



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DE AGLOMERANTES À BASE DE ÓXIDO DE MAGNÉSIO E
CINZAS DE FOLHA DE BAMBU**

BRENO PERES DA SILVA

Orientador: Professor Dr. Jorge Luís Akasaki

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha
Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Engenheiro Civil.

ILHA SOLTERIA – SP

JUNHO DE 2025

BRENO PERES DA SILVA

ESTUDO DE AGLOMERANTES À BASE DE ÓXIDO DE MAGNÉSIO E CINZAS DE FOLHA DE BAMBU

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha
Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para
obtenção do grau de Engenheiro Civil.

Orientador: Professor Dr. Jorge Luís Akasaki

ILHA SOLTERIA – SP

JUNHO DE 2025

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

S586e Silva, Breno Peres da.
Estudo de aglomerantes à base de óxido de magnésio e cinzas de folha de bambu / Breno Peres da Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025
70 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2025

Orientador: Jorge Luís Akasaki

Inclui bibliografia

1. Pastas. 2. Cinza de folha de Bambu. 3. Óxido de magnésio. 4.
Macroestrutura.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: **BRENO PERES DA SILVA**

Titulo: **ESTUDO DE AGLOMERANTES À BASE DE ÓXIDO DE MAGNÉSIO E CINZAS DE FOLHA DE BAMBU.**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado como parte dos requisitos para obtenção do grau de Engenheiro Civil, junto ao Curso de Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Ilha Solteira

COMISSÃO EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **JORGE LUIS AKASAKI**
Data: 16/06/2025 09:24:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jorge Luís Akasaki
(Orientador)

Documento assinado digitalmente
 **MARCELO BORTOLETTO**
Data: 16/06/2025 09:15:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo Bortoletto
(Examinador)

Documento assinado digitalmente
 **GEAN PEREIRA DA SILVA JUNIOR**
Data: 16/06/2025 09:17:40-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. MSc. Gean Pereira da Silva Junior
(Examinador)

Ilha Solteira

16 / 06 / 2025

AGRADECIMENTO

Primeiramente agradeço a Deus por mais esse feito. Agradeço também toda minha família e amigos por todo apoio e colaboração em todos esses anos de graduação. Ao professor Jorge Luís Akasaki, pela sabedoria e determinação com que me orientou durante a realização deste trabalho e durante todos os anos de pesquisa e iniciação científica.

RESUMO

A busca por materiais alternativos ao cimento Portland vem sendo cada vez mais empregada no mercado, desta forma, muitos estudos vêm sendo realizados a fim de se obter novas alternativas e por conta disso, estuda-se neste projeto junção da cinza de folha de bambu e do óxido de magnésio. Com a união destes materiais, busca-se obter diversos benefícios como a redução de custos, redução da emissão de gases de efeito estufa, redução do consumo energético, boa resistência mecânica e pode ser uma alternativa para reduzir problemas relacionados ao esgotamento dos recursos naturais. Vale ressaltar que os aglomerantes que tem como base o óxido de magnésio reativo (MgO) necessitam de uma menor temperatura para sua produção (temperatura aproximada de 700°C) em comparação com os aglomerantes tradicionais, além de também apresentar grande potencial no aumento de resistência mecânica devido a captura de CO_2 e da adição de fontes de SiO_2 amorfo. Destaca-se que tais aglomerantes podem ser utilizadas para a confecção de concretos e argamassas. Quanto ao trabalho tem-se como principal objetivo analisar o efeito da adição de cinzas provenientes da queima de folhas de bambu (fonte alternativa de SiO_2 amorfo) no comportamento de pastas de óxido de magnésio (MgO), com o intuito de desenvolver um aglomerante alternativo à base de MgO. Desta forma, realizou-se ensaios de caracterização físico-química e mecânica em pastas de MgO como material de referência além de diferentes proporções de MgO e cinza da folha de bambu (CFB) (com proporções de 30%, 40%, 50% e 60%), cujos fatores água/aglomerante foram de: 0,5; 0,6 e 0,7. Os ensaios englobaram testes de resistência à compressão, fluorescência de raios X, difração de raios X (DRX), perda ao fogo, granulometria e medições de temperatura. Os resultados indicaram que a razão a/c de 0,5 é a mais adequada para a hidratação das pastas. No que se refere a fatores a/c maiores que a especificada, notou-se que causaram uma redução dos valores de resistência à compressão, podendo ser explicado devido ao aumento da porosidade, ocasionado pela maior quantidade de água livre e pela maior formação de $\text{Mg}(\text{OH})_2$, resultado da maior disponibilidade de água. Foram observadas elevadas expansões lineares, provocadas pela grande formação de $\text{Mg}(\text{OH})_2$ nas pastas formadas apenas por MgO, provocando uma redução de resistência à compressão. Quanto a CFB, sua adição resultou na formação do M-S-H por conta da reação com a brucita, o que provocou um melhor desempenho mecânico e uma baixa expansão

linear se comparado com amostras compostas de MgO. Por fim, destaca-se que a amostra com 40% de CFB e fator água/aglomerante de 0,5 apresentou o melhor desempenho em termos de resistência mecânica, alcançando 16,42 MPa aos 28 dias.

Palavras-chave: Pastas, cinza de folha de bambu, óxido de magnésio e microestrutura.

ABSTRACT

The search for alternative materials has been increasingly used in the market, thus, many studies have been carried out in order to obtain new alternatives and because of this, this project is studying the combination of leaf ash bamboo and magnesium oxide. By combining these materials, the aim is to obtain several benefits such as cost reduction, reduced greenhouse gas emissions, reduced energy consumption, good mechanical resistance and can be an alternative to reduce problems related to the depletion of natural resources. It is worth mentioning that binders based on reactive magnesium oxide (MgO) require a lower temperature for their production (approximate temperature of 700°C) compared to traditional binders, in addition to also having great potential for increasing resistance. mechanics due to CO₂ capture and the addition of amorphous SiO₂ sources. It is noteworthy that such binders can be used to make concrete and mortars. The main objective of this work is to analyze the effect of adding ash from the burning of bamboo leaves (alternative source of amorphous SiO₂) on the behavior of magnesium oxide (MgO) pastes, with the aim of developing an alternative binder. based on MgO. In this way, physical-chemical and mechanical characterization tests were carried out on MgO pastes as a reference material in addition to different proportions of MgO and bamboo leaf ash (CFB), whose water/binder factors were: 0.5; 0.6 and 0.7. The tests included compressive strength tests, X-ray fluorescence, X-ray diffraction (XRD), fire loss, granulometry and temperature measurements. The results indicated that the w/c ratio of 0.5 is the most suitable for hydrating the pastes. Regarding w/c factors greater than specified, it was noted that they caused a reduction in compressive strength values, which can be explained due to the increase in porosity, caused by the greater amount of free water and the greater formation of Mg(OH)₂, a result of greater water availability. High linear expansions were observed, caused by the large formation of Mg(OH)₂ in pastes formed only by MgO, causing a reduction in compressive strength. As for CFB, its addition resulted in the formation of M-S-H due to the reaction with brucite, which caused better mechanical performance and low linear expansion compared to samples composed of MgO. Finally, it is noteworthy that the sample with 40% CFB and water/binder factor of 0.5 presented the best performance in terms of mechanical resistance, reaching 16.42 MPa after 28 days.

Keywords: Pastes, bamboo leaf ash, magnesium oxide and microstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cinzas de folha de bambu após o processo de calcinação.....	29
Figura 2: Curva de variação da temperatura ao longo do tempo durante a calcinação da CFB.	34
Figura 3: Componentes do moinho utilizados na moagem da cinza	34
Figura 4: Ensaio de reatividade do MgO: a) MgO, água e fenolftaleína; b) após o acréscimo do ácido acético e c) mudança de coloração da solução.....	39
Figura 5: Difratoograma de raios X (MgO anidro)	43
Figura 6: Distribuição granulométrica do MgO	44
Figura 7: Difratoograma de Raios X (CFB anidra)	47
Figura 8: Distribuição granulométrica da CFB	48
Figura 9: Curvas de temperatura/tempo das pastas de MgO	50
Figura 10: Difratoogramas de Raios X das pastas contendo somente MgO: a) MgO_ac_0,5; b) MgO_ac_0,6; c) MgO_ac_0,7; d) MgO_ac_0,5 sobrepostos; e) 1 dia sobrepostos e f) 28 dias sobrepostos. C1 (P) Periclase – PDF Card [45-946], C2 (B) Brucita – PDF Card [44-1482], C3 (M) Magnesita – PDF Card [80-42], C4 (A) Artinita – PDF Card [6-484]	52
Figura 11: Curvas de temperatura/tempo das pastas de MgO com CFB	54
Figura 12: Difratoograma de raios x das pastas com CFB aos 28 dias em todas as proporções analisadas: a) a/c = 0,5; b) a/c = 0,6; c) a/c = 0,7 e d) fator a/c = 0,5 em $2\theta = 35-45^\circ$. (P) Periclase – PDF Card [45-946], (B) Brucita – PDF Card [44- 1482], (M) Magnesita – PDF Card [80-42], (A) Artinita – PDF Card [6-484], (Q) Quartzo – PDF Card [46-1045], (L) Óxido de alumínio – PDF Card [52-803]	57
Figura 13: Difratoograma de Raios X do traço CFB40%_ac_0,5: Em diferentes períodos de cura. (P) Periclase – PDF Card [45-946], (B) Brucita – PDF Card [44- 1482], (M) Magnesita – PDF Card [80-42], (A) Artinita – PDF Card [6-484], (Q) Quartzo – PDF Card [46-1045]	58

Figura 14: Resistência à compressão das amostras contendo somente MgO nas idades de 3, 7 e 28 dias e fatores água/aglomerante 0,5, 0,6 e 0,760

Figura 15: Resistência à compressão das amostras contendo CFB nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias e fatores água/aglomerante 0,5, 0,6 e 0,7: a) traços CFB30%; b) traços CFB40%; c) traços CFB50% e d) traços CFB60%.61

Figura 16: Percentual de desidratação do M-S-H em relação ao ganho de resistência mecânica (traço CFB40%_ac_0,5)64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Distribuição granulométrica do MgO44

Tabela 2: Distribuição granulométrica para CFB48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Composição da mistura utilizada para execução das pastas de MgO puro.....	35
Quadro 2: Composição da mistura utilizada para execução das pastas contendo MgO e CFB	36
Quadro 3: Composição química do MgO anidro	42
Quadro 4: Resultados do ensaio de reatividade química por tempo	45
Quadro 5: Composição química da CFB anidra	46
Quadro 6: Valores máximos e mínimos de temperatura alcançados pelas amostras.....	50
Quadro 7: Valores máximos e mínimos de temperatura alcançados pelas amostras contendo diferentes porcentagens de CFB	56
Quadro 8: Resultados de resistência à compressão de alguns trabalhos encontrados na literatura	63

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

pH	Potencial hidrogeniônico
CO ₂	Dióxido de carbono
IPCC	Painel Intergovernamental sobre mudanças climáticas
ONU	Organização das Nações Unidas
MgO	Óxido de magnésio
SiO ₂	Dióxido de silício
CFB	Cinza da folha de bambu
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio (portlandita)
MgCO ₃	Carbonato de Magnésio
Mg	Magnésio
Mg(OH) ₂	Hidróxido de magnésio (brucita)
CaMg(CO ₃) ₂	Dolomita
Mg ₂ SiO ₄	Fosforita
DRX	Difratometria de Raios X
CaO	Óxido de cálcio
M-S-H	Silicato de magnésio hidratado
Ni	Níquel
Cu	Cobre
FRX	Fluorescência de Raios X
MAC	Materiais alternativos de construção
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
NBR	Norma brasileira
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Eq.	Equação

LISTA DE SÍMBOLOS

ppm	Partes por milhão
°C	Graus Celsius
%	Porcentagem
g/cm ³	gramas/centímetro cúbico
kg	Quilograma
Ω	Ohm
kJ/mol	Quilojoule por mol
s	segundo
MPa	Mega Pascal
θ	Ângulo de Bragg
a/c	Relação água/aglomerante
μS/cm	Microsiemens por centímetro
#	Abertura
mm	milímetro
Mg/Si	Relação magnésio/silício
μm	micrômetro
g	grama
°C/min	graus Celsius/minuto
mL	mililitro
N	Normal
λ	comprimento de onda
Å	Angstrom
kV	Quilovolt
mA	miliampère
mg	miligrama
R ²	Coeficiente de determinação
h	Hora

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. Contexto do material cimento na indústria.....	19
2.2. Óxido de magnésio (MgO)	21
2.2.1. Processo de fabricação do Óxido de Magnésio	21
2.2.2. Reatividade do MgO.....	22
2.2.3. Expansão do MgO	23
2.3. Estudos de cimento à base de Óxido de Magnésio	23
2.4. Estudos de cimento à base cinza de folha de bambu	26
3. OBJETIVOS	30
4. METODOLOGIA.....	30
4.1. Materiais	30
4.1.1. Óxido de Magnésio.....	30
4.1.2. Demais materiais	31
4.2. Preparação de amostras.....	31
4.2.1. Produção das cinzas da folha de bambu (CFB).....	31
4.3. Preparação das pastas de MgO E MgO-CFB	32
4.3.1. Preparação das pastas	32
4.3.2. Metodologia de interrupção dos processos de reação	34
4.4. Caracterização	35
4.4.1. Caracterização físico-química e mecânica	35
4.4.1.1. Fluorescência de Raios X (FRX)	37
4.4.1.2. Perda ao fogo	37
4.4.1.3. Granulometria	38
4.4.1.4. Reatividade do MgO	38

4.4.1.5. Temperatura em escala temporal	39
4.4.1.6. Difratometria de Raios X (DRX)	39
4.4.1.7. Resistência à compressão axial	40
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
5.1. Caracterização das propriedades físico-química dos materiais	38
5.1.1. Óxido de Magnésio (MgO).....	39
5.1.1.1. Fluorescência de Raios X (FRX) e perda ao fogo	39
5.1.1.2. Difratometria de Raios X (DRX)	42
5.1.1.3. Granulometria.....	39
5.1.1.4. Reatividade do MgO	39
5.1.2. Cinza de Folha de Bambu (CFB)	44
5.1.2.1. Fluorescência de Raios X (FRX) e perda ao fogo	39
5.1.2.2. Difratometria de Raios X (DRX)	47
5.1.2.3. Granulometria	39
5.2. Caracterização das propriedades físico-química e mecânica das pastas.....	47
5.2.1. Pastas de MgO	47
5.2.1.1. Temperatura de reação	39
5.2.1.2. Difratometria de Raios X (DRX)	51
5.2.2. Pastas de MgO com CFB	52
5.2.2.1. Temperatura em escala temporal	54
5.2.2.2. Difratometria de Raios X (DRX)	56
5.2.2.3. Resistência à compressão axial	59
6. CONCLUSÕES	63
7. REFERÊNCIAS.....	64

1. INTRODUÇÃO

O surgimento dos materiais cimentícios teve grande relevância para o progresso da humanidade, pois, à medida que crescia a demanda por ambientes construídos, as pessoas passaram a usar esses materiais na construção de suas moradias. Hoje, o cimento Portland é o material cimentício mais utilizado em construções (XIE et al., 2023).

O cimento Portland é um aglomerante hidráulico (reage e endurece na presença de água) amplamente utilizado na construção civil, sendo o principal componente do concreto. O concreto tem alta resistência à compressão e, apesar de sua baixa resistência à tração, possui um coeficiente de dilatação térmica similar ao do aço, o que permite sua combinação com barras metálicas para formar o concreto armado. Com pH elevado (cerca de 12-13), o concreto é resistente a ambientes agressivos, tornando-o adequado para obras urbanas, pontes e barragens (KUMAR et al., 2020).

As atividades industriais têm um impacto significativo nas emissões globais de dióxido de carbono (CO₂), representando quase 61% das emissões totais. Infelizmente, a indústria do cimento é uma das maiores contribuintes para a poluição do meio ambiente, emitindo grandes quantidades desse poluente. A produção do cimento é um processo complexo que inclui a extração de matérias-primas, a preparação e produção do clínquer, a moagem e mistura com aditivos e sulfatos. Para cada tonelada produzida, em média, cerca de 900 kg de CO₂ são emitidos, representando aproximadamente 5% das emissões mundiais de dióxido de carbono (MAHASENAN et al., 2005). Considerando uma tendência de crescimento da indústria da construção civil nos próximos 27 anos, estima-se que as emissões globais de CO₂ da indústria do cimento chegarão a 2,34 bilhões de toneladas até 2050 (BENHELAL et al., 2013).

Estratégias mundiais vêm sendo discutidas e implementadas no intuito de se reduzir tais emissões. Estas se concentram, principalmente, em três vertentes: economia de energia, separação de carbono e utilização de materiais alternativos. A última abordagem é particularmente relevante e envolve o reaproveitamento de subprodutos industriais. Essa prática é fundamental, considerando que a maioria desses materiais é descartada de forma inadequada na natureza ou em aterros a céu aberto. A utilização desses resíduos na construção civil pode não só contribuir para a

produção de concretos eficientes, mas também para o descarte adequado e úteis desses materiais (BENHELAL *et al.*, 2013).

De modo a tentar reduzir os impactos gerados pela indústria do cimento um dos aglomerantes alternativos estudados atualmente é o óxido de magnésio (MgO) podendo ser utilizado juntamente com fontes que contenham dióxido de silício (SiO₂) amorfo. Com isso, vale ressaltar uma fonte alternativa de SiO₂ amorfo: as cinzas provenientes da queima da folha de bambu (CFB).

Atualmente, o Brasil possui cerca de 1,5 milhão de hectares de bambu plantado e nativo, resultando em uma produção anual de 150 mil toneladas. Com uma produtividade média de 25 toneladas por hectare, o Acre é o principal Estado produtor, seguido pelo Maranhão, que destina sua produção à fabricação de biomassa para geração de energia no setor industrial. Já estados como a Paraíba e Pernambuco direcionam em produzir para celulose e papel, enquanto São Paulo, Rio Grande do Sul, Minas Gerais, Bahia e Paraná investem em cultivos comerciais voltados para a produção de painéis, brotos e fitocosméticos (ANUNCIATO *et al.*, 2020).

O bambu é uma planta notável pelo seu rápido crescimento e pela sua capacidade renovável e sustentável, o que faz com que seu uso seja cada vez mais comum em diversos setores, incluindo a construção civil. No entanto, durante o processo de produção, uma grande quantidade de resíduos, como folhas e talos e lascas é gerada, o que acarreta um custo adicional para o seu descarte. Quando as folhas de bambu passam pelo processo de calcinação, obtêm-se cinzas com um alto teor de sílica, que se adequadamente processado, pode apresentar capacidade pozolânica alta, sendo um candidato para a produção de argamassas e concreto (NDUKA *et al.*, 2022; YANG *et al.*, 2022).

