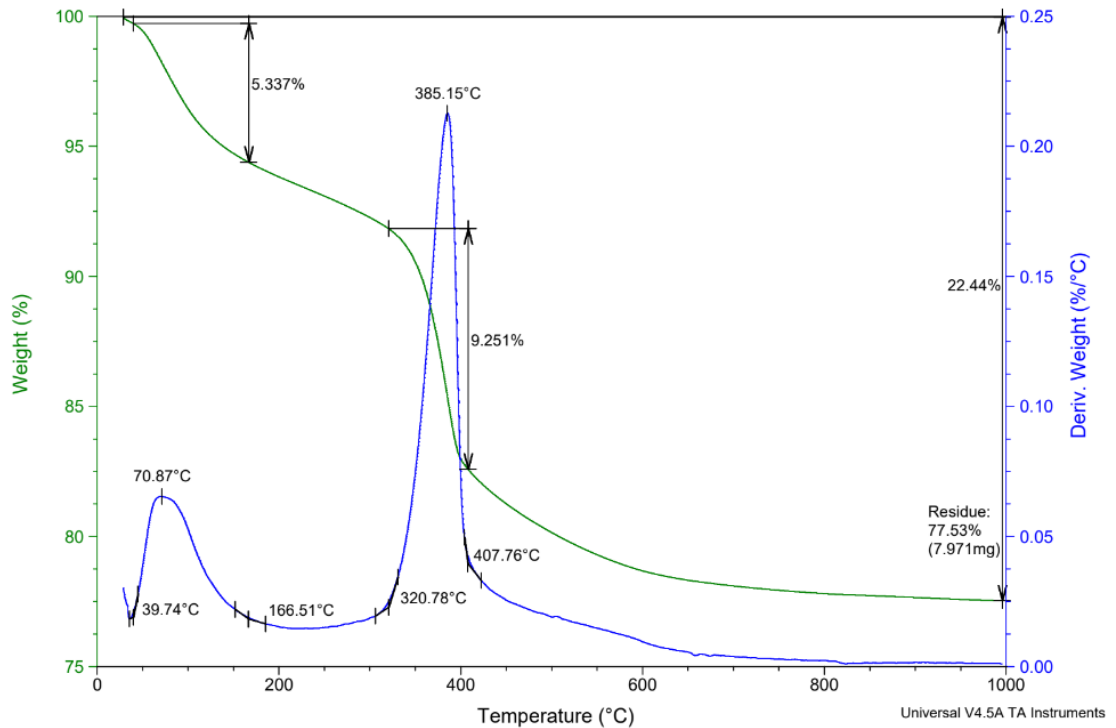
Fonte: Próprio autor

Figura 16 - Curvas de TG e DTG da pasta Si40_0,6 (7 dias)



Fonte: Próprio autor

Figura 17 - Curvas de TG e DTG da pasta Si40_0,6 (28 dias)



Fonte: Próprio autor

Analisando os resultados obtidos, tem-se a ocorrência de três estágios de perda de massa, apesar de serem “visíveis” nitidamente apenas dois estágios: Um deles, em torno de 100 a 150°C, corresponde à perda de água interlamelar do MSH e a água fisicamente adsorvida; já o outro estágio é observado em torno dos 400°C e se relaciona a desidroxilação da brucita e separação dos grupos hidroxila em MSH (LI *et al.*, 2018; SHAH e SCOTT, 2021a; SONAT *et al.*, 2017; SONAT e UNLUER, 2017).

Além disso, as porcentagens de perda de massa vão aumentando com o passar dos dias para os dois estágios de perda de massa identificados, ou seja, a perda total de massa é maior com 28 dias quando comparado com as idades de 1 dia e de 7 dias. Esse aumento na perda de massa indica a contínua hidratação do MgO e sua reação com SiO_2 , ou a partir da brucita formada anteriormente na reação, o que resulta na formação do gel de MSH (SONAT *et al.*, 2017).

Sendo assim, pode-se dizer que a maior perda de massa está relacionada a uma maior quantidade de produtos de hidratação formados anteriormente e que estiveram disponíveis para reação, proporcionando um aumento na resistência à compressão, corroborando com os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, que mostrou um aumento na resistência ao longo do tempo de cura.

