



CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

JOÃO CARLOS ABREU MACIEL

**INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES MINERAIS POZOLÂNICAS NO
PROCESSO DE CARBONATAÇÃO DO CONCRETO**

FORTALEZA

2022

JOÃO CARLOS ABREU MACIEL

**INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES MINERAIS POZOLÂNICAS NO
PROCESSO DE CARBONATAÇÃO DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil da Faculdade Ari de Sá.

Orientador: Prof.^a Me. Francisca Lilian
Cruz Brasileiro.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Faculdade Ari de Sá
Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A162i Abreu Maciel, João Carlos.

Influência de Adições Minerais Pozolânicas no Processo de Carbonatação do Concreto / João Carlos Abreu Maciel. – 2022.

49 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade Ari de Sá, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2022.

Orientação: Profa. Ma. Francisca Lilian Cruz Brasileiro.

1. Concreto. 2. Carbonatação. 3. Adições Minerais Pozolânicas. I. Título.

CDD 620

JOÃO CARLOS ABREU MACIEL

**INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES MINERAIS POZOLÂNICAS NO PROCESSO DE
CARBONATAÇÃO DO CONCRETO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil da Faculdade Ari de Sá.

Orientador: Prof.^a Me. Francisca Lilian
Cruz Brasileiro

Aprovada em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Me. Francisca Lilian Cruz Brasileiro
Faculdade Ari de Sá

Prof.^a Me. Bianca Maria Pacheco Vieira
Faculdade Ari de Sá

Prof.^a Me. Larissa de Freitas Gonçalves
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará

*Dedico este trabalho à minha família e à
minha companheira de vida, Jucieelly.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por orientar o meu caminho até este momento, fortalecendo o meu espírito e fomentando minha resiliência.

À minha esposa e companheira Jucieelly, pelo incentivo incessante, por acreditar na minha capacidade e incentivar, diariamente, minha evolução profissional e pessoal, por confiar em mim mais do que eu próprio.

A todos os amigos e familiares que participaram direta ou indiretamente da minha jornada.

E, por fim, à professora Me. Francisca Lilian Cruz Brasileiro pela orientação e auxílio na delimitação do tema deste trabalho de revisão bibliográfica e pela humildade em repassar os seus conhecimentos e experiências.

RESUMO

Este estudo objetivou analisar, por meio de uma revisão bibliográfica, resultados de ensaios com adição de cinza volante, sílica ativa e metacaulim em diferentes porcentagens de adição e substituição em massa ao cimento a fim de obter, assim, uma análise da influência dessas adições no processo de carbonatação do concreto. De forma secundária, para auxiliar no entendimento da influência dessas adições, foram extraídos também dos trabalhos selecionados os resultados obtidos para a resistência à compressão e absorção de água. Para se obter as respostas buscou-se analisar os resultados de profundidade e coeficiente de carbonatação, resistência à compressão e sorvidade de concretos produzidos por diversos autores. Para tanto, optou-se para obtenção e coleta de dados o método de revisão bibliográfica por meio de pesquisa das palavras chaves nas principais bases de pesquisa como SciELO, Google Acadêmico, entre outros. De forma geral, os dados dos estudos selecionados permitem concluir que as adições minerais promovem melhorias mecânicas no concreto ao refinar a estrutura da pasta de cimento hidratada, por outro lado, as adições pozolânicas consomem a reserva de Ca(OH)_2 do concreto, tornando-o mais suscetível à carbonatação. Por meio do estudo realizado, percebe-se uma grande variabilidade de métodos, diferentes condições de ensaio e uso de materiais, dificultando a padronização das análises. Desta forma, obtém-se conclusões genéricas, mas que servem de norte para pesquisas futuras.

Palavras-chave: Concreto. Carbonatação. Adições minerais pozolânicas.