Tendo em vista a alta capacidade pozolânica, ADEMOLA e BUARI, promoveram a substituição parcial do cimento Portland por 5%, 10% e 15% de cinza de folha de bambu (CFB). Constatou-se analisando tais proporções que o valor da resistência à compressão apresentou melhores resultados para concretos com substituição de até 10% de cinza de folha de bambu, sendo uma resistência aceitável e considerada boa para construção de paredes de alvenaria e outras formas de construção em ambientes com a presença de sulfatos. Destaca-se que o concreto obtido teve resistência comprovada a sulfatos de magnésio, sulfato de sódio e sulfato de cálcio (ADEMOLA e BUARI, 2014).

Asha *et al.*, realizaram a substituição parcial do cimento Portland por cinza de folha de bambu (5%, 10% e 15%) e a partir de uma investigação experimental concluíram que a resistência à compressão do concreto diminui com o aumento da porcentagem de CFB, sendo que o motivo desta redução foi a hidratação incompleta aos 28 de idade do concreto. Quanto à durabilidade, resistência ácida e a resistência ao cloreto há uma melhora considerável para a substituição de 10% do cimento convencional por CFB (ASHA *et al.*, 2014).

Como citado anteriormente, óxido de magnésio é outro componente que vem sendo utilizado para compor aglomerantes para a construção civil, isso ocorre devido a sua alta reatividade, capacidade de sequestrar CO₂ e menor temperatura de produção em comparação ao cimento. Desta forma, tem-se realizado estudos buscando a substituição parcial deste pelo MgO (JIN e AL-TABBAA, 2014).

A IBAR Nordeste, aponta que o óxido de magnésio com reatividade controlada é aplicado a fabricação de placas à base de cimento Sorel, muito utilizadas para a construção de paredes e pisos. O objetivo de utilizar o MgO é a substituição da alvenaria tradicional, aponta-se que as placas à base de óxido de magnésio possuem características semelhantes a placas de fibrocimento e ao drywall, tendo como principais vantagens: maior resistência e mais duráveis, mais leve, maior resistência ao calor, umidade e fungos, possuem melhor isolamento térmico e melhores propriedades de isolamento acústico (Nordeste, I., 2016).

ZHANG, Y. *et al.* realizaram estudos visando a substituição parcial do cimento-escória por MgO (5% e 10%), tendo a brucita como principal produto decorrente da sua hidratação. Além do mais, observou-se que para 10% de óxido de magnésio houve um ligeiro aumento da profundidade de carbonatação da mistura. Com a pesquisa obteve-se como resultado que a mistura de cimento-escória-MgO deve apresentar resistência à carbonatação semelhante a mistura cimento-escória. Já com relação a porosidade, a adição de MgO provocou uma diminuição significativa em 7 dias, o que é positivo, pois aumenta o desenvolvimento de resistência em idade precoce (ZHANG Y. *et al.*, 2023).

ZHANG, J. *et al.*, avaliaram a viabilidade de um novo material cimentício formado pela junção de cinzas volantes e aditivo expansivo de MgO, provando que os efeitos sinérgicos entre eles implicam no comportamento de expansão e nas propriedades mecânicas das pastas. Os resultados experimentais obtidos para condições de água a 40 °C, mostram que a adição de 40% de cinzas volantes e 10%

de aditivo expansivo de MgO, não apenas amplifica a expansão inicial, mas também controla a expansão posterior. Além disso, a resistência à compressão e flexão aos 90 dias aumentaram cerca de 20,8% e 15,6%, respectivamente (ZHANG J. *et al.*, 2023).

Vale ressaltar que aglomerantes à base de MgO-SiO₂ são amplamente utilizados na produção de concretos refratários (JIA *et al.*, 2016) e, devido ao pH relativamente mais baixo em comparação aos aglomerantes de cimento Portland, também são empregados em combinação com fibras lignocelulósicas (MÁRMOL; SAVASTANO JR., 2017) e biodegradáveis (ZHANG *et al.*, 2018) na fabricação de painéis de partículas. Além disso, suas propriedades satisfatórias tanto no estado fresco quanto endurecido conferem a esses aglomerantes potencial para uso em diversas aplicações na construção civil (BHAGATH SINGH *et al.*, 2020), como na produção de blocos de pavimentação (WANG *et al.*, 2017) e na composição de argamassas e outros materiais construtivos.

Tendo em vista as vantagens da utilização das cinza de folha de bambu e óxido de magnésio, esse trabalho propôs a junção de ambos, para formar um concreto alternativo que pode vir a ser utilizado na construção civil. A escolha destes materiais ocorreu devido a vários fatores, podendo destacar o ponto de vista econômico, pois tendem a substituir a sílica ativa que teve um aumento significativo no preço de mercado. Além disso, considerando a alta capacidade pozolânica e resistência a sulfatos da cinza de folha de bambu e garantia de maior resistência mecânica, durabilidade, leveza, resistência ao calor, umidade e fungos do MgO, a junção de ambos se mostra promissora.

Em suma, o projeto em questão teve como principal objetivo analisar o efeito da adição de cinzas provenientes da queima de folhas de bambu no comportamento de pastas de óxido de magnésio (MgO), com o intuito de desenvolver um aglomerante alternativo à base de MgO. Os resultados foram comparados com as amostras de controle (contendo apenas MgO). Como inovação do estudo pode ser destacada a utilização da CFB como fonte de SiO₂ amorfo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Contexto do material Cimento Portland na indústria

A produção global de cimento tem crescido significativamente devido ao aumento da população, urbanização e infraestrutura. Atualmente, o cimento é o segundo material mais utilizado no mundo, perdendo apenas para a água. No entanto, o aumento no consumo de cimento também resulta em um aumento considerável na emissão de dióxido de carbono, sobretudo devido ao processo de clínquerização utilizado na produção do cimento Portland. A produção do cimento é responsável por cerca de 6 a 7% da emissão de gases nocivos à saúde humana (SCHNEIDER, 2019).

A produção de cimento convencional começa com a extração de minerais, onde as emissões de CO₂ representam cerca de 7% do total, principalmente devido ao uso de combustíveis fósseis. A etapa seguinte, o processamento das matérias-primas, é a maior responsável pelas emissões de CO₂, contribuindo com aproximadamente 85% do total. Desse valor, 50% são atribuído à emissão direta de CO₂, que ocorre durante a descarbonatação no processo de calcinação do calcário e argila para a produção de clínquer, realizado em fornos rotativos a temperaturas de até 1450°C. Após isso, o clínquer é resfriado e recebe a adição de sulfato de cálcio (gesso). Por fim, todos os componentes são moídos até atingir a granulometria ideal, resultando no cimento Portland (OLIVEIRA et al., 2019).

No contexto do Brasil, em comparação com outros países, registra uma média mais baixa de emissões de gases poluentes na produção de cimento Portland. Estima-se que a produção de uma tonelada de cimento no país emite, em média, 610 kg de CO₂, quantidade inferior à média da Espanha (698 kg), Inglaterra (839 kg) e China (848 kg). Esse resultado é principalmente atribuído ao uso de adições minerais na fabricação do cimento Portland no Brasil (SILVA et al., 2021). Desta forma, destaca-se a importância de pesquisar e utilizar materiais que provocam menores problemas ambientais, como é o caso da adição de materiais alternativos na composição de aglomerantes tradicionais.

Apesar do cimento Portland ser disparadamente o principal ligante empregado na construção civil, novas alternativas vêm sendo desenvolvidas buscando substituir parte do cimento convencional com o intuito de reduzir os impactos provocados por sua produção (SCHNEIDER, 2019).

Essas alternativas são os chamados materiais cimentícios suplementares, podem advir de resíduos agrícolas e industriais. Tais materiais alternativos têm sido estudados com o objetivo de melhorar o desempenho do concreto, reduzir os custos da construção, diminuir a emissão de gases nocivos à saúde humana e ao meio ambiente e o reaproveitamento de resíduos, que de certa forma poderiam ser descartados de maneira irregular. Estima-se que as emissões de CO_2 podem diminuir cerca de 540 a 590 kg. CO_2 /tonelada de 730 kg. CO_2 /tonelada até 2050 se materiais alternativos foram utilizados em substituição a uma determinada porcentagem do cimento Portland. Vale ressaltar que investir em materiais alternativos se tornou indispensável, pois futuramente a demanda de cimento será ainda mais alta, estima-se que em 2050 tal demanda estará na faixa de 780 a 1361 milhões de toneladas (AMRAN *et al.*, 2022; NIDHEESH *et al.*, 2019).

Tendo em vista a busca por alternativas viáveis, as cinzas produzidas na queima de resíduos agrícolas que viria a ser descartada, possui grande potencial como substituto parcial do cimento devido às suas propriedades pozolânicas. Desta forma, passou a estudar e explorar a utilização destas cinzas como componente de concretos, argamassas e pastas que possam vir a ser utilizadas na construção civil, cabendo citar as cinzas de sabugo de milho, cinzas de casca de arroz, cinzas do bagaço de cana-de-açúcar, cinzas de folha de bambu e muitas outras.

Outro material que vem chamando atenção é o óxido de magnésio, que tem sido utilizado como ligante alternativo para materiais de construção. Nos últimos anos, aglomerantes à base de MgO têm atraído a atenção de pesquisadores devido à sua capacidade de desenvolver resistência ao capturar CO_2 do ambiente (KUMAR *et al.*, 2020) e à possibilidade de serem usados em conjunto com resíduos contendo SiO_2 em estado amorfo, cuja reação também contribui para o aumento da resistência (MÁRMOL *et al.*, 2016; SONAT; DUNG; UNLUER, 2017; SONAT; UNLUER, 2019).

No entanto, as características do MgO variam muito e podem afetar seu desempenho, de modo a evitar essa variação deve-se estudar a melhor forma de se obter o MgO . Um fato importante a ser analisado em estudos é a produção de brucita decorrente da hidratação do MgO , que possui característica expansiva e consequentemente gera microfissura e enfraquece o mineral, porém é inevitável a sua produção. No entanto, a utilização do óxido de magnésio é muito promissora, pois garante diversos benefícios ao concreto, como citado anteriormente.

2.2. Óxido de magnésio (MgO)

O elevado consumo de energia associado à produção de aglomerantes convencionais, juntamente com a grande demanda por esses materiais, especialmente no setor da construção civil, tem despertado preocupações entre pesquisadores que buscam alternativas para reduzir os impactos ambientais gerados por essa indústria.

Desta forma, em pesquisas sobre aglomerantes de menor consumo energético, o MgO tem se destacado, já que sua produção ocorre em temperaturas entre 400 e 1000 °C, significativamente mais baixas que as necessárias para a produção do cimento Portland, que chega a 1450 °C (KUMAR et al., 2020).

Aglomerantes à base de óxido de magnésio têm sido estudados no setor da construção civil para uso em argamassas, concretos e painéis. Segundo MÁRMOL e SAVASTANO JR. (2017), esses aglomerantes são ideais para compósitos com fibras lignocelulósicas, especialmente na fabricação de painéis, pois a matriz de MgO é menos agressiva às fibras do que a do cimento Portland, que as degrada devido à presença de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2).

Outro fato que pode ser destacado é a indicação do uso do MgO em aglomerantes em ambientes agressivos devido a baixa sensibilidade dos seus produtos hidratados à impurezas (DUNG; UNLUER, 2017). Cabe ressaltar que na China, o MgO tem sido utilizado como aditivo expansivo em aplicações de concreto principalmente na construção de barragens (JIN; AL-TABBAA, 2013).

2.2.1. Processo de fabricação do Óxido de Magnésio

O MgO pode ser obtido através de dois métodos: síntese do composto magnésio oriundo da água do mar ou através da calcinação de fontes contendo magnésio (Mg), tais como brucita (Mg(OH)_2), dolomita ($\text{CaMg(CO}_3)_2$) e magnesita (MgCO_3), sendo este último método o mais utilizado devido ao procedimento de obtenção ser mais simples e demandar menor consumo energético (CHEN et al., 2021).

De acordo com SHAND (2006), a calcinação de 1 kg de magnesita gera 0,48 kg de MgO e 0,52 kg de CO_2 . A emissão de CO_2 na produção de MgO varia com a temperatura de calcinação, resultando em diferentes tipos de MgO. Na faixa de 700 a 1000 °C, é produzido o MgO calcinado cáustico, com alta área de superfície e

reatividade. Entre 1000 e 1500 °C, o MgO queimado é obtido, apresentando menor reatividade. A periclase é formada entre 1400 e 2000 °C, caracterizada por uma estrutura cristalina que reduz a reatividade. Já o MgO fundido, calcinado a 2800 °C, praticamente não apresenta reatividade (NOBRE et al., 2020).

Pesquisas na área da química buscam desenvolver técnicas e materiais que reduzam as emissões de CO₂ geradas na produção de materiais calcinados. O uso de silicato de magnésio na produção de MgO tem se destacado, pois sua reação química não libera CO₂.

O silicato de magnésio pode ser obtido através da reação entre fosforita (Mg₂SiO₄) e CO₂ (LACKNER et al., 1995). Por outro lado, o silicato de magnésio, quando calcinado à 700°C, resulta no produto MgO, que é coletado, e o resíduo SiO₂ (NOVACEM, 2010). Nota-se que a emissão de CO₂ envolvida no processo de fabricação do MgO ocorre apenas por meio do consumo de combustíveis fósseis para que ocorra a calcinação à 700°C.

A produção de MgO a partir do silicato de magnésio resulta em menores emissões de CO₂ comparado ao processo de calcinação da magnesita, sendo uma alternativa promissora para a fabricação desse aglomerante. No entanto, devido à abundância natural da magnesita (SHAND, 2006), essa ainda permanece como a principal fonte para a produção de MgO.

2.2.2. Reatividade do MgO

A reatividade dos compostos do concreto é essencial para suas propriedades mecânicas e durabilidade, influenciando a hidratação dos aglomerantes e a formação de produtos que conferem resistência. Alta reatividade acelera o ganho de resistência e melhora a coesão da matriz, além de favorecer a sustentabilidade ao permitir o uso de adições minerais e reduzir emissões de CO₂.

Desta forma, se tratando do MgO, sua reatividade está diretamente ligada à temperatura de calcinação empregada em sua produção, influenciando a estrutura cristalina e a área de superfície específica do material. Em geral, quanto maior a organização cristalina, menor será sua reatividade (LI et al., 2017).

Segundo estudos realizados por LI et. notou-se que o tempo de reação aumentou consideravelmente em amostras calcinadas acima de 1200°C, indicando diminuição da reatividade decorrente da maior cristalinidade das amostras, que

puderam ser observadas através de picos com maior intensidade no DRX (LI et al., 2017).

2.2.3. Expansão do MgO

No que se refere à expansão dos aglomerantes à base de óxido de magnésio, assim como sua reatividade, depende da temperatura de calcinação usada na produção do MgO. Desta forma, quando a calcinação ocorre em torno de 600°C, o MgO hidrata-se rapidamente e a expansão do aglomerante acontece nas primeiras idades, cessando em cerca de 14 dias (MO et al., 2014). Por outro lado, o MgO calcinado a 1450°C possui baixa reatividade e, conforme o estudo de Kasselouris, Ftikos e Parissakis (1985), o aglomerante produzido com esse MgO alcançou um limite de hidratação de 73,4% após 6 anos.

Vale ressaltar que para utilizar agentes expansivos à base de MgO de forma eficaz no reparo de fissuras e rachaduras, é crucial entender como diferentes variáveis impactam a expansão. A proporção dos materiais, o fator água/aglomerante e o tipo de cura podem alterar o comportamento das matrizes contendo MgO, levando a possíveis tensões internas e microfissuras. Portanto, um conhecimento aprofundado dessas variáveis é fundamental para garantir a eficácia e a durabilidade dos reparos.

2.3. Estudos de cimento à base de Óxido de Magnésio

Como dito anteriormente, a obtenção de MgO reativo é realizada por meio da calcinação de fontes minerais ricas em Mg, como a dolomita, brucita e magnesita, a temperaturas entre 700 e 1000 °C. O MgO é amplamente utilizado em diversas aplicações, como na produção de catalisadores, borracha e papel. Devido à sua alta reatividade, capacidade de sequestrar CO₂ e menor temperatura de produção em comparação ao cimento convencional, estudos recentes têm buscado a substituição parcial deste pelo MgO (JIN e AL-TABBAA, 2014).

O MgO reativo tem cristalinidade relativamente baixa e alta superfície específica, isso explicaria sua alta reatividade, porém deve-se ressaltar que as características do MgO reativo variam significativamente devido a suas diferentes fontes e condições de calcinação. Visando entender essas mudanças e variações, muitos pesquisadores têm se empenhado em busca de resultados positivos e promissores tanto para o material em si, quanto para a junção dele com outros

materiais, para formar pastas, argamassas e concreto, como é o caso do projeto em questão em que haverá a mistura do MgO com a cinza de folha de bambu.

SONAT e UNLUER, estudaram a resistência e o desenvolvimento microestrutural de sistemas ligantes de MgO e MgO-SiO₂ sob diferentes condições de cura. De primeira análise observou-se que a formação de brucita nas amostras de MgO levou a uma resistência limitada sob condições ambientais, porém as amostras de MgO-SiO₂ demonstraram um desenvolvimento constante de resistência devido à formação hidrato de silicato de magnésio (M-S-H). Com a incorporação da cura por carbonatação por 56 dias houve uma melhora no desempenho mecânico de ambos os sistemas, permitindo um rápido desenvolvimento de resistência, com valores de até 77 MPa em 7 dias. Associa-se esse aumento de resistência à danificação da microestrutura através da formação de carbonatos de Mg, avaliados através da análise térmica (SONAT e UNLUER, 2017).

É importante destacar que o tipo de cura utilizado para avaliar o ganho de resistência no sistema MgO-SiO₂ é um fator crucial. Sonat, Dung e Unluer (2017) investigaram o sistema MgO-SiO₂ com diferentes condições de cura. Foram preparadas pastas com 40% de MgO, 60% de microssílica, fator água/aglomerante de 0,5 e 1% de hexametáfosfato de sódio como dispersante. Eles analisaram cinco tipos de cura: selada a 30 ±2°C, em ambiente a 30 ±2°C, submersa a 30°C, submersa a 60°C e em estufa a 60°C, até 56 dias. As análises térmicas, mineralógicas, microestruturais e mecânicas mostraram que a maior liberação de calor ocorreu nas amostras curadas a 60°C, indicando uma hidratação mais rápida em temperaturas elevadas. No entanto, os maiores ganhos de resistência à compressão foram observados nas amostras com cura selada, sugerindo que este ambiente favorece a formação de M-S-H (Sonat, Dung e Unluer, 2017).