5.6 Expansão linear

O ensaio de expansão linear foi realizado para as idades de 1, 3, 7, 14, 21 e 28 dias para a proporção de pastas (e relação w/b) que obteve as maiores resistência à compressão (Si40_0,6).

Inicialmente, foram realizadas as determinações das massas e as leituras de expansão para a pasta que obteve os melhores resultados de compressão (Si40_0,6) e, posteriormente, foram determinadas a expansão linear de cada corpo de prova (subtraindo a leitura na idade de teste e a leitura inicial de 1 dia), assim como a expansão linear média e o desvio padrão. Os resultados obtidos no ensaio estão mostrados a seguir nas Tabelas 7, 8 e 9:

Tabela 7 - Leituras de expansão (pasta Si40_0,6) em idades de 1 dia e de 3 dias

CPs	1 dia					3 dias				
	Massa (g)	Leitura 1 (mm)	Expansão (mm)	Expansão média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Massa (g)	Leitura 2 (mm)	Expansão (mm)	Expansão média (mm)	Desvio Padrão (mm)
1	301,37	2,890	0,000	0,000	0,000	299,03	3,594	0,704	0,767	0,056
2	300,33	2,571	0,000			298,74	3,410	0,839		
3	299,80	3,210	0,000			299,34	3,967	0,757		

Fonte: Próprio autor

Tabela 8 - Leituras de expansão (pasta Si40_0,6) em idades de 7 dias e de 14 dias

CPs	7 dias					14 dias				
	Massa (g)	Leitura 3 (mm)	Expansão (mm)	Expansão média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Massa (g)	Leitura 4 (mm)	Expansão (mm)	Expansão média (mm)	Desvio Padrão (mm)
1	297,21	4,022	1,132	1,123	0,040	297,61	4,182	1,292	1,338	0,048
2	296,62	3,738	1,167			297,59	3,975	1,404		
3	299,96	4,281	1,071			297,57	4,528	1,318		

Fonte: Próprio autor

Tabela 9 - Leituras de expansão (pasta Si40_0,6) em idades de 21 dias e de 28 dias

CPs	21 dias					28 dias				
	Massa (g)	Leitura 5 (mm)	Expansão (mm)	Expansão média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Massa (g)	Leitura 6 (mm)	Expansão (mm)	Expansão média (mm)	Desvio Padrão (mm)
1	297,59	4,383	1,493	1,492	0,040	297,30	4,415	1,525	1,516	0,036
2	297,27	4,111	1,540			296,83	4,127	1,556		
3	297,30	4,653	1,443			296,71	4,678	1,468		

Fonte: Próprio autor

Desse modo, montou-se uma tabela com os dados da expansão linear média para cada idade de teste (Tabela 10):

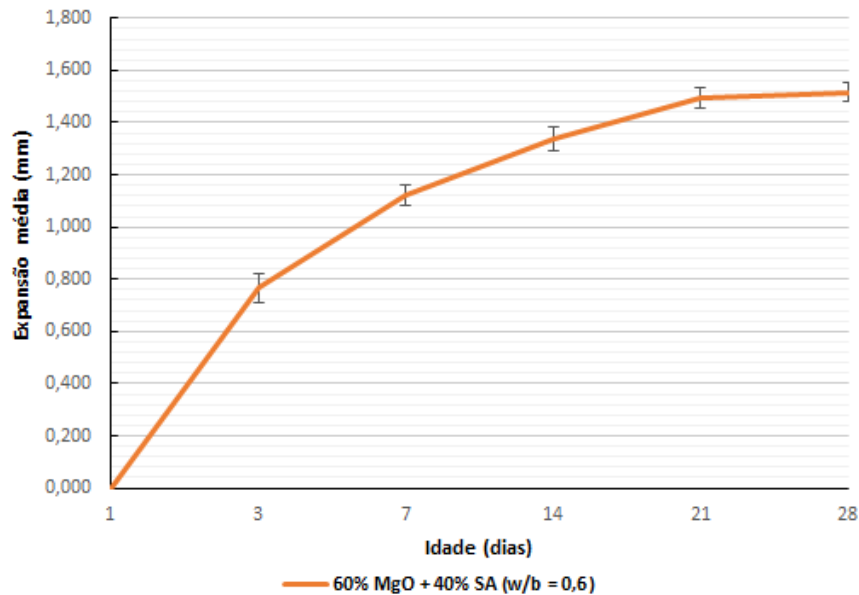
Tabela 10 - Valores de expansão média (mm) da pasta Si40_0,6