ABSTRACT

This study aimed to analyze, through a literature review, results of tests with the addition of fly ash, silica fume, and metakaolin in different percentages of addition and substitution in mass to cement in to obtain, thus, an analysis of the influence of these additions on the concrete carbonation process. Secondly, to help understand the influence of these additions, the results obtained for compressive strength and water absorption were also extracted from the selected works. To get the answers, we sought to analyze the results of depth and carbonation coefficient, compressive strength, and sorptivity of concrete produced by several authors. Therefore, the method of bibliographic review was chosen to obtain and collect data through a search for keywords in the primary research bases such as SciELO, Google Scholar, among others. In general, the data from the selected studies allow us to conclude that the mineral additions promote mechanical improvements in the concrete by refining the structure of the hydrated cement paste, on the other hand, the pozzolanic additions consume the Ca(OH)_2 reserve of the concrete, making -the most susceptible to carbonation. Through the study, variability of methods, different test conditions, and use of materials can be seen, making it difficult to standardize the analyses. In this way, generic conclusions are obtained, but they serve as a guide for future research.

Keywords: Concrete. Carbonation. Pozzolanic mineral additions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Transformação da caulinita em metacaulim.....	27
Figura 2 - Difusão do CO ₂ nos poros do concreto	29
Figura 3 - Profundidade carbonatada após 62 dias de carbonatação em câmaras com teor de CO ₂ de 5% e superior a 50% (cinza volante)	33
Figura 4 - Valores médios dos ensaios de resistência à compressão axial para a cinza volante	34
Figura 5 - Resumo das variáveis de controle de concreto e argamassa (sílica ativa)	35
Figura 6 - Planejamento da moldagem de corpos de prova de concreto e argamassa (sílica ativa)	36
Figura 7 - Resistência à compressão aos 28 dias para o metacaulim	39
Figura 8 - Resistência à compressão aos 90 dias para o metacaulim	40
Figura 9 - Profundidade de carbonatação amostras secas em estufa para o metacaulim.....	42
Figura 10 - Profundidade de carbonatação amostras saturadas para o metacaulim	43
Figura 11 - Resistência à compressão para o metacaulim.....	43
Figura 12 - Coeficiente de absorção capilar para o metacaulim.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Trabalhos selecionados para análise de resultados obtidos	17
Tabela 2 - Requisitos químicos dos materiais pozolânicos	19
Tabela 3 - Requisitos físicos dos materiais pozolânicos	19
Tabela 4 - Requisitos químicos e físicos da sílica ativa	23
Tabela 5 – Requisitos químicos e físicos do metacaulim	25
Tabela 6 - Composição química típica do metacaulim	26
Tabela 7 - Composição química típica da argila caulínica e do caulim	26
Tabela 8 - Características dos estudos selecionados para a cinza volante	31
Tabela 9 - Características gerais dos estudos selecionados para a cinza volante....	32
Tabela 10 - Coeficientes médios de carbonatação para a cinza volante	32
Tabela 11 - Valores de resistência à compressão e absorção capilar para a cinza volante.....	34
Tabela 12 - Características dos estudos selecionados para a sílica ativa	36
Tabela 13 - Características gerais dos estudos selecionados para a sílica ativa.....	37
Tabela 14 - Coeficientes médios de carbonatação para a sílica ativa.....	37
Tabela 15 - Valores de resistência à compressão e absorção capilar para a sílica ativa.....	38
Tabela 16 - Características principais dos concretos com metacaulim	39
Tabela 17 - Características dos estudos selecionados para o metacaulim.....	40
Tabela 18 - Características gerais dos estudos selecionados para o metacaulim	41
Tabela 19 - Coeficientes médios de carbonatação para o metacaulim	41
Tabela 20 - Resistência à compressão e sorvidade para o metacaulim	42
Tabela 21 - Resumo dos coeficientes de carbonatação dos estudos selecionados..	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVOS.....	15
1.1.1 Objetivo Geral.....	15
1.1.2 Objetivos Específicos.....	15
1.2 METODOLOGIA	15
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	18
2.1 ADIÇÕES MINERAIS POZOLÂNICAS	18
2.1.1 Cinza Volante.....	20
2.1.2 Sílica Ativa	22
2.1.3 Metacaulim.....	24
2.2 CARBONATAÇÃO.....	28
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
3.1 INFLUÊNCIA DA CINZA VOLANTE NA CARBONATAÇÃO	31
3.2 INFLUÊNCIA DA SÍLICA ATIVA NA CARBONATAÇÃO	35
3.3 INFLUÊNCIA DO METACAU LIM NA CARBONATAÇÃO	38
3.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	44
4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
REFERÊNCIAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Nardino et al. (2019), pode-se conceituar o processo de carbonatação como sendo um processo físico-químico que envolve o CO_2 e os produtos de hidratação do cimento, reduzindo o pH do concreto e causando a oxidação e a corrosão das armaduras. É preciso assumir que esse processo é um mecanismo que ocorre durante a vida útil do concreto e que se trata de uma patologia que influencia a sua durabilidade, estando diretamente relacionada com a deterioração do concreto armado.