JIN e AL-TABBAA propuseram a reação entre o MgO e a sílica ativa e investigaram os produtos de resistência e hidratação da mistura à temperatura ambiente por até 90 dias. Após cerca de 7 dias de cura, verificou-se a existência de hidrato de silicato de magnésio, indicando que quanto maior a formação deste composto, maior a reatividade entre a sílica e o MgO. Como era esperado, o MgO hidratado proporcionou a formação de brucita, que reagiu simultaneamente com sílica dissolvida para formar o hidrato de silicato de magnésio (M-S-H). A fácil formação de M-S-H à temperatura ambiente proporcionou um aumento da resistência mecânica o

que torna a mistura interessante e uma alternativa para produzir adsorventes e materiais de construção de baixo custo (JIN e AL-TABBAA, 2014).

Em outro estudo, SONAT e UNLUER investigaram o uso da cinza de casca de arroz (amorfa e cristalina) como fonte de sílica em amostras de MgO-SiO_2 e compararam com a sílica ativa. Para a análise da resistência à compressão em idades precoces, as amostras contendo cinza de casca de arroz (CCA) amorfa alcançaram valores maiores, com resistência de 34 MPa em 7 dias de cura. Já a longo prazo, amostras contendo sílica ativa obtiveram maiores valores, com resistência de 47 MPa em 56 dias. Tais resultados já eram esperados, porque a taxa de dissolução da CCA amorfa é mais rápida se comparada a da microsílica. Para a combinação de CCA amorfa e MgO , houve a formação de M-S-H, que foi acompanhada de um notável desempenho mecânico (SONAT e UNLUER, 2019).

Além do mais, cabe apresentar também o cimento de fosfato de magnésio resulta da reação entre MgO e fosfato solúvel, formando fases que proporcionam resistência mecânica, como struvita ($\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), newberyta ($\text{MgHPO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), hannayita ($(\text{NH}_4)_2\text{Mg}_3\text{H}_4(\text{PO}_4)_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$), entre outras (MÁRMOL, 2017). No entanto, seu uso na construção civil ainda é limitado devido a características como reatividade ácido-base, deformações, curto tempo de pega e baixa resistência à água (WANG et al., 2023; ZHANG et al., 2023).

O cimento à base de oxissulfato de magnésio é composto de MgO , sulfato de magnésio e água, formando fases que conferem resistência mecânica. Suas propriedades são semelhantes às do cimento de fosfato de magnésio, embora sua resistência diminua em contato com a água, estudos mostram que a adição de ácido cítrico pode reduzir a porosidade e melhorar essa resistência, preenchendo poros e microfissuras com cristais específicos (WANG et al., 2018).

MARMÓL e SAVASTANO analisaram o uso de compósitos à base de cimento de óxido de magnésio e sílica (MgO-SiO_2) reforçados com fibras de celulose, com o objetivo de produzir elementos finos resistentes a cargas de flexão. O estudo visava obter a durabilidade das fibras e a comparação do desempenho flexural das amostras aos 28 dias e após 200 ciclos de envelhecimento acelerado. Para as fibras, foram utilizadas polpas de eucalipto e de pinus, que junto ao cimento de MgO-SiO_2 apresentaram melhor desempenho mecânico que as amostras de cimento Portland, isso ocorre pois o MgO-SiO_2 preserva a integridade das fibras. Com os resultados encontrados nota-se que a utilização de cimentos de MgO-SiO_2 é uma alternativa

para a aplicação de fibras celulósicas para reforçar produtos de fibrocimento (MARMÓL e SAVASTANO, 2017).

Sendo assim, com base em estudos realizados, percebe-se que a utilização de MgO vem sendo cada vez mais empregada na construção civil devido ao seu ótimo desempenho. Além disso, o MgO pode não apenas levar um ganho de resistência, mas também trazer benefícios ambientais e econômicos.

2.4. Estudos de cimento à base cinza de folha de bambu

O bambu é um material renovável muito utilizado para alimentação em países tropicais e subtropicais, agricultura, construção, fibra, papel e indústrias, sendo seu uso estimado em 20 milhões de toneladas. As Indústrias geram uma imensa quantidade de resíduos de bambu, porém quando calcinado a uma temperatura de 600 °C por duas horas produz material com reatividade pozolânica, tendo eficácia para a produção de argamassa e concreto. Em estudo realizado, notou-se que as Cinzas de Folha de Bambu (CFB) substituem os espaços cheios de água ao redor das partículas, fazendo com que haja menos fricção e uma melhor trabalhabilidade (NDUKA *et al.*, 2022).

Visando aproveitar a abundância de recursos naturais pouco explorados, como o bambu, tem-se realizado muitos estudos, principalmente nas duas últimas décadas, sobre materiais alternativos que visam substituir parcialmente o cimento. Seu objetivo, além de reduzir impactos ambientais, é desenvolver concretos de alto desempenho e que satisfaçam os requisitos a eles estabelecidos. Como uma alternativa, estuda-se a cinza de folha de bambu.

As cinzas resultantes da queima das folhas de bambu, quando processadas de forma adequada, podem ser incorporadas ao sistema MgO-SiO₂, devido ao seu alto teor de SiO₂ amorfo. Seu potencial para formar M-S-H e melhorar a resistência mecânica é analisado com o intuito de substituir a sílica ativa nas matrizes à base de MgO.

Diversos estudos investigam o potencial das cinzas de folha de bambu como material pozolânico. Cinzas produzidas por queima controlada a 600°C, em forno rotativo apresentaram 80,4% de SiO₂ de natureza amorfa, como mostrado na Figura 1 (VILLAR- COCIÑA *et al.*, 2011).

Figura 1: Cinzas de folha de bambu após o processo de calcinação



Fonte: (VILLAR-COCIÑA et al., 2011).

NDUKA *et al.* estudaram a viabilidade da junção da cinza de folha de bambu (CFB) e cimento Portland (CP) para desenvolvimento de um concreto de alto desempenho. Analisando as CFB, notou-se em sua composição partículas irregulares, angulares e em forma de agulha, o que concluiu que as amostras eram de um material amorfo, explicando-se assim sua reatividade. Analisaram no estudo amostras contendo 5%, 10% e 15% de CFB e concluíram que a incorporação da cinza melhorou as qualidades mecânicas, durabilidade e trabalhabilidade, principalmente para as amostras contendo 10% de cinza de folha de bambu, ressaltando que isso ocorre quando submetido a condições padrões do ambiente (ambiente pouco ácido) (NDUKA *et al.*, 2022).

SILVA *et al.* produziram e caracterizaram cinzas de folha de bambu, de modo a analisar sua viabilidade na composição de argamassas. No que se refere à caracterização química e física, utilizou-se o método de fluorescência de raios X, difração de raios X e a granulometria a laser, confirmando-se que a CFB possui atividade pozzolânica e elevado potencial para ser adicionado a cimentos. Após isso, foram confeccionadas amostras com 10%, 20% e 30% de CFB em substituição ao cimento convencional. Observou-se que as argamassas com 30% de CFB apresentaram resistências muito próximas em todos os períodos de cura se comparadas às amostras com CP. Além disso, o uso de cinza de folha de bambu pode reduzir os custos em até 23,71% e cerca de 30% das emissões de CO₂ e energia incorporada, tudo isso mostra a viabilidade da CFB (SILVA *et al.*, 2021).

FRÍAS *et al.* promoveram o estudo científico sobre a cinza de folha de bambu calcinada a 600 °C em pequena escala, visando analisar seu comportamento quando

misturada ao cimento. As amostras foram confeccionadas com 10% e 20% de CFB em substituição ao cimento, ressaltando-se que foi necessária uma maior quantidade de água para obter uma consistência parecida à da argamassa composta por cimento Portland. Como primeira análise, notou-se que os tempos de pega foram semelhantes ao da amostra controle e não apresentaram instabilidade de volume. Se tratando de resistência à compressão, as argamassas contendo CFB apresentaram valores muito próximos aos da amostra controle a partir de 28 dias de cura (FRÍAS *et al.*, 2012).

KOLAWOLE *et al* avaliaram a junção da cinza de folha de bambu e resíduos de tijolos de argila para formação de um compósito cimentício sustentável com resistência e durabilidade adequadas. Os resultados mostraram que ambos podem ser combinados em proporções de 10% de cada em substituição ao cimento Portland, alcançando força e resistência aceitáveis a ataques químicos. Além disso, conclui-se que a junção desses dois materiais poderia melhorar a sustentabilidade da produção de concreto, reduzindo a emissão de CO₂ em torno de 19%, a energia incorporada em 15% e o custo em 10%, sem aumentar a demanda de energia para atingir a resistência semelhante ao do CP (KOLAWOLE *et al.*, 2021).

No estudo de Moraes *et al.* (2019), foram produzidas CFB para avaliar sua capacidade pozolânica. Para determinar o teor de SiO₂ amorfo as cinzas foram caracterizadas, sendo obtido 74,23%, dos quais 92,33% eram SiO₂ amorfo, conforme os resultados do ensaio de fluorescência de raios X. O ensaio de Difractometria de Raios X confirmou essa característica, mostrando desvio da linha base entre $2\theta = 15^\circ$ - 35° e picos de quartzo, indicativos de contaminação por solo das folhas. A perda ao fogo, que se refere à matéria orgânica na cinza, foi de 11,43%. A reatividade pozolânica das cinzas foi testada com Ca(OH)₂, resultando na classificação das cinzas como altamente reativas, demonstrando seu potencial para substituir parcialmente o cimento Portland em matrizes cimentícias (Moraes *et al.*, 2019).

No estudo de Moraes *et al.* (2019) foram produzidas CFB para investigação da capacidade pozolânica do material. As cinzas foram caracterizadas para determinação do teor de SiO₂ amorfo, em que, através do ensaio de composição química (fluorescência de raios x), foi obtido 74,23% e, desse valor, 92,33% correspondem à SiO₂ amorfo. Através do ensaio de Difractometria de Raios X também foi possível observar essa característica, uma vez que o Difractograma apresentou desvio da linha base entre $2\theta = 15^\circ$ - 35° e picos de quartzo referentes à contaminação com solo das folhas de bambu que foram coletadas do chão. Foi obtido 11,43%

referente à perda ao fogo proveniente da matéria orgânica presente na cinza. A reatividade pozolânica foi avaliada por meio de ensaios utilizando Ca(OH)_2 , em que as cinzas foram classificadas como de alta reatividade, se mostrando uma alternativa de substituição parcial de cimento Portland em matrizes cimentícias (Moraes et al., 2019).

UMOH e ODESOLA, estudaram a incorporação da cinza de folha de bambu ao cimento Portland. Para a resistência à compressão notou-se um aumento com a idade de cura, podendo destacar a amostra contendo 15% de CFB, que alcançou valores próximos ao da amostra referência aos 28 ou mais dias de cura. Observou-se também que a absorção de água e a porosidade aparente aumentaram com o aumento de CFB, enquanto a densidade aparente diminuiu à medida que a porcentagem de CFB aumenta. Desta forma, conclui-se com o estudo que a substituição de 15% de CFB é o ideal para produção de argamassa de alvenaria (UMOH e ODESOLA, 2015).

Estudos realizados por ODEYEMI *et al.* tiveram o intuito de obter um concreto de alto desempenho, para isso houve a incorporação de 5%, 10%, 15% e 20% de cinza de folha de bambu em substituição ao concreto convencional (à base de cimento Portland). O concreto obtido com essas combinações foi submetido a ensaios de resistência à tração e compressão e à ruptura aos 7, 28 e 56 dias de cura. Notou-se com os ensaios que a resistência ótima se dava para o concreto com 5% de CFB aos 56 dias de cura, ressaltando que tal valor foi maior que o obtido para a amostra controle, isso ocorre porque há um melhor intertravamento dos grãos do concreto (ODEYEMI *et al.*, 2022).

NEHRING *et al.* analisaram a capacidade da cinza de folha de bambu em atuar como agente mitigador diante de ambientes com ataques ácidos. Foram produzidas argamassas com 20% e 30% de CFB e seus corpos de prova foram curados em ambiente ácido (5% de ácido sulfúrico). Os ensaios de resistência à flexão e compressão, aos 7 e 28 dias de cura, mostraram valores muito próximos aos do concreto convencional (Portland). Porém, ao avaliar a perda de massa, os corpos de prova referência apresentaram maior perda em relação aos constituídos por CFB, mostrando a viabilidade da utilização da cinza de folha de bambu como substituto ao CP (NEHRING *et al.*, 2022).

A construção civil não somente tem buscado opções mais baratas para o mercado, como também materiais que possam levar um maior conforto ao

consumidor. Diante disso, CALDAS *et al* analisaram a adaptação às mudanças climáticas dos edifícios utilizando bambu incorporado a concreto. A pesquisa foi realizada na cidade de Curitiba e notou-se que as estruturas de bioconcreto de bambu apresentaram menor impacto climático, com reduções de até 42% em comparação com estruturas feitas em concreto convencional, concluindo-se que em cidades com climas mais amenos o uso do bioconcreto de bambu mostra-se mais benéfico, pois diminui o consumo de energia (CALDAS *et al.*, 2020).

Embora tenham sido desenvolvidos trabalhos, como os citados anteriormente, ainda existem muitos pontos a serem estudados, como é o caso da junção da cinza de folha de bambu e do óxido de magnésio. A mistura destes pode vir a ser uma alternativa a ser utilizada no mercado. Dentre os benefícios cabe citar a redução de custos, principalmente porque a sílica (muito utilizada atualmente) teve um aumento significativo do preço de mercado. Além disso, o mundo vem enfrentando problemas relacionados ao esgotamento dos recursos naturais e a procura por novos materiais pode vir a ser uma alternativa, um ponto positivo do bambu é que são plantas de rápido crescimento o que torna ainda mais viável a sua utilização. Com isso, o grupo planeja iniciar mais pesquisas sobre a cinza de folha de bambu.

3. OBJETIVOS

O objetivo deste estudo foi analisar o efeito da adição de cinzas provenientes da queima de folhas de bambu no comportamento de pastas de óxido de magnésio (MgO), com o intuito de desenvolver um aglomerante alternativo à base de MgO.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Materiais

4.1.1. Óxido de Magnésio

Para a confecção das pastas estudadas, foi utilizado óxido de magnésio Q-MAG-200-AR (AR200), obtido pela calcinação controlada de $MgCO_3$ feita à 1000-1500°C, fabricado por Magnesita S.A., Contagem, MG, Brasil e fornecido por Minérios Ouro Branco, São Paulo, SP, Brasil.

4.1.2. Demais materiais

Para a interrupção dos processos de reação por troca de solvente utilizou-se Álcool Isopropílico (99,5% de pureza) fabricado por Êxodo Científica Química Fina Indústria e Comércio LTDA, Sumaré, SP, Brasil.

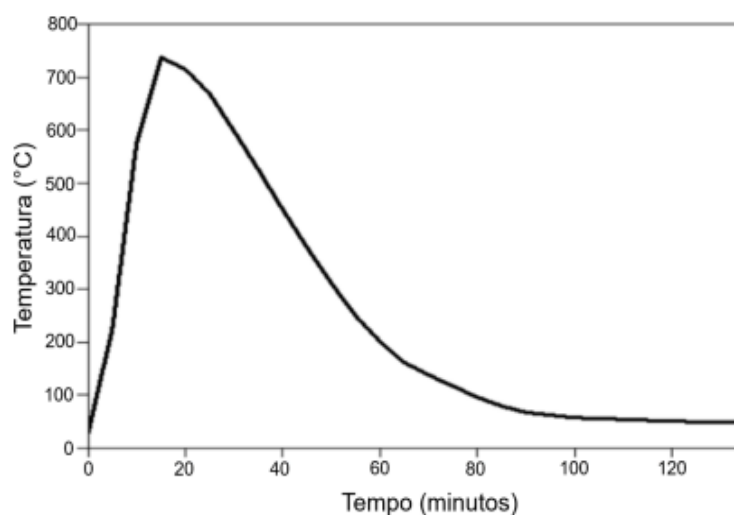
Já a água utilizada para o preparo das pastas foi obtida do abastecimento público da cidade de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil. Antes de ser utilizada, a água deverá passar por um processo de deionização, resultando em uma condutividade final de 7,29 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

4.2. Preparação de amostras

4.2.1. Produção das cinzas da folha de bambu (CFB)

O processo de fabricação da CFB, foi desenvolvido de acordo com Moraes (2019). Para tal, foram coletadas folhas de bambu em uma fazenda (localização Geodésico decimal -20,4551585, -51,3498667). As folhas decorrentes da perda natural das plantas foram recolhidas do chão e acondicionadas em sacos. Posteriormente, foram calcinadas em um forno desenvolvido por Tashima (2006), com monitoramento da temperatura através de termopares e tal variação é visualizada na Figura 2 a seguir.

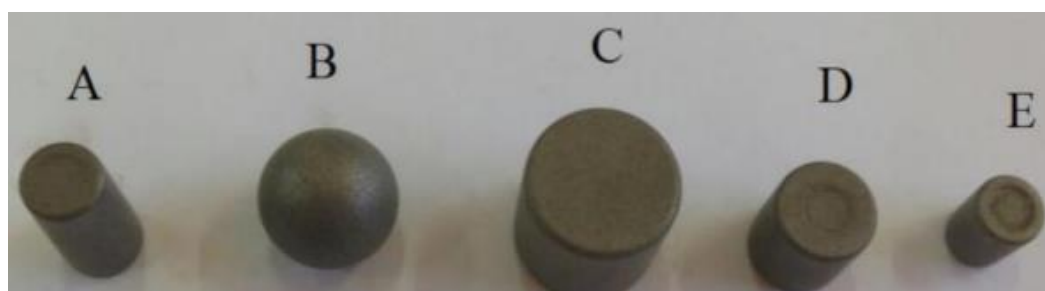
Figura 2: Curva de variação da temperatura ao longo do tempo durante a calcinação da CFB.



Fonte: (MORAES, 2019).

Com a análise da curva, observa-se que a temperatura máxima de 738 °C foi alcançada 15 minutos após o início da queima. Após 100 minutos, a temperatura estabilizou em cerca de 50 °C. Após o processo de calcinação, a cinza foi peneirada para eliminar impurezas, utilizando-se uma peneira ASTM #50 (0,3 mm), vibrada por 7 minutos. Em seguida, 15 kg da cinza foram moídos em um moinho de bolas por 50 minutos. Foram utilizadas 19 peças do tipo A (3,8 kg), 255 do tipo B (17,9 kg), 260 do tipo C (18,1kg), 115 do tipo D (3,0kg) e 405 do tipo E (23,7kg), totalizando-se 1054 peças e 66,5 kg, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3: Componentes do moinho utilizados na moagem da cinza



Fonte: (MORAES, 2019)

4.3. Preparação das pastas de MgO E MgO-CFB

4.3.1. Preparação das pastas

As pastas de MgO e MgO-CFB foram fabricadas pela mistura dos materiais em proporções adequadas utilizando uma argamassadeira. Estudou-se as variações da relação água/ligante (a/c) e da proporção de cinzas nas misturas. No processo de mistura adicionou-se a água inicialmente ao recipiente da argamassadeira, seguida pelos materiais anidros. Necessitou-se diferentes períodos de mistura para garantir a homogeneização das pastas. Desta forma, foi necessário um período de três minutos para as pastas de MgO, enquanto um período de oito minutos para as pastas de MgO e cinzas.