60% MgO + 40% SA (w/b = 0,6)	
Idade (dias)	Expansão média (mm)
1	0,000
3	0,767
7	1,123
14	1,338
21	1,492
28	1,516

Fonte: Próprio autor

Utilizando os valores da Tabela 10, construiu-se um gráfico mostrando o comportamento da expansão ao longo das idades de teste, conforme a Figura 18:

Figura 18 - Expansão (mm) x Idade (dias) da pasta Si40_0,6



Fonte: Próprio autor

Analisando-se o gráfico, é possível perceber um aumento gradativo da expansão, mais destacado em idades iniciais (principalmente até a idade de 7 dias). Entretanto, foi realizado o estudo apenas para a proporção de 60% MgO + 40% SA, sendo interessante e sugestão para estudos e pesquisas posteriores a realização do ensaio para outras proporções, com o intuito de comparar os resultados obtidos com as proporções analisadas.

Ademais, conforme é pedido na NBR 15261 (ABNT, 2005), calculou-se a variação dimensional, o Desvio Absoluto Máximo e a variação de massa. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 - Variação dimensional e variação de massa (pasta Si40_0,6)

60% MgO + 40% SA (w/b = 0,6)					
Corpo de prova (CP)	Variação dimensional (mm/m)	Variação dimensional média (mm/m)	Desvio Absoluto Máximo (mm/m)	Variação de massa (%)	Variação de massa média (%)
1	6,10	6,07	0,15	-1,35	-1,18
2	6,22			-1,17	
3	5,87			-1,03	

Fonte: Próprio autor

Essa perda de massa possivelmente está relacionada à formação de produtos de hidratação, conforme constatado nos ensaios anteriores (resistência à compressão, DRX, MEV, FTIR e TG)

Entretanto, não foram encontrados estudos e pesquisas sobre o uso de MgO e SA em pastas envolvendo a realização de ensaios de expansão linear para a comparação com os resultados obtidos neste trabalho, visto que a maior parte da literatura encontrada trata de ensaios de resistência à compressão, que é a principal característica analisada para o caso do concreto, além de técnicas de Análise Termogravimétrica (TGA), Difração de Raios-X (DRX), Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR) e análises de microestrutura.

Portanto, é possível perceber que se faz necessária a realização de mais estudos de expansão linear para tais materiais, visando criar uma literatura mais ampla e completa e possibilitando assim melhores análises em pesquisas e estudos futuros.

6 CONCLUSÕES

No ensaio de resistência à compressão, a pasta Si40_0,6 (60% MgO e 40% SA com w/b = 0,6) apresentou os melhores resultados, chegando a um valor de 18,61 MPa aos 28 dias, além de um aumento contínuo ao longo dos 28 dias sem quedas nas resistências, sendo escolhida para a realização dos ensaios adicionais. Foram observadas reduções nas resistências com o aumento da relação w/b para todas as idades e proporções analisadas, sendo uma possibilidade a utilização de aditivo para reduzir a demanda de água e, conseqüentemente, aumentar a resistência à compressão. Além disso, a resistência aumentou ao longo das idades de teste (1, 3, 7 e 28 dias), sendo tal fato atribuído à formação contínua de produtos de hidratação, principalmente o gel de MSH, que pôde ser percebido com os ensaios de DRX, FTIR e TG.

No ensaio de DRX, para a pasta Si40_0,6, observou-se que o consumo de periclase (MgO) para a formação de brucita na mistura, que é uma precursora do gel de MSH, e que por sua vez é o principal responsável pela resistência mecânica das pastas. Além disso, tem-se um aumento nos picos de MSH ao longo dos dias, indicando que o consumo de MgO (periclase) também ocorre para a formação de MSH. Tal acontecimento se relaciona com o ganho de resistência ao passar do tempo, que pôde ser observado nos resultados do ensaio de resistência à compressão.