Como bem assegura Neville (1997), pode-se dizer que o mecanismo de carbonatação, por si só, não é um problema para o concreto, assim sendo, sua influência na durabilidade do concreto armado está ligada ao fato de que ela reduz o pH dos poros de 12,6 e 13,5 para aproximadamente 8,3 quando todo o Ca(OH)_2 é consumido. Neste contexto, diminui-se a camada passivadora mantida pelo elevado pH do concreto e responsável por proteger o aço dos efeitos da corrosão. O mais preocupante, contudo, é constatar que a frente de carbonatação não avança de forma linear, o que dificulta as previsões e estimativas de sua profundidade (NEVILLE, 1997).

De forma geral, a velocidade do processo de carbonatação está relacionada com a difusão do CO_2 na pasta de cimento hidratada que, por sua vez, está correlacionada com a estrutura de poros da pasta de cimento (NEVILLE, 1997). A estrutura de poros é função do tipo de cimento, do tipo de cura e da relação a/c (água/cimento). Os cimentos compostos com adições minerais pozolânicas apresentam melhorias no que diz respeito à resistência à compressão, porosidade e permeabilidade, entretanto, deve-se verificar seu comportamento com relação à carbonatação, pois elas reagem com o Ca(OH)_2 do concreto, consumindo-o e fazendo com que uma quantidade menor de CO_2 seja necessária para reduzir todo o Ca(OH)_2 . Esta pesquisa foca em estudar a cinza volante, a sílica ativa e o metacaulim e a influência dessas adições na carbonatação e subsidiariamente, para auxiliar o entendimento da influência dessas adições, foram extraídos também resultados de resistência à compressão e absorção de água por meio de uma revisão bibliográfica.

As adições minerais propiciam o aumento da profundidade de carbonatação ao consumirem o Ca(OH)_2 , por outro lado, nessa mesma reação elas proporcionam maior densificação da estrutura do concreto, diminuindo os poros. O desafio é,

portanto, conseguir equacionar o uso dessas adições, como adição e como substituição parcial de cimento, com a finalidade de obter o melhor resultado no que diz respeito ao avanço da carbonatação e melhoria de propriedades físicas.

De acordo com Pauletti, Possan e Dal Molin (2007) o processo de carbonatação em ambiente natural, onde as concentrações de CO₂ estão entre 0,03% e 1,0%, leva muitos anos para apresentar dados passíveis de análise, sendo assim, o estudo desse processo ocorre principalmente por meio de ensaios acelerados. Os autores deixam claro que há, entretanto, uma grande variabilidade de estudos com métodos acelerados de carbonatação e que não há, ainda, um procedimento que seja amplamente aceito. “Essa falta de padronização diz respeito, principalmente, aos fatores ambientais e aos procedimentos de ensaio, enquanto os materiais constituintes, geralmente, são as variáveis objeto de estudo” (PAULETTI, POSSAN e DAL MOLIN, 2007, p. 8).