Vale ressaltar que as amostras à base de MgO puro foram identificadas como MgO_ac_x, sendo que x representa a relação água/cimento utilizada. As amostras produzidas com MgO e cinzas de folha de bambu foram nomeadas como CFBY%_ac_x, sendo que Y a porcentagem de cinzas utilizada em relação ao total de sólido. De modo a facilitar o entendimento, segue abaixo os Quadros 1 e 2 que

resumem as composições e variações estudadas. Foram moldados 3 corpos de prova cúbicos 50 x 50 x 50 mm para cada traço analisado.

Quadro 1: Composição da mistura utilizada para execução das pastas de MgO puro

Identificação da mistura	Relação água/aglomerante	Proporção (%)		Tempo de mistura (minutos)	Relação molar (Mg/Si)
		MgO	CFB		
MgO_ac_0,5	0,5	100	0	3	-
MgO_ac_0,6	0,6	100	0	3	-
MgO_ac_0,7	0,7	100	0	3	-

Fonte: Elaborado pelo autor

Quadro 2: Composição da mistura utilizada para execução das pastas contendo MgO e CFB

Identificação da mistura	Relação água/aglomerante	Proporção (%)		Tempo de mistura (minutos)	Relação molar (Mg/Si)
		MgO	CFB		
CFB30%_ac_0,5	0,5	70	30	8	3,40
CFB30%_ac_0,6	0,6	70	30	8	3,40
CFB30%_ac_0,7	0,7	70	30	8	3,40
CFB40%_ac_0,5	0,5	60	40	8	2,25
CFB40%_ac_0,6	0,6	60	40	8	2,25
CFB40%_ac_0,7	0,7	60	40	8	2,25
CFB50%_ac_0,5	0,5	50	50	8	1,50
CFB50%_ac_0,6	0,6	50	50	8	1,50
CFB50%_ac_0,7	0,7	50	50	8	1,50
CFB60%_ac_0,5	0,5	40	60	8	1,00
CFB60%_ac_0,6	0,6	40	60	8	1,00
CFB60%_ac_0,7	0,7	40	60	8	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.2. Metodologia de interrupção dos processos de reação

Para a caracterização das pastas de MgO e MgO-CFB, a reação de hidratação do MgO foi interrompida pelo método de troca de solvente. Para tal, fragmentos advindos dos ensaios mecânicos ou porções das pastas nos períodos de 30 min, 1, 3, 7 e 28 dias foram maceradas por 3 min com a ajuda de um almofariz e pestilo. O pó resultante foi imerso em Álcool Isopropílico por 15 min e posteriormente pré-secado à vácuo por 3 minutos. Finalizou-se o processo de secagem em estufa à temperatura de 60°C por 30 min. As amostras resultantes novamente foram maceradas por 3 min e peneiradas em uma peneira de 75 µm. O material passante foi armazenado em eppendorfs para posterior utilização.

Moldou-se 3 corpos de prova prismáticos 25 x 25 x 285 mm. Para o procedimento de cura também foi seguido o mesmo utilizado para as demais amostras.

4.4. Caracterização

4.4.1. Caracterização físico-química e mecânica

4.4.1.1. Fluorescência de Raios X (FRX)

Medidas de fluorescência de raios X (FRX) foram realizadas em um espectrômetro Rigaku modelo ZSX Primus IV, equipado com tubo de Rh. Para análise dos óxidos maiores, a calibração deve ser realizada com uma curva de calibração composta por padrões de rochas e minerais naturais certificados.

4.4.1.2. Perda ao fogo

O ensaio de perda ao fogo foi conduzido de acordo com a norma NBR NM 18 (ABNT, 2012), método nº1. De primeiro momento, 1,00 g de cada material anidro (MgO e CFB) foram pesados em uma balança de precisão e colocados em cadinhos de porcelana de massa conhecida. Esses materiais foram mantidos em estufa a 100°C por 24 horas para eliminar qualquer umidade residual nas amostras. Em seguida, as amostras foram colocadas em uma mufla e aquecidas a uma taxa de 10°C/min até atingirem 900°C, temperatura mantida por 60 minutos. Após o resfriamento, as amostras foram novamente pesadas e os cálculos da perda ao fogo realizados, seguindo a Equação 1.

$$PC/PF = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100 \quad (1)$$

Onde: PC/PF = Perda de fogo, em %;

m_1 = massa do cadinho mais a massa de amostra ensaiada, em gramas;

m_2 = massa do cadinho mais a amostra, após a calcinação, em gramas;

m = massa da amostra utilizada no ensaio, em gramas.

Vale ressaltar que foram realizados testes em triplicata e os valores médios são apresentados neste estudo.

4.4.1.3. Granulometria

Para a determinação da distribuição granulométrica das partículas e diâmetro médio da CFB, foi realizada a granulometria a laser. O equipamento utilizado é o Mastersizer 2000 – Hydro 2000MU (A) da Malvern Instruments. Este equipamento permite a medição de partículas entre 0,020 μm e 2000 μm . Além disso, foi utilizada água destilada como dispersante.

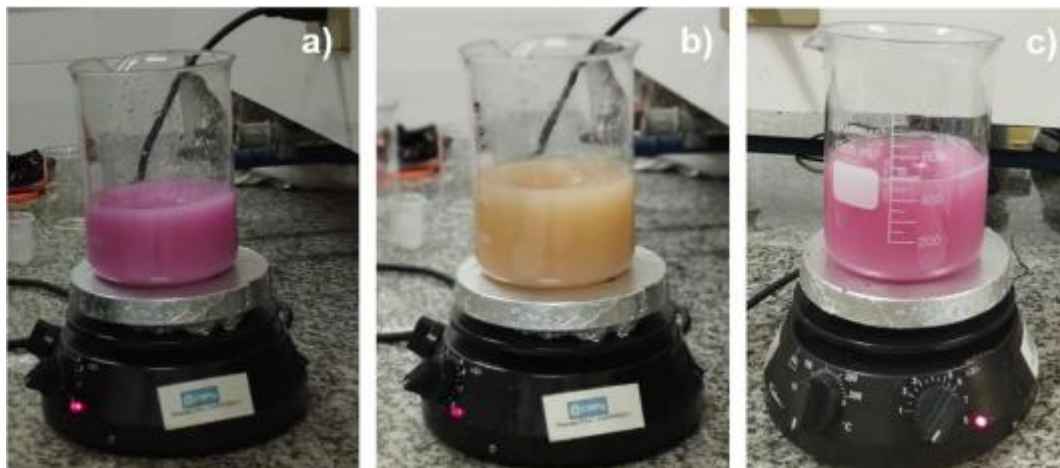
4.4.1.4. Reatividade do MgO

Para o ensaio de reatividade do MgO, adotou-se o método descrito por Shand (2006). De início, foram misturados 5,00 g de MgO com 300 mL de água deionizada por um tempo de 3 minutos. Vale ressaltar que a solução apresentou a mesma coloração do MgO anidro. Em outro béquer, preparou-se uma solução de ácido acético com concentração de 1,0 Normal (N) e volume de 100 mL.

À mistura de água e MgO, foram acrescentadas 10 gotas de fenolftaleína 1% como indicador ácido-base, e a solução foi agitada em um agitador magnético (Figura 4 (a)). Logo em seguida, sob agitação, a solução de ácido acético foi adicionada à solução contendo MgO e água (Figura 4 (b)). Nesse momento, a coloração da solução alterou-se novamente para a cor característica do MgO anidro, indicando um meio ácido. Registrou-se o tempo necessário para que a solução retornasse a sua coloração rosada, indicando a mudança do meio ácido para básico decorrente da reação do MgO com a água (Figura 4 (c)). O resultado da reatividade foi expresso em termos do tempo segundo o qual o sistema altera sua característica ácida para básica.

Vale ressaltar que foram realizados testes em triplicata e os valores são apresentados neste estudo.

Figura 4: Ensaio de reatividade do MgO: a) MgO, água e fenolftaleína; b) após o acréscimo do ácido acético e c) mudança de coloração da solução



Fonte: Chotolli, 2024.

4.4.1.5. Temperatura em escala temporal

A reação das pastas foi monitorada por meio de curvas de temperatura em relação ao tempo de cura, com duração de 24 horas. Para realizar as medições, deve-se utilizar um termômetro datalogger MT-600 Minipa, equipado com canais e interface RS-232, com resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$ e precisão básica de $0,1\% + 0,7^{\circ}\text{C}$. O termopar a ser utilizado é do tipo K.

Para a confecção das pastas, todos os materiais a serem empregados, em especial a água, foram mantidos a uma temperatura controlada de $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ por um período de 24 horas. Preparou-se as pastas conforme descrito no item 3.3.1. Em seguida, alíquotas das pastas foram colocadas em fôrmas metálicas com dimensões $50 \times 50 \times 50$ mm. Envolveu-se as formas com plástico filme e o termopar foi inserido até o centro do sistema. O ensaio foi realizado em uma sala com temperatura controlada a $25 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$ e teve início após 10 minutos da mistura inicial entre os materiais. Deve ser empregado nas medições uma resolução de medida de 1°C por min. É importante destacar que os dados foram apresentados neste estudo e tratados com um skip point de 10, visando uma melhor visualização das tendências das curvas.

4.4.1.6. Difratometria de Raios X

Para determinação mineralógica e composicional das amostras serão realizados ensaios de Difratometria de Raios X. Foi utilizado um equipamento modelo

XRD-6000 da empresa Shimadzu, com radiação Cu-Ka ($\lambda = 1,54056 \text{ \AA}$) e filtro de Ni. Além disso, as varreduras foram realizadas em uma taxa de varredura de $2^\circ/\text{min}$ na faixa angular de $5^\circ - 70^\circ$, a 30 kV e 40 mA.

4.4.1.7. Resistência à compressão axial

Para esta etapa, os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados em diferentes idades: 1 dia, 3 dias, 7 dias e 28 dias para as amostras contendo MgO com CFB, e 3 dias, 7 dias e 28 dias para as amostras contendo apenas MgO. É importante lembrar que as amostras de pastas de MgO com 1 dia de cura não tiveram resistência suficiente para serem desformadas, ocasionando a quebra das amostras. Os ensaios foram realizados no laboratório de Engenharia Civil da FEIS/UNESP, utilizando uma prensa universal da marca Emic, modelo PC 200, seguindo a norma C 579 (ASTM, 2018), que estabelece os procedimentos necessários para a realização dos ensaios e obtenção dos resultados. Os corpos de prova utilizados nos ensaios serão prismáticos, com dimensões de 50x50x50 mm, de acordo com o método B da norma C 579 (ASTM, 2018) para ensaios de resistência à compressão. As misturas foram colocadas nas fôrmas e compactadas utilizando mesa vibratória por um período determinado. Após a moldagem, os corpos de prova, juntamente com as fôrmas foram embalados com plástico filme e colocados dentro de sacos plásticos para realização da cura selada. As fôrmas embaladas foram colocadas em uma câmara úmida com 95% de umidade relativa e temperatura de $28 \pm 0,5^\circ\text{C}$, por um período de 24 horas, com o objetivo de manter a temperatura constante. Após esse período, retirou-se os corpos de prova das fôrmas e foram embalados novamente. Eles permaneceram embalados na câmara úmida até atingirem a idade correspondente ao ensaio.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Caracterização das propriedades físico-química dos materiais

A caracterização das propriedades físico-químicas dos materiais é essencial para entender seu comportamento, desempenho e sua adequação a diferentes aplicações. Ela possibilita determinar a composição, estrutura e reatividade dos materiais, sendo essencial para aprimorar os processos de produção, elevar a qualidade, antecipar sua durabilidade e reduzir os impactos ambientais. Além disso,

essa análise é fundamental para o desenvolvimento de novos materiais e para garantir a segurança e eficiência em diversas indústrias, como a construção civil.

5.1.1. Óxido de Magnésio (MgO)

O MgO tem sido estudado como alternativa sustentável aos aglomerantes convencionais, pois sua produção requer menos energia, com temperaturas inferiores às do cimento Portland. Além do mais, o MgO tem sido explorado para uso em argamassas, concretos e painéis.

Para utilizar esse material de forma eficaz na construção civil, é fundamental compreender suas propriedades físico-químicas. Vale ressaltar que essas características são determinadas por meio de técnicas específicas, como: a fluorescência de raios X, que permite analisar sua composição química, a perda ao fogo, que avalia a estabilidade térmica e a quantidade de material volátil, a difratometria de raios X, utilizada para identificar a estrutura cristalina, e a análise de reatividade, que examina o comportamento do material em diferentes condições químicas e ambientais. Esses aspectos são essenciais para garantir sua adequação e excelente desempenho em aplicações construtivas.

5.1.1.1. Fluorescência de Raios X (FRX) e perda ao fogo

A Fluorescência de Raios X (FRX) é uma técnica analítica utilizada para determinar a composição química de um material, identificando e quantificando os elementos presentes com base na emissão de raios X quando o material é excitado por uma fonte de radiação. Já no que se refere a perda ao fogo, trata-se de um teste que mede a quantidade de massa que um material perde após ser submetido a altas temperaturas, indicando a volatilização de substâncias como água, gases ou impurezas. Ambas as técnicas são essenciais para a caracterização físico-química de materiais.

Desta forma, as propriedades físicas e químicas do óxido de magnésio são influenciadas por diversos fatores, como o tipo de precursor e sua morfologia, a temperatura e o tempo de calcinação, as impurezas presentes e sua composição, além da granulometria, que afeta a área de superfície final. O Quadro 3 apresenta a composição química do MgO anidro, determinada por ensaio de fluorescência de raios X.

Quadro 3: Composição química do MgO anidro

Composição química	
Fórmula	%
MgO	92,44
Na ₂ O	3,63
SiO ₂	1,02
CaO	0,84
SO ₃	0,57
Cl	0,32
P ₂ O ₅	0,28
Al ₂ O ₃	0,11
K ₂ O	0,03
PF*	0,76

Nota: *Perda ao fogo

Fonte: Elaborado pelo autor.

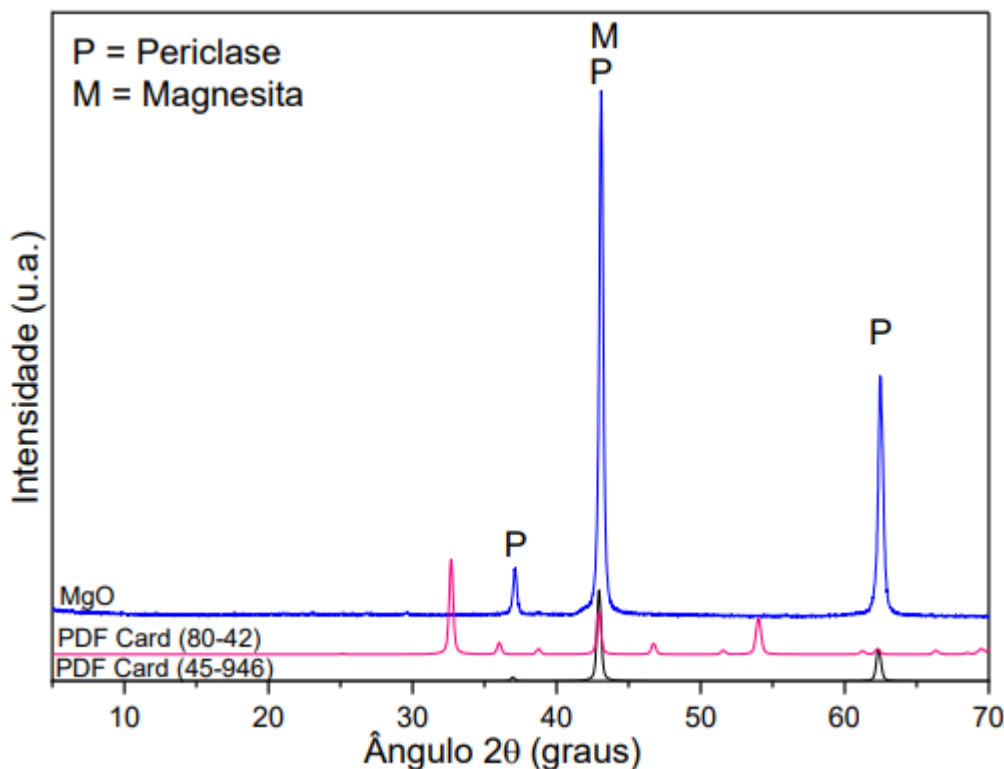
Analisando o quadro acima, nota-se que os resultados indicam que o precursor possui alta pureza, com baixa perda ao fogo e uma composição de MgO superior a 92%. Impurezas comuns em rochas de magnesita, como CaO e SiO₂ (WANG et al., 2019), representam menos de 2%, enquanto a presença de N₂O pode ser atribuída a contaminações no processo de produção.

5.1.1.2. Difractometria de Raios X

A Difractometria de Raios X é uma técnica utilizada para identificar e caracterizar a estrutura cristalina dos materiais, analisando como os raios X são espalhados pela amostra. Essa análise revela a disposição dos átomos e identifica fases cristalinas, ajudando a caracterizar a estrutura e os parâmetros dos materiais, como o tamanho e a forma dos cristais.

Sendo assim, a Figura 5 mostra o difratograma de raios X para a amostra de MgO anidro.

Figura 5: Difratograma de raios X (MgO anidro)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a figura, nota-se que a presença da estrutura periclase do MgO é confirmada pelos picos de difração em $2\theta = 37,1^\circ$; $43,1^\circ$ e $62,5^\circ$ [PDF Card n° 45-946] (SONAT; UNLUER, 2019). Apesar de o processo de calcinação industrial ter ocorrido a altas temperaturas ($1000-1500^\circ\text{C}$), não houve conversão total da magnesita em óxido de magnésio, com a estrutura da magnesita identificada pelo pico em $2\theta = 43,1^\circ$ [PDF Card n° 80-42]. Não foram detectados compostos residuais no padrão de difração, provavelmente devido à baixa concentração desses compostos na amostra analisada.

5.1.1.3. Granulometria do MgO

Conhecer a granulometria dos materiais é crucial na confecção de pastas, pois influencia diretamente suas propriedades mecânicas, reológicas e de durabilidade. A distribuição granulométrica afeta a trabalhabilidade da pasta, a sua densidade e a quantidade de água necessária para obter a consistência desejada. Um controle

adequado da granulometria garante uma pasta com melhor desempenho e maior uniformidade, essencial para aplicações específicas na construção civil e em processos industriais.