O ensaio de MEV mostrou que, para uma maior quantidade de água (pasta Si40_0,7), formou-se uma estrutura mais porosa com mais irregularidades e com uma grande fissura; enquanto que para a pasta Si40_0,6 foi possível observar uma estrutura mais compacta e densa, sem a presença de muitos poros e sem muito material solto (ou seja, que não reagiu), o que vai de acordo com os resultados de resistência à compressão obtidos neste estudo.

Com o ensaio de FTIR foi possível identificar a formação e a presença de brucita e MSH (bandas em torno de 3690 e 1650 cm^{-1}), além da redução na banda em 3690 cm^{-1} e intensificação da banda em 1650 cm^{-1} , indicando o consumo de brucita para a formação de MSH no decorrer das idades de teste, o que explica o aumento da resistência à compressão ao longo do tempo. Além disso, notou-se uma redução na banda de absorção em torno de 1115 e 800 cm^{-1} ao longo do tempo, o que confirma o desenvolvimento da reação, com a formação dos produtos de hidratação e do MSH.

O ensaio de TG também esteve de acordo com o observado nos ensaios anteriores, sendo possível constatar que, com o passar dos dias, a perda de massa total das pastas produzidas aumenta, o que se relaciona com a contínua dissolução do MgO e formação de produtos de hidratação que conferem resistência ao sistema. Desse modo, tem-se que uma maior perda de massa está relacionada a uma maior quantidade de produtos de hidratação formados anteriormente e que estiveram disponíveis para reação, proporcionando um aumento na resistência, corroborando com os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, que mostrou um aumento na resistência ao longo do tempo (idades de teste).

Já para o ensaio de expansão linear, foi observado um aumento gradativo da expansão, mais acentuada em idades iniciais, além de uma perda de massa ao final dos 28 dias, que possivelmente está relacionada à formação de produtos de hidratação, conforme constatado no ensaio de TG. Entretanto, não foram encontrados estudos e pesquisas para comparação com os resultados obtidos neste estudo, visto que a maior parte da literatura encontrada trata de ensaios de resistência à compressão, além de ensaios de DRX, TG, FTIR e MEV, sendo então uma possibilidade para futuras pesquisas e estudos envolvendo tais materiais alternativos.

Portanto, foi possível observar um aumento na resistência à compressão ao longo do tempo, sendo atribuído à formação contínua de produtos de hidratação, principalmente o gel de MSH. Ademais, é nítida a importância de se incentivar cada vez mais os estudos de materiais alternativos ao cimento Portland no Brasil, com o intuito de que os inventários nacionais sejam “abastecidos” e aprimorados, possibilitando melhores análises futuras e, eventualmente, deixando de depender exclusivamente de dados coletados de outras regiões, por exemplo, de países do continente europeu e da China, e também de modo a servir de apoio para o desenvolvimento sustentável das indústrias brasileiras, devido ao impacto ambiental significativo do setor da construção civil.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15261**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da variação dimensional (retratação ou expansão linear). Rio de Janeiro, 2005.
- ABDEL-GAWWAD, H. A.; HASSAN, H. S.; VÁSQUEZ-GARCIA, S. R.; ISRADE-ALCÁNTARA, I.; DING, Yc.; MARTINEZ-CINCO, M. A.; EL-ALEEM, S. Abd.; KHATER, H. M.; TAWFIK, T. A.; EL-KATTAN, I. M. Towards a clean environment: The potential application of eco-friendly magnesia-silicate cement in CO₂ sequestration. **Journal of Cleaner Production**, v. 252, 2020.
- ADIL, G.; KEVERN, J. T.; MANN, D. Influence of silica fume on mechanical and durability of pervious concrete. **Construction and Building Materials**, v. 247, 2020.
- ADNAN, Z. S.; ARIFFIN, N. F.; MOHSIN, S. M. S.; LIM, N. H. A. S. Review paper: Performance of rice husk ash as a material for partial cement replacement in concrete. **Materials Today: Proceedings**, v. 48, p. 842-848, 2022.
- APRIANTI, E.; SHAFIGH, P.; BAHRI, S.; FARAHANI, J. N. Supplementary cementitious materials origin from agricultural wastes – A review. **Construction and Building Materials**, v. 74, p. 176-187, 2015.
- BERNARD, E.; LOTHENBACH, B.; RENTSCH, D.; POCHARD, I.; DAUZÈRES, A. Formation of magnesium silicate hydrates (M-S-H). **Physics and Chemistry of the Earth**, Parts A/B/C, v. 99, p. 142-157, 2017.
- BRIBIÁN, I. Z.; CAPILLA, A. V.; USÓN, A. A. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, v. 46, ed. 5, 2011.
- 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.
- COFFETTI, D.; CROTTI, E.; GAZZANIGA, G; CARRARA, M.; PASTORE, T.; COPPOLA, L. Pathways towards sustainable concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 154, 2022.
- DHAKAL, M.; SCOTT, A. N.; SHAH, V.; DHAKAL, R. P.; CLUCAS, D. Development of a MgO-metakaolin binder system, **Construction and Building Materials**, v. 284, 2021.
- DIXIT, A.; PATEL, A. S.; SINGH, D. Effect of different supplementary cementitious materials on compressive strength of concrete with varying size of aggregates. **Materials Today: Proceedings**, v. 56, Part 1, p. 336-341, 2022.