Tendo em vista a variabilidade dos métodos de ensaios acelerados e sua impossibilidade de representar a aleatoriedade do processo em ambiente natural, é importante levar também em consideração os resultados obtidos por métodos que estudam o processo em condições naturais de exposição ao CO₂ (PIRES, 2016).

Embora o tipo de procedimento de ensaio seja importante, carbonatação acelerada ou natural, este trabalho não os diferenciará. O objetivo que se busca alcançar com esta revisão de bibliografia é analisar a influência do uso de adições minerais pozolânicas no concreto, em específico a cinza volante, a sílica ativa e o metacaulim, como adição ou como substituição parcial de cimento. Para alcançar este objetivo a pesquisa analisou os resultados obtidos por estudos envolvendo adições minerais e os valores observados de profundidade de carbonatação, resistência à compressão e absorção de água.

Devido à dificuldade e a variabilidade de métodos para determinar precisamente como a frente de carbonatação avança para o interior do concreto, essa pesquisa se justifica pela análise de estudos e resultados obtidos por alguns pesquisadores. A vantagem em analisar os resultados obtidos por estudos anteriores é obter um panorama geral do comportamento da carbonatação em relação às adições minerais pozolânicas, permitindo, portanto, a obtenção de conhecimentos prévios para análises futuras mais aprofundadas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar por meio de uma revisão bibliográfica a influência das adições minerais pozolânicas (cinza volante, sílica ativa e metacaulim) na carbonatação do concreto.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar os resultados de profundidade e velocidade de carbonatação de concretos com adições de cinza volante, sílica ativa e metacaulim.
- Analisar a influência das adições minerais pozolânicas no processo de carbonatação do concreto.
- Analisar, de forma secundária, para auxiliar no entendimento da influência da adição de cinza volante, sílica ativa e metacaulim a resistência à compressão axial e a absorção de água.

1.2 METODOLOGIA

De acordo com Gil (2008) a pesquisa é um procedimento formal baseado em um método científico para a obtenção de respostas para problemas propostos, visando obter novos conhecimentos. Pesquisar é, portanto, realizar a coleta de uma série de dados, interpretá-los e sintetizá-los por meio de um método científico para a obtenção de conhecimento e respostas de um determinado evento.

Quanto à natureza, as pesquisas podem ser classificadas em básicas e aplicadas. De acordo com Prodanov e Freitas (2013), a pesquisa básica busca a obtenção de conhecimento que vise o avanço e progresso da ciência, mas que não precisam ter aplicação prática. Já as pesquisas de natureza aplicada, procuram "gerar conhecimentos para aplicação prática dirigidos à solução de problemas específicos. Envolve verdades e interesses locais" (PRODANOV e FREITAS, 2013, p. 51). A

pesquisa desenvolvida por este trabalho, busca compilar conhecimento de forma que ele possa ser usado por outros autores como norte em suas pesquisas. Não se busca obter resultados práticos aplicáveis e, portanto, ela classifica-se em sua natureza como básica.

Para melhor desenvolvimento desta pesquisa, buscou-se desenvolvê-la como uma pesquisa exploratória. Isso porque este estudo procurou fazer uso de fontes bibliográficas existentes para analisar os resultados já obtidos por outros pesquisadores, procurando compreender a influência de diferentes adições minerais pozolânicas no concreto.

"As pesquisas exploratórias têm como principal finalidade desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, tendo em vista a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores." (GIL, 2008, p. 27)

De forma exploratória, esta pesquisa resumiu os resultados obtidos por estudos anteriormente desenvolvidos. Foram analisados os resultados obtidos com adição e substituição de adições minerais ao cimento, especificamente, cinza volante, sílica ativa e metacaulim.