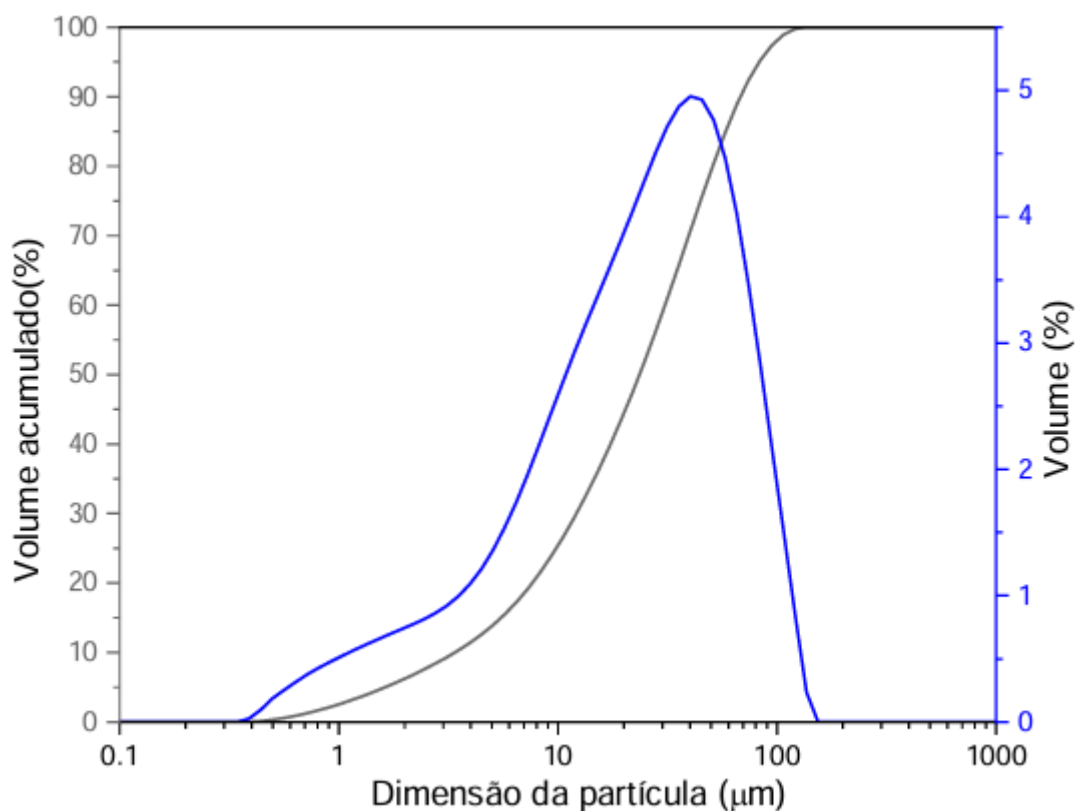
Desta forma, foi realizado a distribuição granulométrica para o MgO, onde A média do tamanho das partículas de MgO foi de aproximadamente 34 μm , conforme mostrado na distribuição granulométrica (Figura 6). A Tabela 1 apresenta um resumo dos dados de distribuição granulométrica obtidos para o MgO.

Tabela 1: Distribuição granulométrica do MgO

Diâmetro médio (μm)	d (0,1)	d (0,5)	d (0,9)
34,404	3,832	26,634	76,886

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 6: Distribuição granulométrica do MgO



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1.1.4. Reatividade do MgO

A reatividade de um material é vital na fabricação de pastas, pois afeta sua interação com água e aditivos, influenciando a adesão, durabilidade, e propriedades finais da pasta. Ela determina a eficiência do processo de cura e a qualidade do produto final.

O Quadro 4 apresenta os resultados do ensaio de reatividade química realizados em triplicata.

Quadro 4: Resultados do ensaio de reatividade química por tempo

Identificação	Tempo (S)
Ensaio 1	907
Ensaio 2	893
Ensaio 3	921
Média	907

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o quadro, tem-se que o MgO apresentou uma reatividade química média de $907 \pm 14 \text{ s}^{-1}$. Altas temperaturas de calcinação acima de 1000°C promovem uma maior organização e crescimento do cristal, resultado em menores valores de distorção das estruturas e, conseqüentemente, menor reatividade dos sistemas (LI et al., 2017).

Hay et al. (2021) avaliaram o tempo de reatividade e registraram 520 segundos para a reatividade do MgO testado, observando um rápido aumento na resistência mecânica nas fases iniciais, o que sugere uma boa reatividade do MgO com a fonte de SiO_2 utilizada. Em outro estudo, Jin e Al-Tabbaa (2014) analisaram o tempo de reatividade de dois tipos de MgO e encontraram valores de 976 e 100 segundos. Eles notaram que o MgO com o menor tempo de reatividade apresentou resistência mecânica significativamente superior, inclusive nas primeiras fases de cura, indicando um desenvolvimento mais rápido e eficiente do M-S-H.

5.1.2. Cinza de Folha de Bambu (CFB)

5.1.2.1. Fluorescência de Raios X (FRX) e perda ao fogo

O Quadro 5 apresenta a composição química da CFB em relação aos óxidos presentes, determinada por ensaio de fluorescência de raios X.

Quadro 5: Composição química da CFB anidra

Composição química	
Fórmula	%
SiO ₂	82,00
Fe ₂ O ₃	5,36
Al ₂ O ₃	4,10
CaO	1,84
TiO ₂	1,20
MgO	1,01
K ₂ O	0,96
P ₂ O ₅	0,30
Na ₂ O	0,16
MnO	0,11
PF*	3,97

Nota: *Perda ao fogo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base no gráfico acima, observa-se que as cinzas exibem uma característica silicosa, com um teor de SiO₂ de 82%, dos quais 92,33% estão em estado amorfo (MORAES et al., 2019). Pequenas quantidades de Fe₂O₃ e Al₂O₃ foram detectadas, cerca de 5,36% e 4,10%, respectivamente. Outros óxidos presentes têm valores abaixo de 6%. A perda ao fogo registrada foi de 3,97%, um valor baixo, típico

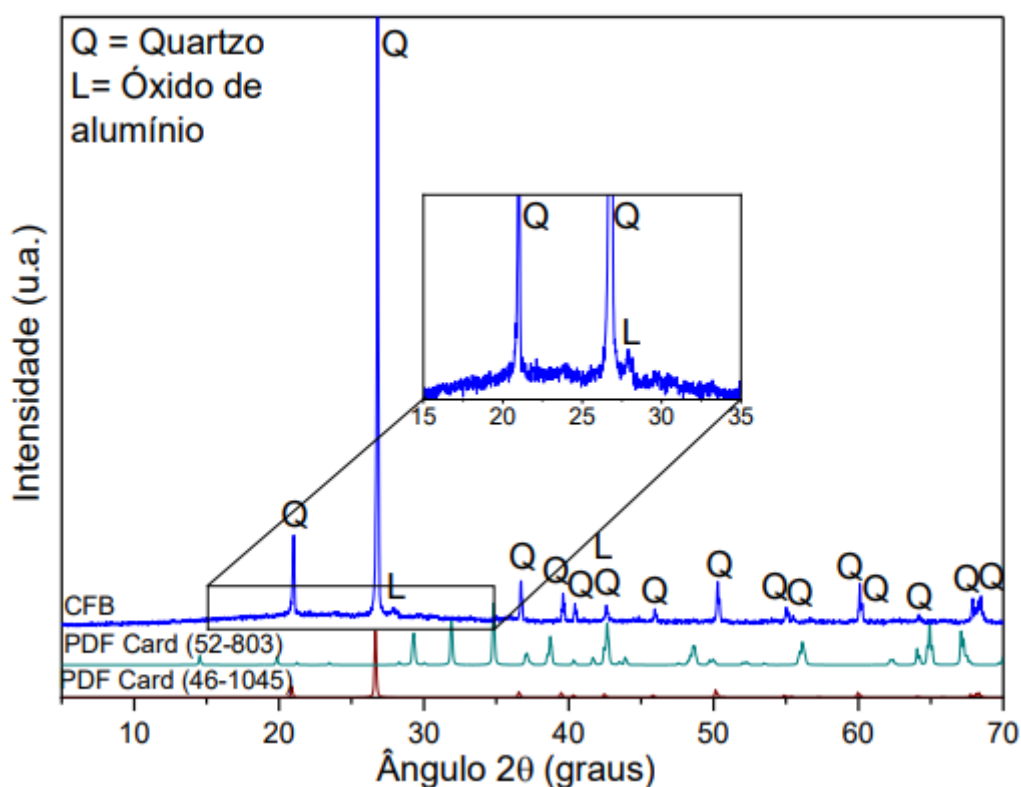
de sistemas provenientes de queima controlada, como as cinzas (SILVA et al., 2021; SONAT; UNLUER, 2019).

5.1.2.2. Difratometria de Raios X

De modo a entender a disposição dos átomos e identificar fases cristalinas da CFB, com o intuito de caracterizar a estrutura e os parâmetros do material, como o tamanho e a forma dos cristais, foi realizada a difratometria de raios X.

Sendo assim, a Figura 7 mostra o difratograma de raios X para a amostra de CFB.

Figura 7: Difratograma de Raios X (CFB anidra)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a figura, nota-se que o difratograma revela um desvio na linha-base entre os ângulos de $2\theta = 15^\circ - 35^\circ$, sugerindo a presença de fases com características amorfas. Foram identificados padrões de difração típicos do quartzo nos ângulos $2\theta = 20^\circ, 26,5^\circ, 35,7^\circ, 36,7^\circ, 39,6^\circ, 40,4^\circ, 42,6^\circ, 45,9^\circ, 50,2^\circ, 55^\circ, 55,5^\circ, 60,1^\circ, 64,4^\circ, 67,9^\circ$ e $68,4^\circ$ [PDF Card nº 46-1045] (Quartzo – SiO_2), relacionados ao mecanismo

de coleta (MORAES et al., 2019). Além disso, o óxido de alumínio foi identificado pelos picos em $2\theta = 27,9^\circ$ e $26,5^\circ$ [PDF Card n° 52-803].

5.1.2.3. Granulometria do CFB

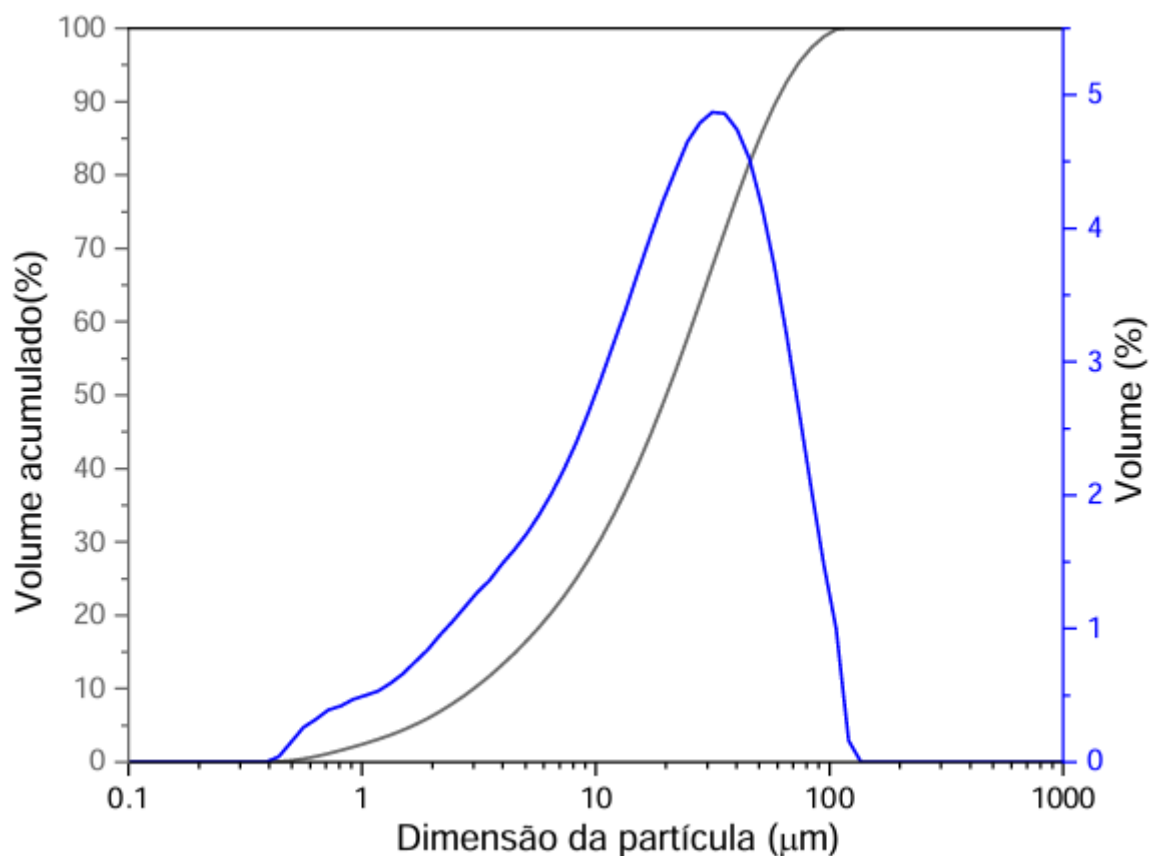
Foi realizado a distribuição granulométrica para a CFB, onde o tamanho médio das partículas das cinzas após o processo de moagem ficou em torno de $26\ \mu\text{m}$, assim como ilustrado pela distribuição granulométrica (Figura 8). A Tabela 2 resume os dados de distribuição granulométrica obtida para a CFB.

Tabela 2: Distribuição granulométrica para CFB

Diâmetro médio (μm)	d (0,1)	d (0,5)	d (0,9)
26,212	3,002	20,038	59,105

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8: Distribuição granulométrica da CFB



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2. Caracterização das propriedades físico-química e mecânica das pastas

A caracterização das propriedades físico-química das pastas é essencial para garantir seu desempenho, durabilidade, segurança e adequação a diferentes aplicações, além de otimizar formulações e assegurar a sustentabilidade e qualidade do material.

5.2.1. Pastas de MgO

5.2.1.1. Temperatura de reação

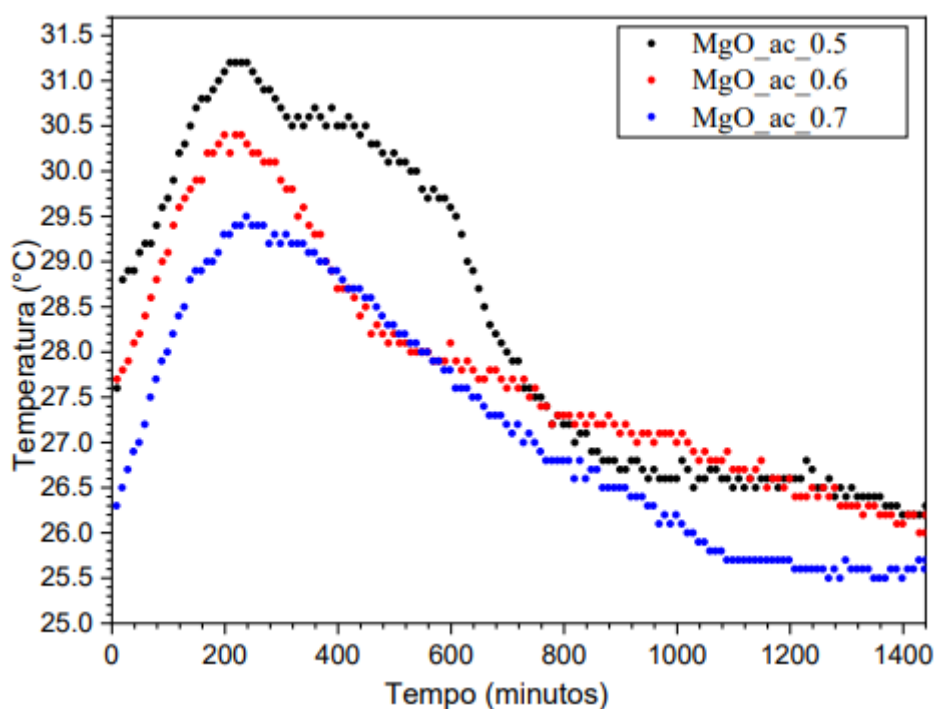
A temperatura de reação é essencial na confecção de pastas, pois influencia a velocidade de cura, a formação da microestrutura e as propriedades finais, como resistência e durabilidade.

As reações de hidratação do MgO, em um ambiente sem a presença de CO₂, são exotérmicas e ocorrem de acordo com a seguinte reação:



Desta forma, as curvas de temperatura em relação ao tempo de hidratação das pastas de MgO, em diferentes razões água/aglomerante (a/c), estão representadas na Figura 9. Além do mais, a Quadro 6 exhibe os valores máximos de temperatura registrados durante o ensaio, assim como a temperatura das pastas após 24 horas.

Figura 9: Curvas de temperatura/tempo das pastas de MgO



Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 6: Valores máximos e mínimos de temperatura alcançados pelas amostras

Traço	Valor máximo		Valor final de temperatura (após 24 horas) (°C)	Variação (°C)
	Temperatura (°C)	Tempo (min.)		
MgO_ac_0,5	31,2 ± 0,11	230	25	6,2
MgO_ac_0,6	30,5 ± 0,14	230	25	5,5
MgO_ac_0,7	29,5 ± 0,21	238	25	4,5

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o Quadro e o Gráfico apresentados acima, nota-se que a temperatura máxima atingida pelas amostras variou entre 29,5 e 31,2 °C, o que reflete uma baixa reatividade do MgO, compatível com sua temperatura de sinterização. A tendência de redução da temperatura de pico, conforme aumenta a razão a/c, indica que há mais água livre nos poros do sistema, ajudando a dissipar o calor das regiões internas e facilitando a troca térmica com o ambiente. Os dados sugerem que, independentemente da razão a/c utilizada, o tempo em que o pico máximo foi

registrado (entre 230 e 238 minutos) foi pouco ou nada influenciado pela razão a/c. Isso indica que a maior parte do MgO reage até aproximadamente 238 minutos, quando então a temperatura começa a diminuir devido à menor liberação de calor das reações químicas e ao desequilíbrio negativo nas trocas de calor com o ambiente.