DONG, D.; HUANG, Y.; PEI, Y.; ZHANG, X.; CUI, N.; ZHAO, P.; HOU, P.; LU, L. Effect of spherical silica fume and fly ash on the rheological property, fluidity, setting time, compressive strength, water resistance and drying shrinkage of magnesium ammonium phosphate cement, **Journal of Building Engineering**, v. 63, Part A, 2023.

ECOIMPER – Impermeabilizantes e Produtos técnicos de Engenharia, 2023. Ferbasa. Disponível em: <<https://www.ecoimper.com/produtos/produtos-para-concreto/ferbasa/silica-ativa#produtos>>. Acesso em: 28 de maio de 2024.

FONSECA, G. C. da. Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: uma abordagem epistêmica. 105 f. Dissertação (Mestrado) – Pós-graduação em construção civil – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, 2010.

GLOBAL MONITORING LABORATORY (GML). Carbon Cycle Greenhouse Gases: Trends in Atmospheric Carbon Dioxide, 2024. Disponível em: <<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>>. Acesso em: 30 de maio de 2024.

GONÇALVES, T.; SILVA, R. V.; BRITO, J. de; FERNÁNDEZ, J. M.; ESQUINAS, A. R. Hydration of Reactive MgO as Partial Cement Replacement and Its Influence on the Macroporosity of Cementitious Mortars. **Advances in Materials Science and Engineering**, vol. 2019, Article ID 9271507, pp. 12, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1155/2019/9271507>>. Acesso em: 28 de maio de 2024.

HAMADA, H. M.; ABED, F.; KATMAN, H. Y. B.; HUMADA, A. M.; JAWAHERY, M. S. Al; MAJDI, A.; YOUSIF, S. T.; THOMAS, B. S. Effect of silica fume on the properties of sustainable cement concrete. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 24, p. 8887-8908, 2023.

HAQUE, M. A.; CHEN, B.; LI, S. Water-resisting performances and mechanisms of magnesium phosphate cement mortars comprising with fly-ash and silica fume, **Journal of Cleaner Production**, v. 369, 2022.

HATUNGIMANA, D.; TASKÖPRÜ, C.; IÇHEDEF, M.; SAÇ, M. M.; YAZICI, S. Compressive strength, water absorption, water sorptivity and surface radon exhalation rate of silica fume and fly ash based mortar. **Journal of Building Engineering**, v. 23, p. 369-376, 2019.

IPCC Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage. Prepared by Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Metz, B., O. Davidson, H. C. de Coninck, M. Loos, and L. A. Meyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 442, 2005.

JAYARAMAN, A.; VASUDEVAN, M.; ARAVIND, R.; KEERTHIKA, M.; PRAKASH, J. H. Optimization of partial replacement of cement by silica fume and rice husk ash for sustainable concrete. **Materials Today: Proceedings**, 2023.