Tendo em vista o caráter bibliográfico deste trabalho por meio de fichamentos de livros, artigos, relatórios técnicos, a abordagem de pesquisa utilizada foi a qualitativa, devido à interpretação que se busca realizar dos dados obtidos por outras pesquisas que estudaram o mecanismo da carbonatação. Assim sendo, é preciso formar conjecturas sobre o tema estudado e o raciocínio utilizado foi o método hipotético-dedutivo, onde a partir de uma hipótese busca-se respostas para o problema.

A busca em compreender e analisar a influência das adições minerais pozolânicas na carbonatação e nas propriedades físico-mecânicas do concreto, como resistência à compressão axial e absorção de água, foi realizada por meio de uma revisão bibliográfica. Esse tipo de pesquisa desenvolve-se com a utilização de materiais já elaborados por outros autores e, de acordo com Gil (2008), sua vantagem está na possibilidade de se analisar um volume maior de informações do que a pesquisa direta.

Na busca de encontrar estudos relevantes para a análise deste trabalho foi realizado uma pesquisa sistemática nas seguintes bases de dados: SciELO, Google Acadêmico, Biblioteca Digital da UFG, Acervo Digital UFPR e Biblioteca Digital da USP. A pesquisa foi realizada usando as palavras chaves "carbonatação", "cinza

volante", "sílica ativa", "metacaulim", "adições minerais", "influência de adições minerais na carbonatação". Outros artigos foram escolhidos por meio da análise de fontes dos estudos pré-selecionados.

Foram incluídas neste estudo apenas as pesquisas que buscaram responder como se comporta os concretos com adições minerais em relação à carbonatação e publicadas no período de 2000 a 2022. A Tabela 1 resume as pesquisas selecionadas para análise dos resultados obtidos. Para cada uma das adições minerais foram utilizados três trabalhos, extraídos os resultados e comparados entre se para possibilitar a obtenção de conjecturas dos seus efeitos na carbonatação do concreto.

Tabela 1 - Trabalhos selecionados para análise de resultados obtidos

Fonte	Título
Raisdorfer (2015)	Influência da Adição ou Substituição de adições Minerais ao Cimento Portland: Efeitos na carbonatação, Absorção Capilar e Resistividade de Concretos
Ferreira (2013)	Estudo da Carbonatação Natural de Concretos com Diferentes Adições Minerais após 10 Anos de Exposição
Abreu (2004)	Estudo da Corrosão da Armadura induzida por Carbonatação em Concretos com Cinza Volante
Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017)	Influência da Sílica Ativa e do Metacaulim na Velocidade de Carbonatação do Concreto: Relação com Resistência, Absorção e Relação a/c
Kulakowski (2002)	Contribuição ao Estudo da Carbonatação em Concretos e Argamassas Compostos com Adição de Sílica Ativa
Souza (2021)	Efeitos da Mistura de Sílica Ativa e Nanossílica na Durabilidade do Concreto
Santos, Albuquerque e Ribeiro (2020)	Efeito da Adição do Metacaulim na Carbonatação de Concretos de Cimento Portland

Fonte: Própria (2022)

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ADIÇÕES MINERAIS POZOLÂNICAS

As adições minerais exercem papel importante na melhoria de propriedades físicas e químicas, proteção contra agentes deletérios e aspectos ambientais referentes à produção e consumo de cimento. Diversos estudos vêm sendo realizados buscando compreender a influência que diferentes porcentagens de adições como a sílica ativa, o metacaulim e a cinza volante exercem no concreto e suas implicações no processo de carbonatação.

De acordo com Hoppe Filho et al. (2017), as adições minerais pozolânicas podem ser incorporadas no processo de produção do cimento, dando origem aos cimentos CP II Z ou CP V, ou podem ser incorporadas como adição na mistura para produção do concreto, obtendo-se vantagens econômicas e ambientais ao reduzir o consumo de clínquer e mitigar os passivos ambientais gerados por esses materiais, que são resíduos de outros setores da indústria.