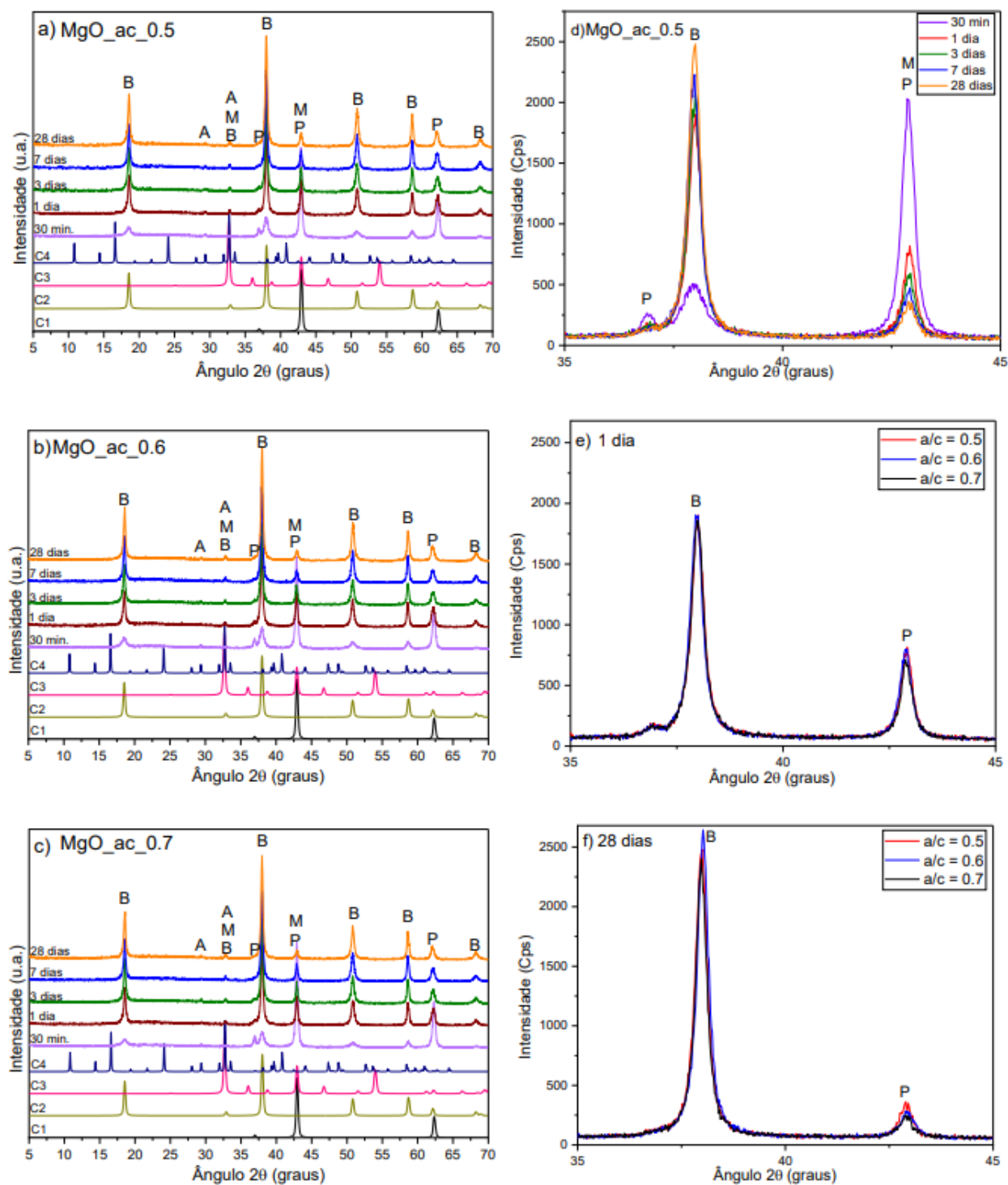
As curvas de temperatura, mesmo em condições não isotérmicas, refletem as curvas de calorimetria isotérmica de MgO calcinado a altas temperaturas (1000-1500 °C), mostrando uma diminuição contínua na taxa de hidratação após o pico de fluxo de calor (THOMAS; MUSSO; PRESTINI, 2014).

5.2.1.2. Difratometria de Raios X

Agora, com o objetivo de entender a disposição dos átomos e identificar fases cristalinas das pastas contendo MgO e com o intuito de caracterizar a estrutura e os parâmetros das pastas, como o tamanho e a forma dos cristais, foi realizada a difratometria de raios X.

Desta forma, tem-se que a Figura 10 apresenta os difratogramas de raios X das pastas de MgO, variando de acordo com a razão água/aglomerante em diferentes estágios de hidratação.

Figura 10: Difratoogramas de Raios X das pastas contendo somente MgO: a) MgO_ac_0,5; b) MgO_ac_0,6; c) MgO_ac_0,7; d) MgO_ac_0,5 sobrepostos; e) 1 dia sobrepostos e f) 28 dias sobrepostos. C1 (P) Periclase – PDF Card [45-946], C2 (B) Brucita – PDF Card [44-1482], C3 (M) Magnesita – PDF Card [80-42], C4 (A) Artinita– PDF Card [6-484]



Fonte: Elaborado pelo autor.

A principal consequência da hidratação das pastas de MgO é a formação de hidróxido de magnésio, conhecido como brucita, identificada pelos picos de difração observados em $2\theta = 18,6^\circ$; $37,9^\circ$; 51° ; 59° ; $68,3^\circ$ e 72° [PDF Card n° 44-1482].

Analisando a Figura 10, observa-se que os padrões de difração têm um caráter semiquantitativo, devido à ausência de um padrão interno. No entanto, considerando a padronização na amostragem e na técnica de análise, as comparações das intensidades dos picos parecem justificáveis como forma para avaliar as mudanças nas quantidades relativas das principais fases cristalinas presentes (KUENZEL et al., 2018).

Vale dizer que, independentemente da razão a/c, com o tempo de cura (selada), observa-se a dissolução do MgO, evidenciada pela diminuição e/ou desaparecimento dos padrões da fase Periclase, acompanhada pelo surgimento e maior organização cristalina da fase brucita devido à sua precipitação (Figura 10d).

Além do mais, não foram observadas diferenças significativas na intensidade dos padrões de difração entre as amostras com diferentes razões a/c nos mesmos períodos de cura. Isso indica que a razão a/c = 0,5 é ideal, do ponto de vista estequiométrico, para a hidratação completa do MgO, e que a velocidade de dissolução e o crescimento das fases podem não ter sido influenciados pela variação da razão a/c (Figura 10e-f). Além disso, independentemente da razão a/c, foram detectados padrões residuais de periclase, mesmo após 28 dias de cura. A presença desse MgO residual deve-se, principalmente, a grãos que são pouco ou não reativos.

Por fim, padrões de difração de baixa intensidade em $2\theta = 32,8^\circ$ e $42,8^\circ$, correspondentes à magnesita (MgCO_3) [PDF Card 80-42], foram observados em todas as amostras a partir de 1 dia de hidratação, devido à magnesita residual que não foi completamente convertida em MgO. Fases de carbonato hidratado foram difíceis de identificar, sendo apenas a artinita detectada nas amostras pelos padrões de difração em $2\theta = 29,5^\circ$ e $32,8^\circ$ [PDF Card 6-484].

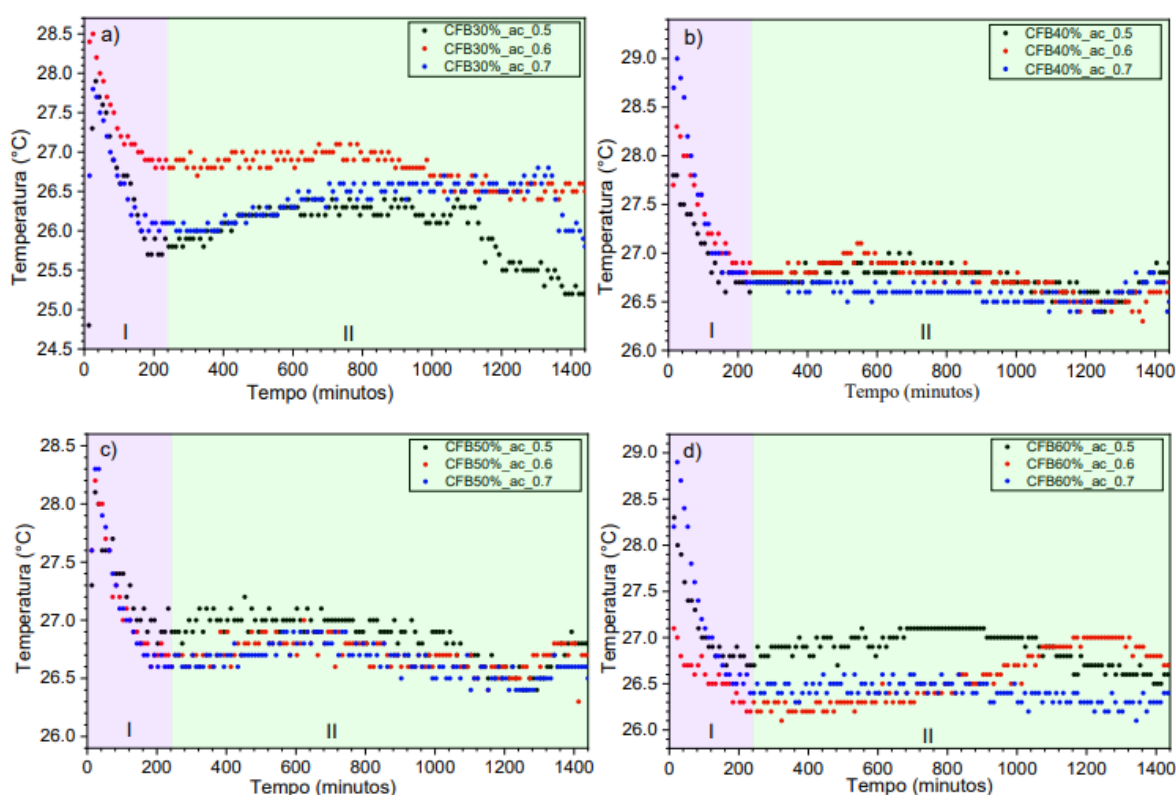
5.2.2. Pastas de MgO com CFB

5.2.2.1. Temperatura em escala temporal

A medição da temperatura ao longo do tempo durante a hidratação das pastas de MgO é crucial para entender o progresso das reações químicas e a liberação de calor, que influenciam diretamente as propriedades finais do material. Picos de temperatura indicam momentos de maior atividade química, e a temperatura após 24 horas ajuda a avaliar o estado inicial de hidratação e as características mecânicas da pasta. Esse monitoramento permite otimizar a formulação e os parâmetros de processo para alcançar as propriedades desejadas no produto final.

Desta forma, as curvas de temperatura ao longo do tempo de hidratação para as pastas de MgO, variando o teor de CFB e diferentes razões a/c, estão representadas na Figura 11.

Figura 11: Curvas de temperatura/tempo das pastas de MgO com CFB



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando a Figura acima interpreta-se que, a adição de cinzas causou uma mudança no comportamento da curva de temperatura das pastas de MgO. Foram

identificadas duas regiões distintas (Figura 11): a primeira, marcada pelo pico máximo na curva de temperatura, reflete uma reação mais rápida após a adição de água. O valor máximo de temperatura alcançado pelos sistemas não sofreu interferência significativa com a variação da razão a/c ou da quantidade de cinzas. O tempo necessário para atingir essa temperatura máxima variou entre 14 e 32 minutos, mas não foi possível identificar um padrão ou tendência relacionados às variações da razão a/c e da quantidade de cinzas. O pico máximo global de temperatura pode ser atribuído ao molhamento exotérmico, que depende principalmente da superfície específica das partículas dos pós da mistura (LI et al., 2014).

Além do mais, a segunda região, marcada por um pico local mais amplo que começa entre 200 e 350 minutos, pode estar ligada a uma formação mais intensa de brucita e M-S-H (LI et al., 2014). Esse comportamento da curva sugere um deslocamento temporal dos processos de hidratação devido à adição de cinzas nas primeiras 24 horas. A origem desses processos pode estar relacionada à retenção de água pela fonte de silicato ou a um efeito de diluição.

Por fim, tem-se que o Quadro 7 mostra os valores máximos de temperatura registrados durante o ensaio, além da temperatura das pastas após 24 horas.

Quadro 7: Valores máximos e mínimos de temperatura alcançados pelas amostras contendo diferentes porcentagens de CFB

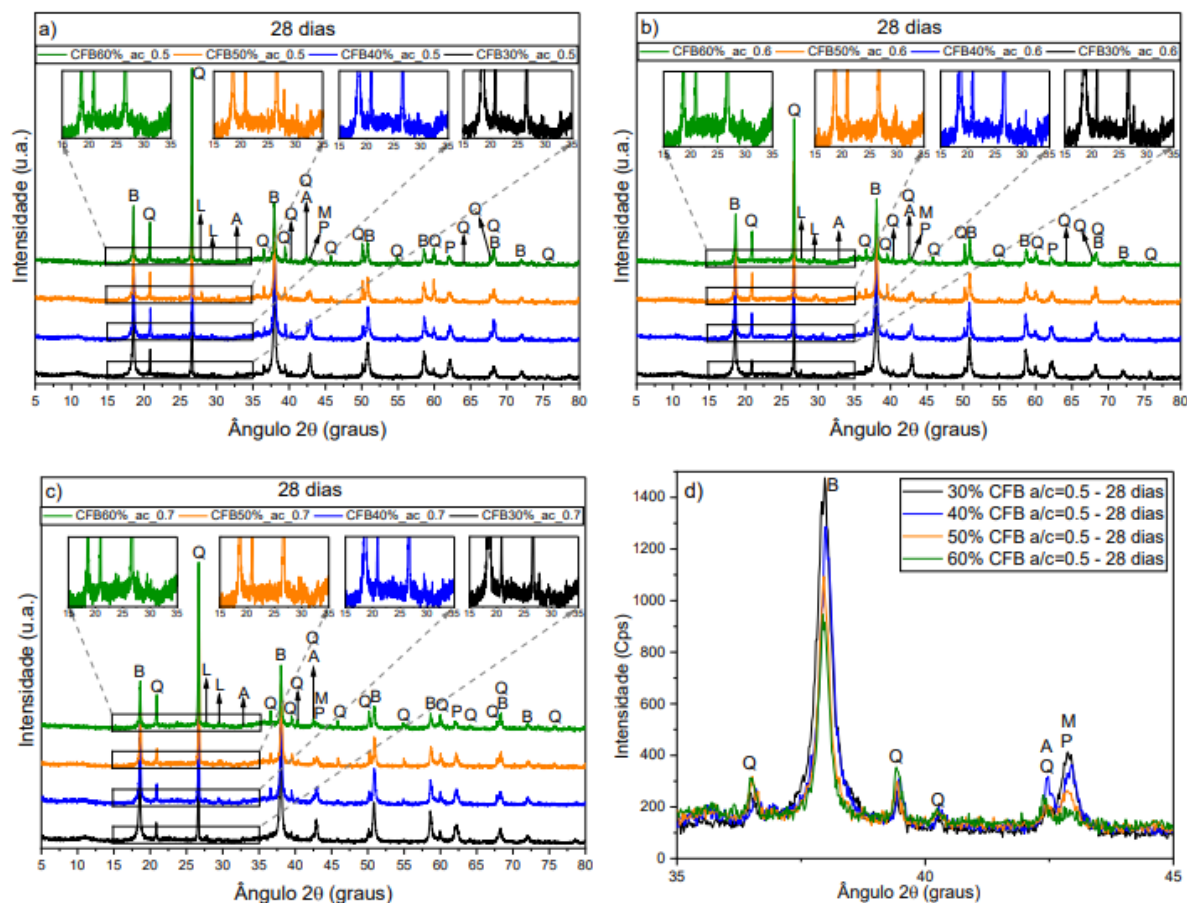
Traço	Valor máximo		Valor final de temperatura (após 24 horas) (°C)	Variação (°C)
	Temperatura (°C)	Tempo (min.)		
CFB30%_ac_0,5	28,0	32,0	25	3,0
CFB30%_ac_0,6	28,5	25,0	25	3,5
CFB30%_ac_0,7	27,9	31,0	25	2,9
Média	28,1	29,3	25	3,1
CFB40%_ac_0,5	27,9	18,0	25	2,9
CFB40%_ac_0,6	28,4	31,0	25	1,7
CFB40%_ac_0,7	29,1	21,0	25	4,1
Média	28,5	23,3	25	2,9
CFB50%_ac_0,5	28,2	24,0	25	3,2
CFB50%_ac_0,6	28,3	22,0	25	3,3
CFB50%_ac_0,7	28,4	28,0	25	3,4
Média	28,3	24,6	25	3,3
CFB60%_ac_0,5	28,3	14,0	25	3,3
CFB60%_ac_0,6	27,1	24,0	25	2,1
CFB60%_ac_0,7	28,9	24,0	25	3,9
Média	28,1	20,7	25	3,1

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.2.2. Difratometria de Raios X

Foi realizada a difratometria das pastas de MgO com CFB para determinação mineralógica e composicional das amostras. Desta forma, na Figura 12, são mostrados os difratogramas de raios X em relação à razão a/c e à quantidade de cinzas ao longo de 28 dias.

Figura 12: Difratoograma de raios x das pastas com CFB aos 28 dias em todas as proporções analisadas: a) $a/c = 0,5$; b) $a/c = 0,6$; c) $a/c = 0,7$ e d) fator $a/c = 0,5$ em $2\theta = 35-45^\circ$. (P) Periclase – PDF Card [45-946], (B) Brucita – PDF Card [44- 1482], (M) Magnesita – PDF Card [80-42], (A) Artinita – PDF Card [6-484], (Q) Quartzo – PDF Card [46-1045], (L) Óxido de alumínio – PDF Card [52-803]



Fonte: Elaborado pelo autor.