JIA, Y.; WANG, B.; WU, Z.; HAN, J.; ZHANG, T.; VANDEPERRE, L. J.; CHEESEMAN, C. R. Role of sodium hexametaphosphate in MgO/SiO₂ cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 89, p. 63-71, 2016.

JIN, F.; AL-TABBAA, A. Strength and hydration products of reactive MgO–silica pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 52, p. 27-33, 2014.

- JUENGER, M. C. G.; SNELLINGS, R.; BERNAL, S. A. Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights. **Cement and Concrete Research**, v. 122, p. 257-273, 2019.
- KANSAL, C. M.; GOYAL, R. Effect of nano silica, silica fume and steel slag on concrete properties. **Materials Today: Proceedings**, v. 45, Part 6, p. 4535-4540, 2021.
- KAREIN, S. M. M.; RAMEZANIANPOUR, A. A.; EBADI, T.; ISAPOUR, S.; KARAKOUZIAN, M. A new approach for application of silica fume in concrete: Wet granulation. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 573-581, 2017.
- LI, Y.; LUO, X.; LIN, H.; LI, H.; LIU, Y.; MU, J.; PAN, B. The impact of environmental humidity on the mechanical property and microstructure of magnesium silicate hydrate cement. **Construction and Building Materials**, v. 425, 2024.
- 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.
- LI, Z.; YU, Q.; CHEN, X.; LIU, H.; ZHANG, J.; ZHANG, J.; YANG, Y.; WEI, J. The role of MgO in the thermal behavior of MgO–silica fume pastes. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 127, n. 3, p. 1897-1909, 2017.
- LI, Z.; ZHANG, T.; HU, J.; TANG, Y.; NIU, Y.; WEI, J.; YU, Q. Characterization of reaction products and reaction process of MgO–SiO₂–H₂O system at room temperature. **Construction and Building Materials**, v. 61, p. 252-259, 2014.
- LISKA, M.; AL-TABBAA, A. Performance of magnesia cements in pressed masonry units with natural aggregates: Production parameters optimisation. **Construction and Building Materials**, v. 22, ed. 8, p. 1789-1797, 2008.
- LOU, Y.; KHAN, K.; AMIN, M. N.; AHMAD, W.; DEIFALLA, A. F.; AHMAD, A. Performance characteristics of cementitious composites modified with silica fume: A systematic review. **Case Studies in Construction Materials**, v. 18, 2023.
- LUO, X.; LI, Y.; LIN, H.; LI, H.; SHEN, J.; MU, J.; WANG, Q.; PAN, B. Effect of curing regimes on strength of magnesium silicate hydrate cement. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 26, p. 7534-7546, 2023.
- MA, H.; ZHANG, S.; FENG, J. Physicochemical properties of MgO-silica fume cementitious materials exposed to high temperatures, **Journal of Building Engineering**, v. 50, 2022.
- MÁRMOL, G.; JÚNIOR, H. S.; TASHIMA, M. M.; PROVIS, J. L. Optimization of the MgOSiO₂ binding system for fiber-cement production with cellulosic reinforcing elements. **Materials & Design**, v. 105, p. 251-261, 2016.
- MARMÓL, G.; JÚNIOR, H. S. Study of the degradation of non-conventional MgO-SiO₂ cement reinforced with lignocellulosic fibers. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p. 258-267, 2017.
- MEDDAH, M. S.; ISMAIL, M. A.; EL-GAMAL, S.; FITRIANI, H. Performances evaluation of binary concrete designed with silica fume and metakaolin. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 400-412, 2018.

MENG, D.; UNLUER, C.; YANG, E-H.; QIAN, S. Recent advances in magnesium-based materials: CO₂ sequestration and utilization, mechanical properties and environmental impact. **Cement and Concrete Composites**, v. 138, 2023.

MINÉRIOS OURO BRANCO. **Óxido de Magnésio, 2023**. Disponível em: <<http://www.ourobranco.com.br/oxido-de-magnesio.php>>. Acesso em: 29 de maio de 2024.

MOHAMAD, N.; MUTHUSAMY, K.; EMBONG, R.; KUSBIANTORO, A.; HASHIM, M. H. Environmental impact of cement production and Solutions: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 48, Part 4, p. 741-746, 2022.