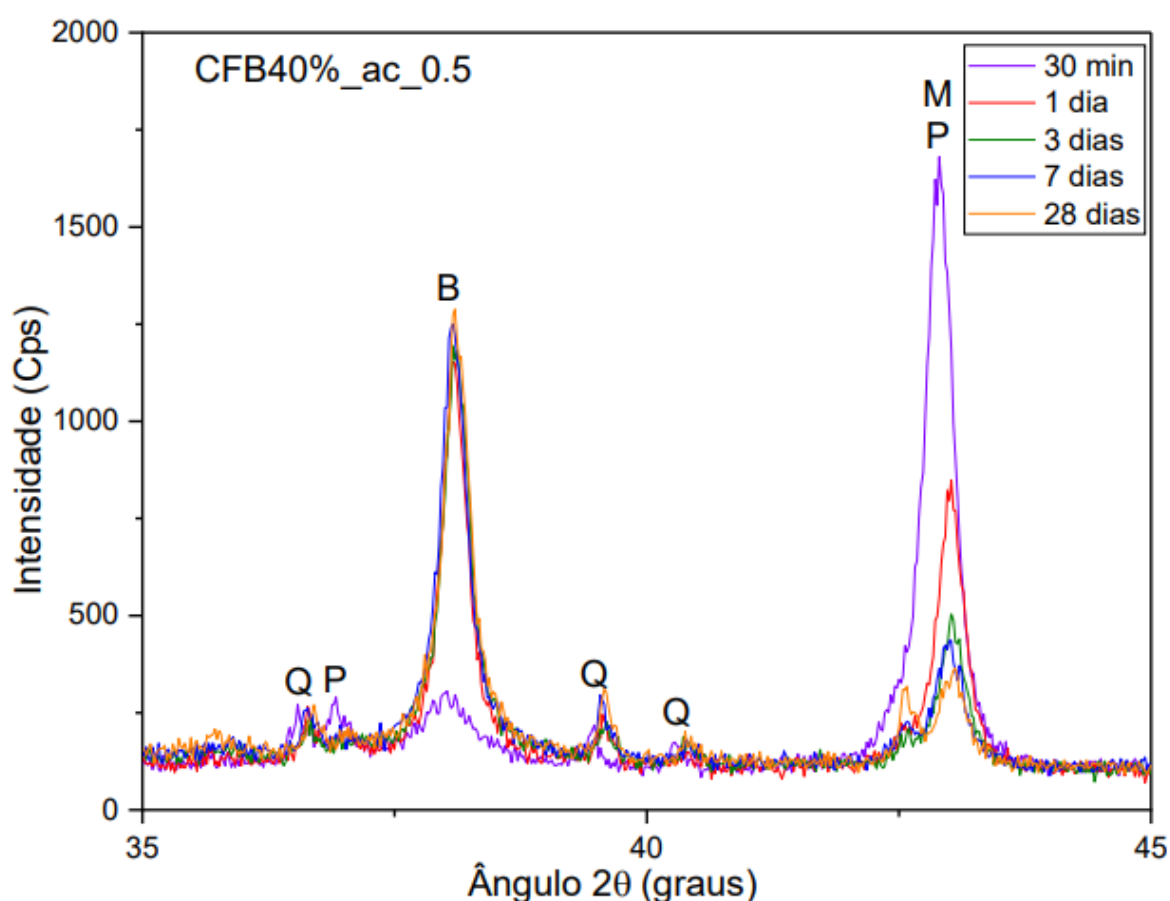
Analisando a figura, nota-se que as fases identificadas permaneceram inalteradas, independentemente da razão a/c ou da quantidade de cinzas. Diferente das pastas de MgO , onde foram identificadas apenas duas fases, Periclase e Brucita, na Figura 12 é possível observar a presença de fases associadas ao CFB, como quartzo e óxido de alumínio. Além disso, foram encontradas fases carbonatadas, como o $MgCO_3$, resultante da conversão incompleta do MgO , e a artinita ($Mg_2CO_3OH_2 \cdot 3H_2O$).

Além do mais, as inserções na Figura 12 mostram um aumento da banda amorfa nos padrões de difração à medida que a quantidade de cinzas no sistema aumenta, mantendo a mesma razão a/c . Esse comportamento sugere um incremento

das fases amorfas, tanto pela maior presença de cinzas quanto pela possível formação do M-S-H, resultante da reação entre o $\text{Mg}(\text{OH})_2$ e o SiO_2 amorfo.

Além disso, a Figura 13, mostrada abaixo, ilustra de maneira representativa o padrão comparativo de difração entre as amostras com 40% de CFB e a/c de 0,5, ao longo do tempo de cura, na faixa de $2\theta = 35 - 45^\circ$.

Figura 13: Difratoograma de Raios X do traço CFB40%_ac_0,5: Em diferentes períodos de cura. (P) Periclase – PDF Card [45-946], (B) Brucita – PDF Card [44-1482], (M) Magnesita – PDF Card [80-42], (A) Artinita – PDF Card [6-484], (Q) Quartzo – PDF Card [46-1045]



Fonte: Elaborado pelo autor.

Vale ressaltar que a escolha dessa análise foi fundamentada nos maiores valores de resistência à compressão registrados nessas amostras em relação a outras composições, como será discutido na seção 5.2.2.3 referente à compressão axial das pastas de MgO com CFB. A diminuição gradual na intensidade do pico de difração correspondente à fase Periclase ($2\theta = 42,9^\circ$) indica a dissolução progressiva do MgO ao longo do tempo de cura. No entanto, a intensidade dos picos de difração

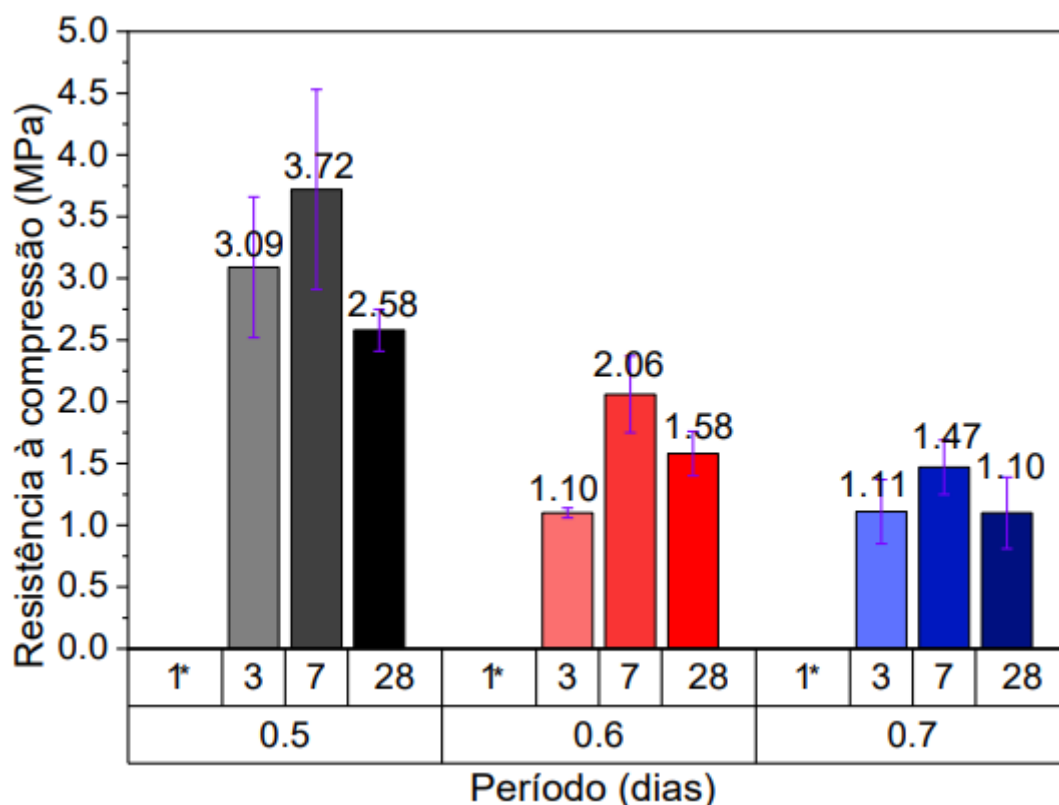
da fase Brucita ($2\theta = 38^\circ$) não apresentou grandes mudanças a partir de 1 dia. Embora fatores como menor organização cristalina da fase possa influenciar esse comportamento, o processo de dissolução e consumo do $\text{Mg}(\text{OH})_2$ para a formação do M-S-H parece ser o principal responsável por esse padrão observado (ZHANG et al., 2021).

5.2.2.3. Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial em pastas é fundamental, pois é responsável por medir a capacidade do material de suportar cargas sem que haja falha ou até mesmo a ruptura, sendo um parâmetro primordial para avaliar sua qualidade e desempenho mecânico. O estudo desta propriedade permite otimizar a composição das misturas, assegurando a segurança estrutural e a durabilidade das construções. Além do mais, é essencial para comparar diferentes materiais e técnicas, garantindo que o material atenda às normas e regulamentações aplicáveis, sendo muito importante na engenharia civil e no desenvolvimento de materiais cimentícios, como é o caso do desenvolvimento de materiais cimentícios alternativos.

Devido a tal importância, os valores de resistência à compressão para as pastas de MgO são ilustrados na Figura 14 em função do tempo de cura e da razão a/c.

Figura 14: Resistência à compressão das amostras contendo somente MgO nas idades de 3, 7 e 28 dias e fatores água/aglomerante 0,5, 0,6 e 0,7



Nota: *Amostras de 1 dia não apresentaram resistência suficiente para suportar o procedimento de desforma

Fonte: Elaborado pelo autor.

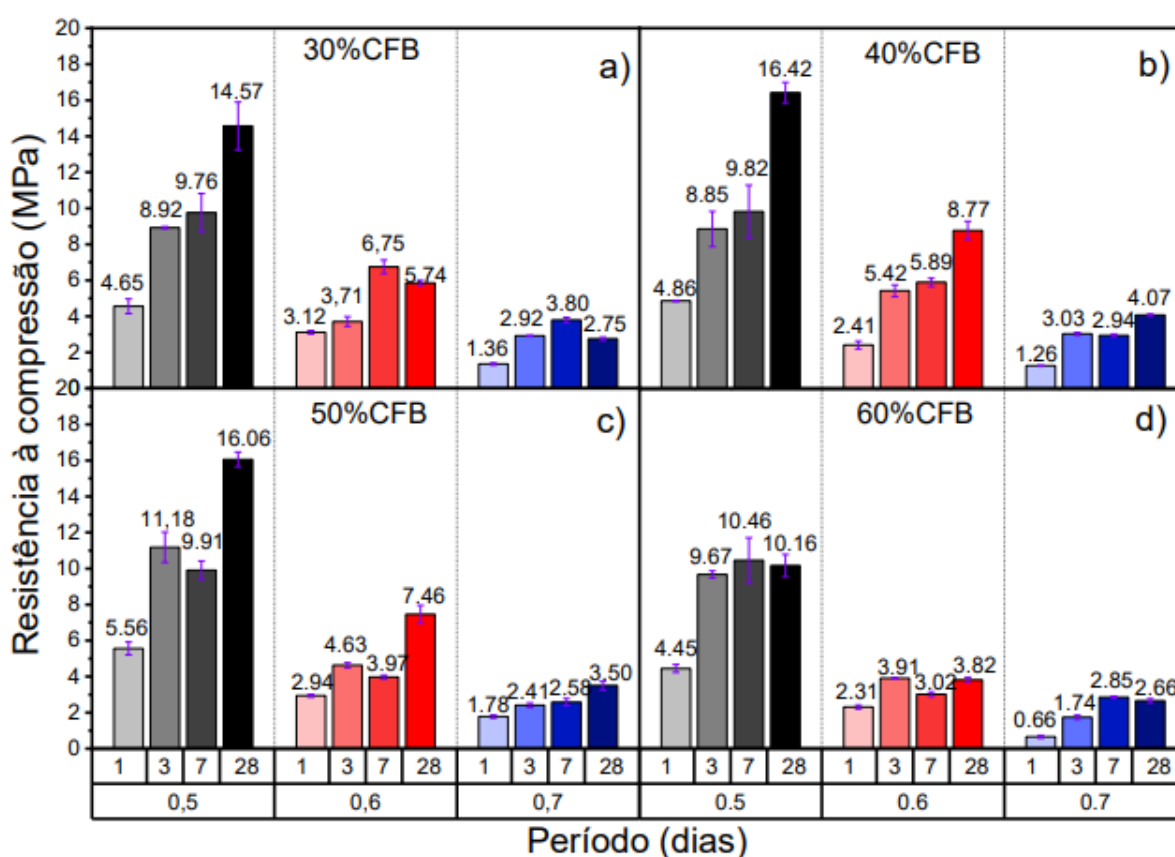
Durante o processo de hidratação, as pastas de MgO formam brucita e desenvolvem certa resistência. No entanto, como indicado pelas medições de reatividade, a hidratação ocorre de forma lenta, o que faz com que as amostras não adquiram resistência suficiente, mesmo após 24 horas.

Analisando Figura 14, observa-se que as pastas apresentaram baixa resistência à compressão, com os maiores valores registrados a razão $a/c = 0,5$, com isso conclui-se que quanto maior a relação a/c , menor a resistência à compressão. Razões a/c superiores a esse valor resultaram em uma redução da resistência, principalmente devido ao aumento da quantidade de água livre no sistema e à consequente ampliação da porosidade (DUNG; UNLUER, 2021). Independentemente da razão a/c , os maiores valores de resistência à compressão foram observados aos 7 dias de cura, seguidos por uma queda significativa aos 28 dias. Vale ressaltar que esse comportamento está associado à alta expansão e à formação de trincas e

fissuras nos corpos de prova, causadas pela formação tardia de brucita, decorrente da baixa reatividade do MgO (MO et al., 2014).).

Foram realizados também, ensaios de resistência à compressão para as amostras contendo CFB nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias e fatores água/aglomerante 0,5, 0,6 e 0,7; tais valores são ilustrados na Figura 15 em função do tempo de cura e da razão a/c.

Figura 15: Resistência à compressão das amostras contendo CFB nas idades de 1, 3, 7 e 28 dias e fatores água/aglomerante 0,5, 0,6 e 0,7: a) traços CFB30%; b) traços CFB40%; c) traços CFB50% e d) traços CFB60%



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com os dados presentes na Figura acima, observou-se um aumento significativo nos valores de resistência à compressão com a adição de CFB em comparação com as variáveis analisadas (Figura 15). Esses resultados podem estar relacionados à formação de M-S-H a partir da conversão da brucita, o que confere maior resistência mecânica ao sistema (KUMAR et al., 2020; SONAT; DUNG; UNLUER, 2017, SONAT; UNLUER, 2017). Além disso, a menor presença de brucita nas pastas, devido à formação de M-S-H e às menores frações de MgO nas misturas,

contribuiu para o melhor desempenho mecânico das amostras com CFB, já que resulta em menor expansão dos corpos de prova, reduzindo a formação de trincas e fissuras. Esse fato também é evidente pelos desvios estatísticos das medições, que apresentaram menores variações em comparação com as pastas contendo apenas MgO, garantindo maior consistência nos resultados.

Os maiores valores de resistência à compressão foram registrados para as pastas com uma razão $a/c = 0,5$. Comparando os mesmos períodos de cura para uma mesma fração de CFB, observa-se que o aumento gradual da razão a/c resultou em uma redução contínua nos valores de resistência à compressão. Esse comportamento está associado ao excesso de água no sistema, causado pela diminuição gradual do MgO nas misturas, o que leva a uma maior formação de poros.

Nota-se que o maior valor de resistência à compressão foi alcançado pela amostra CFB40%_ac_0,5 após 28 dias, atingindo $16,42 \pm 0,57$ MPa, aproximadamente 536% superior ao valor obtido para as pastas de MgO com a mesma razão e período de cura.

Por fim, nota-se que as concentrações superiores a 40% de CFB tendem a apresentar uma redução dos valores de resistência à compressão em fases mais avançadas de cura, independentemente da razão a/c . Esse comportamento pode estar ligado principalmente a um efeito de diluição nos sistemas, o que tende a reduzir naturalmente a resistência das pastas, devido à menor quantidade de MgO, além de contribuir para um aumento da quantidade de água livre no sistema, o que pode levar ao aumento da porosidade das amostras.

O Quadro 8 apresenta os principais estudos da literatura que mais se assemelham ao presente trabalho, tratando-se de investigações de pastas de MgO com fontes de silicato. Os valores de resistência à compressão obtidos para as pastas de MgO com cinzas, como pode ser observado, estão em conformidade com os encontrados na literatura em condições semelhantes do precursor (JIN; AL-TABBAA, 2014).

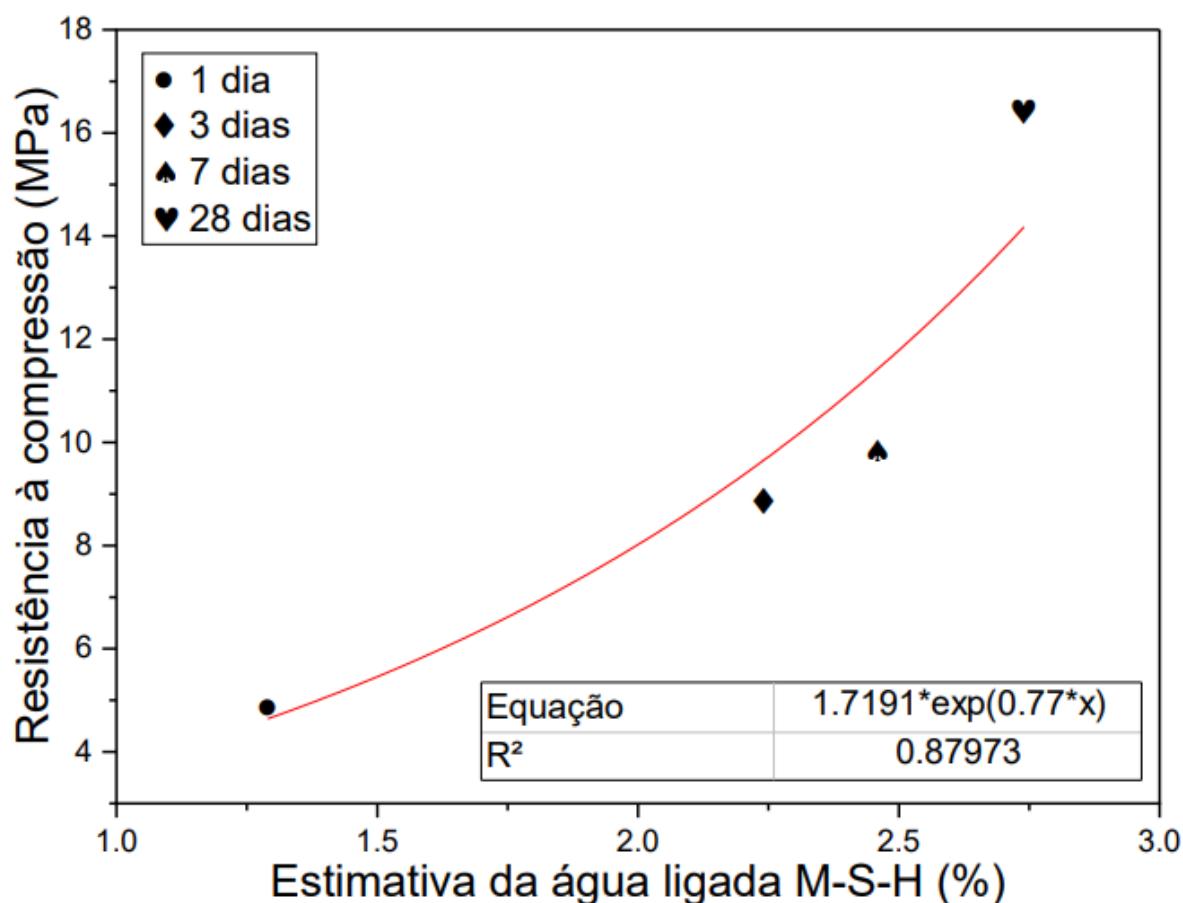
Quadro 8: Resultados de resistência à compressão de trabalhos da literatura

Artigo	Material	Proporção: MgO/SiO2	Superplastificante	relação: a/c	Temperatura de calcinação do MgO	Tipo de cura	Resistência a compressão (MPa)		
							3 dias	7 dias	28 dias
(JIN; AL-TABBAA, 2014)	MgO menos reativo com sílica	85/15	-	0,59	1400°C	Imersa em água deionizada	-	0,25	1,00
		70/30		0,70			-	0,25	5,00
		50/50		0,79			-	2,10	9,00
	MgO mais reativo com sílica	85/15		0,62	700 a 1000°C		-	3,00	8,25
		70/30		0,73			-	4,00	5,00
		50/50		0,87			-	3,00	10,50
							-	3,00	10,50
SONAT; UNLUER, 2019)	MgO com CCA amorfa	50/50	1%	0,55	-	Selada	22,00	35,00	33,00
	MgO com sílica	50/50		0,55			7,00	26,00	41,00
(SONAT; DUNG; UNLUER, 2017)	MgO com sílica	40/60	1%	0,50	-	Selada	17,00	35,00	50,00
		40/60				Ambiente	12,00	32,00	40,00
		40/60				Submersa 30°C	10,00	30,00	42,00
		40/60				Submersa 60°C	35,00	40,00	35,00
		40/60				Estufa 60°C	35,00	22,00	27,00
(SHAH; SCOTT, 2021)	MgO com sílica	60/40	Quantidade não informada	0,50	-	Armazenamento em 20°C e 65% de umidade relativa	-	11,00	36,00
		50/50		0,50			-	10,50	28,00
		60/40		0,60			-	8,00	17,00
(BHAGATH SINGH et al., 2020)	MgO com sílica	50/50	1,20%	0,46	-	Selada	15,00	25,00	41,00
(SONAT; UNLUER, 2017)	MgO com sílica	50/50	1%	0,45	-	Selada	21,00	38,00	54,00
(TAJ; AKTURK; ULUKAYA, 2023)	MgO com sílica	70/30	4%	0,60	600 a 700°C	Ambiente	21,00	24,00	22,00
	Mgo com cinzas volantes	70/30		0,60			3,00	3,50	4,90

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 16 mostra como os valores de resistência à compressão se comportam em relação à estimativa da porcentagem de M-S-H e ao tempo de cura para as amostras CFB40%_ac_0,5.