MOHAN, A.; HAYAT, Md. T. Characterization of mechanical properties by preferential supplant of cement with GGBS and silica fume in concrete, **Materials Today: Proceedings**, V. 43, Part 2, p. 1179-1189, 2021.

NIDHEESH, P.V.; KUMAR, M. S. An overview of environmental sustainability in cement and steel production. **Journal of Cleaner Production**, v. 231, p.856-871, 2019.

NIED, D.; ENEMARK-RASMUSSEN, K.; L'HOPITAL, E.; SKIBSTED, J.; LOTHENBACH, B. Properties of magnesium silicate hydrates (M-S-H). **Cement and Concrete Research**, v. 79, p. 323-332, 2016.

PATIL, S.; PATEL, T. H.; YASHODHA, E. The effect of rice husk ash, silica fume, and quarry dust on glass fibre reinforced concrete's strength properties, **Materials Today: Proceedings**, v. 59, Part 1, p. 918-925, 2022.

PAYÁ, J.; MONZÓ, J.; BORRACHERO, M. V.; SORIANO, L.; TASHIMA, M. M. Ativadores alternativos para cimentos ativados por alcalinos. *Revista ALCONPAT*, v. 12, p. 16–31, 2022.

QURESHI, L. A.; ALI, B.; ALI, A. Combined effects of supplementary cementitious materials (silica fume, GGBS, fly ash and rice husk ash) and steel fiber on the hardened properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 263, 2020.

ROADMAP. In: Visedo, G.; Pecchio, M. (Eds.), *Cement Technology: Potencial to Reduce Carbon Emissions in Brazilian Cement Industry by 2050*. SNIC, Rio de Janeiro, 2019.

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.

SAHOO, S.; PARHI, P. K.; PANDA, B. C. Durability properties of concrete with silica fume and rice husk ash. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 2, 2021.

SCHNEIDER, M. The cement industry on the way to a low-carbon future. **Cement and Concrete Research**, v. 124, 2019.

SELVARANJAN, K.; GAMAGE, J. C. P. H.; SILVA, G. I. P.; NAVARATNAM, S. Development of sustainable mortar using waste rice husk ash from rice mill plant: Physical and thermal properties. **Journal of Building Engineering**, v. 43, 2021.

- SHAH, V.; SCOTT, A. Hydration and microstructural characteristics of MgO in the presence of metakaolin and silica fume. **Cement and Concrete Composites**, v. 121, 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, 2021b.
- SHANKS, B.; HOWE, C.; DRAPER, S.; WONG, H.; CHEESEMAN, C. Production of low-carbon amorphous SiO₂ for use as a supplementary cementitious material and nesquehonite from olivine. *Materials Letters*, v. 361, 2024.
- SHEN, W.; CAO, L.; LI, Q.; WEN, Z.; WANG, J.; LIU, Y.; DONG, R.; TAN, Y.; CHEN, R. Is magnesia cement low carbon? Life cycle carbon footprint comparing with Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 20-27, 2016.
- SIDDIQUE, R. Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. **Resources, Conservation and Recycling**, v.55, ed. 11, p. 923-932, 2011.
- SIDDIQUE, R.; JAMEEL, A.; SINGH, M.; BARNAT-HUNEK, D.; KUNAL; AÏT-MOKHTAR, A.; BELARBI, R.; RAJOR, A. Effect of bacteria on strength, permeation characteristics and micro-structure of silica fume concrete. **Construction and Building Materials**, v. 142, p. 92-100, 2017.
- SIMONI, M.; WOO, C. L.; ZHAO, H.; IUGA, D.; SVORA, P.; HANEIN, T.; KINOSHITA, H.; WALKLEY, B. Reaction mechanisms, kinetics, and nanostructural evolution of magnesium silicate hydrate (M-S-H) gels. *Cement and Concrete Research*, v.174, 2023.
- SINGH, A.; SINGH, N. Mechanical properties of silica fume based concrete: A review. **Materials Today: Proceedings**, 2024.
- SKIBSTED, J.; SNELLINGS, R. Reactivity of supplementary cementitious materials (SCMs) in cement blends. **Cement and Concrete Research**, v. 124, 2019.
- SNELLINGS, R.; SURANENI, P.; SKIBSTED, J. Future and emerging supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 171, 2023.
- 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.; LIM, C. H.; LISKA, M.; UNLUER, C. Recycling and reuse of reactive MgO cements – A feasibility study. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 172-181, 2017.
- 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.
- SONAT, C.; UNLUER, C. Investigation of the performance and thermal decomposition of MgO and MgO-SiO₂ formulations. **Thermochimica Acta**, v. 655, p. 251-261, 2017.

- SONG, Hw; PACK, Sw; NAM, Sh; JANG, Jc; SARASWATHY, V. Estimation of the permeability of silica fume cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, ed. 3, p. 315-321, 2010.
- SZCZERBA, J.; PROROK, R.; ŚNIEŻEK, E.; MANEJ, D.; MASLONA, K. Influence of time and temperature on ageing and phases synthesis in the MgO–SiO₂–H₂O system. **Thermochimica Acta**, v. 567, p. 57-64, 2013
- TAJ, K.; AKTURK, B.; ULUKAYA, S. Fresh state properties and compressive strength development of reactive MgO-based systems, **Materials Today: Proceedings**, v. 65, Part 2, 2022.
- TOMÉ, W. D. Utilização de sílica ativa em concretos de alto desempenho. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Civil – Centro Universitário de Formiga – UNIFOR – MG, 2014.
- TRAN, H.M.; SCOTT, A. Strength and workability of magnesium silicate hydrate binder systems. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 526-535, 2017.
- UNLUER, C.; AL-TABBAA, A. Impact of hydrated magnesium carbonate additives on the carbonation of reactive MgO cements, **Cement and Concrete Research**, v. 54, p. 87-97, 2013.
- VANDEPERRE, L. J.; LISKA, M.; AL-TABBAA, A. Microstructures of reactive magnesia cement blends. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, ed. 8, p. 706-714, 2008.
- WEI, J.; YU, Q.; ZHANG, W. et al. Reaction products of MgO and microsilica cementitious materials at different temperatures. *J. Wuhan Univ. Technol.-Mat. Sci. Edit.* 26, 745–748, (2011). Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11595-011-0304-3>>. Acesso em 27 set. 2023.
- WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD. Cement Sustainability Initiative. Cement Technology Roadmap 2009: carbon emissions reductions up to 2050. Paris, 2010.
- WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT – WBCSD and International Energy Agency – IEA. Cement. Technology Roadmap: Low-Carbon Technology for the Indian Cement Industry, 2013.
- WU, Y.; CHAU, K. W.; LU, W.; SHEN, L.; SHUAI, C.; CHEN, J. Decoupling relationship between economic output and carbon emission in the Chinese construction industry. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 71, p.60-69, 2018.
- ZAID, O.; OUNI, M. H. E. Advancements in 3D printing of cementitious materials: A review of mineral additives, properties, and systematic developments. **Construction and Building Materials**, v. 427, 2024.
- ZHANG, T.; CHEESEMAN, C.; VANDEPERRE, L. J. Characterisation of corrosion of nuclear metal wastes encapsulated in magnesium silicate hydrate (MSH) cement. **Ceramic Materials for Energy Applications II**, p. 159-167, 2012a.
- 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, ed. 4, p. 439-442, 2011.

ZHANG, T.; LIANG, X.; LI, C.; LORIN, M.; LI, Y.; VANDEPERRE, L.J.; CHEESEMAN, C. R. Control of drying shrinkage in magnesium silicate hydrate (m-s-h) gel mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 88, 2016.

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**, v. 65, p. 8-14, 2014.

ZHANG, T.; VANDEPERRE, L. J.; CHEESEMAN, C. R. Magnesium-silicate-hydrate cements for encapsulating problematic aluminium containing wastes. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 1, n. 1-2, p. 34-45, 2012b.

ZHANG, Y.; LI, Y.; XU, Y.; SANG, S.; JIN, S. Enhanced formation of magnesium silica hydrates (M-S-H) using sodium metasilicate and caustic magnesia in magnesia castables. **Ceramics International**, v. 43, ed. 12, p. 9110-9116, 2017.