Figura 16: Percentual de desidratação do M-S-H em relação ao ganho de resistência mecânica (traço CFB40%_ac_0,5)



Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se observar uma possível correlação exponencial entre as duas grandezas analisadas. O coeficiente de determinação (R^2) obtido indica um bom ajuste entre a equação gerada e os dados experimentais. Mármol et al. (2016) também identificaram um comportamento semelhante entre 7 e 28 dias nas amostras 50/50 e 60/40 de MgO/Sílica. Isso reforça a validade dos estudos e sugere que o comportamento observado pode ser generalizado/padronizado para sistemas semelhantes.

6. CONCLUSÕES

Como etapa inicial do estudo de pastas alternativas à base de óxido de magnésio e cinzas de folha de bambu foi realizada a caracterização físico-química dos materiais, MgO e CFB, sendo essencial para entender o comportamento, desempenho e suas adequações a diferentes aplicações. Ressalta-se que esta etapa é de extrema importância, pois isso será fator essencial para as próximas etapas a serem realizadas no estudo.

Analisando os resultados obtidos, conclui-se que a utilização de um aglomerante composto por MgO combinado com cinzas resultantes da queima da folha de bambu (CFB) foi viável e trouxe benefícios notáveis. Os testes realizados indicaram que a proporção a/c de 0,5 foi a mais adequada para a hidratação das pastas, oferecendo o melhor desempenho mecânico. Proporções superiores a essa resultaram em uma redução progressiva na resistência à compressão, devido ao aumento da quantidade de água livre e da porosidade no sistema.

A incorporação das cinzas de bambu (CFB) estimulou a formação do composto M-S-H através da conversão da brucita, resultando em um desempenho mecânico significativamente superior em relação às pastas que continham apenas MgO. Além do mais, vale ressaltar que a amostra com 40% de CFB e uma razão a/c de 0,5 (CFB40%_ac_0,5) apresentou a melhor proporção em termos de resistência mecânica, atingindo $16,42 \pm 0,57$ MPa aos 28 dias, aproximadamente 536% superior ao valor obtido para as pastas de MgO com a mesma razão e período de cura. Em contrapartida, outras proporções de água/aglomerante resultaram em resistências menores, devido ao efeito de diluição e ao aumento da porosidade causado pela água residual.

Outro fato a ser destacado é que as concentrações superiores a 40% de CFB tendem a apresentar uma redução dos valores de resistência à compressão em fases mais avançadas de cura, independentemente da razão a/c. Esse comportamento pode estar ligado principalmente a um efeito de diluição nos sistemas, o que tende a reduzir naturalmente a resistência das pastas, devido à menor quantidade de MgO, além de contribuir para um aumento da quantidade de água livre no sistema, o que pode levar ao aumento da porosidade das amostras.

Em resumo, os resultados do estudo indicam que as cinzas de bambu, fonte alternativa de SiO_2 amorfo, têm grande potencial como uma fonte alternativa na

produção de aglomerantes à base de MgO. A incorporação dessas cinzas não apenas melhora o desempenho mecânico dos materiais produzidos, mas também contribui para a sustentabilidade do processo, diminuindo a dependência de matérias-primas convencionais e, conseqüentemente, os impactos ambientais. Além disso, o uso das cinzas de bambu pode reduzir os custos de produção, tornando a fabricação de aglomerantes mais econômica e ecologicamente viável.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-GAWWAD, H. A.; HASSAN, H. S.; VÁSQUEZ-GÁRCIA, S. R; ISRADE-ALCANTARÁ, I.; DING, Y-C.; MARTINES-CINCO, M. A.; EL-ALEEM, S. A.; 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, p. 1–9, 2020.

ADEMOLA, S. A.; BUARI, T. A. Behaviour of Bamboo Leaf Ash Blended Cement Concrete in Sulphates Environment. *IOSR Journal of Engineering (IOSRJEN)*, v. 4, p. 1-8, 2014.

AMRAN, M.; MAKUL, N.; FEDIUK, R.; LEE, Y. H.; VATIN, N. I.; LEE, Y. Y.; MOHAMMED, K. Global carbon recoverability experiences from the cement industry. *Case Studies in Construction Materials*, v. 17, 2022.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. C 579-18: Standard Test Methods for Compressive Strength of Chemical-Resistant Mortars, Grouts, Monolithic Surfacing, and Polymer Concretes. West Conshohocken: Astm Internacional, 2018. 5p.

ANUNCIATO, V. M.; DIAS, R. C.; BIANCHI, L.; PERISSATO, S. M.; GOMES, D. M. Bambu: Versatilidade para quem sabe lucrar. *Revista Campo e Negócio*, 2020. Disponível em: <<https://revistacampoenegocios.com.br/bambu-versatilidade-para-quem-sabe-lucrar/>>. Acesso em: 25 Agosto de 2023.

ASHA, P.; SALMAN, A.; KUMAR, R. A. Experimental Study on Concrete with Bamboo Leaf Ash. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, v. 3, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

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.

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

BENHELAL, E.; ZAHEDI, G.; SHAMSAEI, E.; BAHADORI, A. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement industry, *Journal of Cleaner Production*, v. 51, p. 142-161, 2013.

BHAGATH SINGH, G. V. P.; SONAT, C.; YANG, E. H.; UNLUER, C. Performance of MgO and MgO–SiO₂ systems containing seeds under different curing conditions. *Cement and Concrete Composites*, v. 108, 2020.

BUI, D. D. Rice husk ash a mineral admixture for high performance concrete. 2001. ed. Vietnam: DUP Science, 2001

CALDAS, L. R.; SARAIVA, A. B.; ANDREOLA, V. M.; Filho, R. D. T. Bamboo bio-concrete as an alternative for buildings' climate change mitigation and adaptation. *Construction and Building Materials*, v. 263, 2020.

CHEN, W.; ELKATATNY, S.; MURTAZA, M.; MAHMOUD, A. A. Recent Advances in Magnesia Blended Cement Studies for Geotechnical Well Construction—A Review. *Frontiers in Materials*, v. 8, p. 1–24, 2021.

CHOTOLLI, D. L. Avaliação de aglomerante alternativo à base de óxido de magnésio e cinzas de folha de bambu. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2024.

DUNG, N. T.; UNLUER, C. Sequestration of CO₂ in reactive MgO cement-based mixes with enhanced hydration mechanisms. *Construction and Building Materials*, v. 143, p. 71–82, 2017.

DUNG, N. T.; UNLUER, C. Advances in the hydration of reactive MgO cement blends incorporating different magnesium carbonates. *Construction and Building Materials*, v. 294, p. 123573, 2021.

FRÍAS, M.; SAVASTANO, H.; Villar, E.; Rojas, M. I. S.; Santos, S. Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes. *Cement and Concrete Composites*, v. 34, p. 1019-1023, 2012.

HAY, R.; DUNG N.T., LESIMPLE A.; UNLUER C.; CELIK K. Mechanical and microstructural changes in reactive magnesium oxide cement-based concrete mixes subjected to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, v. 118, p. 103955, 2021.

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. Evaluation of novel reactive MgO activated slag binder for the immobilisation of lead and zinc. *Chemosphere*, v. 117, n. 1, p. 285–294, 2014.

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

JIN, F.; AL-TABBAA, A. Thermogravimetric study on the hydration of reactive magnesia and silica mixture at room temperature. *Thermochimica Acta*, v. 566, p. 162–168, 2013.

KASSELOURIS, V.; FTIKOS, C.; PARISSAKIS, G. On the hydration of MgO in cement pastes hydrated up to eight years. *Cement and Concrete Research*, v. 15, n. 5, p. 758–764, 1985.

KOLAWOLE, J. T.; OLUSOLA, K. O.; BABAFEMI, A. J.; OLALUSI, O. B.; FANIJO, E. Blended cement binders containing bamboo leaf ash and ground clay brick waste for sustainable concrete, *Materialia*, v. 15, 2021.

KUMAR, S.; SONAT, C.; YANG, E. H.; UNLER, C. Performance of reactive magnesia cement formulations containing fly ash and ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, v. 232, p. 117275, 2020.

LACKNER, K. S.; WENDT C. H.; BUTT, D. P.; JOYCE, E. L.; Sharp, D. H. Carbon dioxide disposal in carbonate minerals. *Energy*, v. 20, n. 11, p. 1153–1170, 1995.

LI, Z.; ZHANG, T.; HU, J.; TANG, Y.; NIU, Y.; WEI, J.; YU, Q. Characterization of reaction products and reaction process of $\text{MgO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$ system at room temperature. *Construction and Building Materials*, v. 61, p. 252–259, 2014.

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.

MAHASENAN, N.; DAHOWSKI, R.T.; DAVIDSON, R.T. The role of carbon dioxide capture and storage in reducing emissions from cement plants in North America. Editor(s): E.S. Rubin, D.W. Keith, C.F. Gilboy, M. Wilson, T. Morris, J. Gale, K. Thambimuthu, *Greenhouse Gas Control Technologies 7*. Elsevier Science Ltd, p. 901-909, 2005.

MÁRMOL, G.; SAVASTANO, H.; TASHIMA, M.; PROVIS, J. L. Optimization of the MgOSiO_2 binding system for fiber-cement production with cellulosic reinforcing elements. *Materials and Design*, v. 105, p. 251–261, 2016.

MÁRMOL, G.; SAVASTANO, H. Study of the degradation of non-conventional MgO-SiO_2 cement reinforced with lignocellulosic fibers. *Cement and Concrete Composites*, v. 80, p. 258-267, 2017.

MO, L.; DENG, M.; TANG, M.; AL-TABBAA, A. MgO expansive cement and concrete in China: Past, present and future. *Cement and Concrete Research*, v. 57, p. 1–12, 2014.

MORAES, M. J. B.; MORAES, J.C.B.; TASHIMA, M.M.; AKASAKI, J.L.; SORIANO, L.; BORRACHERO, M.V.; PAYÁ, J. Production of bamboo leaf ash by auto-combustion for pozzolanic and sustainable use in cementitious matrices. *Construction and Building Materials*, v. 208, p. 369–380, 2019.

MORAES, M. J. B. DE. Estudo do potencial da cinza de folha de bambu para sua utilização como material pozolânico e sustentável em matrizes cimentantes. 2019. 90 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia

MORICONI, G. Recyclable materials in concrete technology: sustainability and durability. Proc. Special Sessions of First inter. conf. on sustainable Construction Materials and Technologies, p. 1–13, 2007.

NDUKA, D. O.; OLAWUYI, B. J.; AJAO, A. M.; OKOYE, V. C.; OKIGBO, O. M. Mechanical and durability property dimensions of sustainable bamboo leaf ash in high-performance concrete. Cleaner Engineering and Technology, v. 11, 2022.

NEHRING, V.; SILVA, L. H. P.; MARIA, V. P. K.; PAIVA, F. F. G.; TAMASHIRO, J. R.; SANTOS, L. F.; TEIXEIRA, S. R.; KINOSHITA, A. Recycling of bamboo leaves and use as pozzolanic material to mitigate degradation of cementitious composites. Cleaner Waste Systems, v. 3, 2022.

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.

NORDESTE, I. “Óxido de Magnésio de Alta Pureza, Reativo Para Uso Construção Civil, Cimento Sorel.”Ibar Nordeste, 2016. Disponível em: <www.ibarnordeste.com.br/construcao-civil>. Acesso em: 22 Agosto de 2023.

NOVACEM. Novacem Carbon Negative CementPresentation at the Society of Chemistry and Industry Conference on Low Carbon Cements, London, UK. [s.l: s.n.].

ODEYEMI, S. O.; ATOYEBI, O. D.; KEGBEYALE, O. S.; ANIFOWOSE, M. A.; ODEYEMI, O. T.; ADENIYI, A.G.; ORISADARE, O.A. Mechanical properties and microstructure of High-Performance Concrete with bamboo leaf ash as additive. Cleaner Engineering and Technology, v. 6, 2022.

OLIVEIRA, F. A. C.; FERNANDES, J. C.; GALINDO, J.; RODRÍGUEZ, J.; CAÑADAS, I.; VERMELHUDO, V.; NUNES, A.; ROSA, L.G. Portland cement clinker production using concentrated solar energy – A proof-of-concept approach. Solar Energy, v. 183, p. 677–688, 2019.

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

SHAND, M. A. *The Chemistry and Technology of Magnesia*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2006.

SILVA, L. H. P.; TAMASHIRO, J. R.; PAIVA, F. F. G.; SANTOS, L. F.; TEIXEIRA, S. R.; KINOSHITA, A.; ANTUNES, P. A. Bamboo leaf ash for use as mineral addition with Portland cement. *Journal of Building Engineering*, v. 42, 2021.

SONAT, C.; DUNG, N. T.; UNLUER, C. Performance and microstructural development of MgO–SiO₂ binders under different curing conditions. *Construction and Building Materials*, v. 154, p. 945–955, 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.

TASHIMA, M. M. Cinza de casca de arroz altamente reativa: método de produção, caracterização físico-química e comportamento em matrizes de cimento portland. 2006. 81 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2006.

UMOH, A. A.; ODESOLA, I. Characteristics of Bamboo Leaf Ash Blended Cement Paste and Mortar. *Civil Engineering Dimension*, v. 17, no. 1, p. 22-28, 2015.

VILLAR-COCIÑA, E.; MORALES, E. V.; SANTOS, S. F.; SAVASTANO, H.; FRÍAS, M. Pozzolanic behavior of bamboo leaf ash: Characterization and determination of the kinetic parameters. *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 1, p. 68–73, 2011.

WANG, J.; CHENG, Z.; CHEN, D.; LI, G.; CHEN, J.; WANG, K.; XU, L.; HUANG, J. An injectable porous bioactive magnesium phosphate bone cement foamed with calcium carbonate and citric acid for periodontal bone regeneration. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, v. 142, n. April, p. 105805, 2023.

WANG, L.; YEUNG, T. L. K.; LAU, A. Y. T.; TSANG, D. C. W.; POON, C. S. Recycling contaminated sediment into eco-friendly paving blocks by a combination of binary cement and carbon dioxide curing. *Journal of Cleaner Production*, v. 164, p. 1279–1288, 2017.

WANG, L.; CHEN, L.; CHO, D. W.; TSANG, D. C. W.; YANG, J.; HOU, D.; BAEK, K.; KUA, H. W.; POON, C. S. Novel synergy of Si-rich minerals and reactive MgO for stabilisation/solidification of contaminated sediment. *Journal of Hazardous Materials*, v. 365, n. November 2018, p. 695–706, 2019.

WANG, N.; YU, H.; BI, W.; TAN, Y.; ZHANG, N.; WU, C.; MA, H.; HUA, S. Effects of sodium citrate and citric acid on the properties of magnesium oxysulfate cement. *Construction and Building Materials*, v. 169, p. 697–704, 2018.

XIE, J.; WU, Z.; ZHANG, X.; HU, X.; SHI, C. Trends and developments in low-heat portland cement and concrete: A review. *Construction and Building Materials*, v. 392, n. April, p. 131535, 2023.

YANG, K.; ZHU, C.; ZHANG, J.; LI, Z.; LIU, Y.; SONG, X.; GAO, Z. Nitrogen fertilization in bamboo forest accelerates the shoot growth and alters the lignification process in shoots. *Industrial Crops and Products*, v. 187, 2022.

ZHANG, J.; QI, Y.; YANG, Y.; LONG, W.; DONG, B. Enhancement of magnesium phosphate cement composites with sintered sludge ash. *Developments in the Built Environment*, v. 17, n. October 2023, p. 100313, 2023.

ZHANG, J.; LV, T.; HOU, D.; DONG, B. Synergistic effects of fly ash and MgO expansive additive on cement paste: Microstructure and performance. *Construction and Building Materials*, v. 371, 2023.

ZHANG, T.; DIECKMANN, E.; SONG, S.; XIE, J.; YU, Z.; CHEESEMAN, C. Properties of magnesium silicate hydrate (M-S-H) cement mortars containing chicken feather fibres. *Construction and Building Materials*, v. 180, p. 692–697, 2018.

ZHANG, Y.; WANG, W.; LV, Q. The influence of reactive MgO on the hydration and carbonation performance of slag-rich cement system. *Journal of Building Engineering*, v. 77, 2023.