De acordo com a NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014), são exemplos de materiais pozolânicos a cinza volante, o metacaulim, a sílica ativa, pozolanas naturais e artificiais, argilas calcinadas e materiais como escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais, rejeito de carvão mineral etc. Segundo a norma supracitada, materiais pozolânicos são:

Materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si sós, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

A mesma norma divide os materiais pozolânicos em três classes. Classe N são as pozolanas naturais e artificiais; Classe C, cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em termelétricas; e Classe E, quaisquer pozolanas que não se encaixem nas classes N e C. Suas características químicas e físicas devem estar em conformidade com as Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 - Requisitos químicos dos materiais pozolânicos

Valores em porcentagem (%)

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio (*)
	N	C	E	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥ 70	≥ 70	≥ 50	ABNT NBR NM 22
SO ₃	≤ 4	≤ 5	≤ 5	ABNT NBR NM 16
Teor de umidade	≤ 3	≤ 3	≤ 3	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	≤ 10	≤ 6	≤ 6	ABNT NBR NM 18
Álcalis disponíveis em Na ₂ O	≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5	ABNT NBR NM 25

(*) Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico.

Fonte: NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014)

Tabela 3 - Requisitos físicos dos materiais pozolânicos

Propriedade	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
Material retido na peneira 45 μm	< 20 %	< 20 %	< 20 %	ABNT NBR 15864-3(*)
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, em relação ao controle	≥ 90 %	≥ 90 %	≥ 90 %	ABNT NBR 5752
Atividade pozolânica com cal aos sete dias	≥ 6 Mpa	≥ 6 Mpa	≥ 6 Mpa	ABNT NBR 5751

(*) Esse método de ensaio deve ser adaptado, substituindo-se o metacaulim pelo material pozolânico. Alternativamente, o método prescrito pela ABNT NBR 12826 pode ser utilizado desde que o material pozolânico retido na peneira de ensaio não apresente visualmente aglomeração de partículas.

Fonte: NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014)

As pozolanas são materiais naturais ou artificiais que, para ter reatividade, a sílica deve estar no estado amorfo, pois na forma cristalina a reatividade é muito baixa. "Foi sugerido que, além de reagir com o Ca(OH)₂, as pozolanas reagem também com o C₃A ou com seus produtos de hidratação." (NEVILLE, 1997, p. 102)

O grande volume de adições minerais ativas incorporado à composição do cimento Portland evidencia a importância da caracterização, seleção e entendimento da cinética de reação destes materiais na presença de portlandita. (HOPPE FILHO et al., 2017).

2.1.1 Cinza Volante

A cinza volante ou cinza volante pulverizada é gerada como resíduo durante o processo de queima do carvão mineral nas usinas termelétricas. Os resíduos gerados nesse processo se tornam passivos ambientais e as pesquisas para o seu reaproveitamento econômico são de interesse de profissionais, entidades científicas e industriais (SABEDOT et al., 2015).

O processo de queima do carvão mineral mencionado gera como resíduos sólidos a cinza pesada (ou de fundo) e a cinza leve (ou volante), sendo a cinza leve o mais utilizado como adição ao cimento Portland. A NBR 12653 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2014) a define como resíduos finamente divididos que resultam da combustão de carvão mineral pulverizado ou granulado com atividade pozolânica.

Conforme explicado acima, estes resíduos gerados se tornam passivos ambientais. Seu reaproveitamento é importante não apenas no sentido de mitigar os impactos ambientais, mas também à medida que o teor de cimento na mistura de concreto é substituído por altos teores de adições minerais como a cinza volante, diminuem os custos de produção, a emissão de CO₂, a energia consumida e há aumento na durabilidade do concreto (ISAIA; GASTALDINI, 2004).

Conforme explica Neville (1997), ela apresenta partículas esféricas com diâmetros variando entre menos do que 1 e 100 µm e uma finura bastante elevada, fazendo com que a superfície específica deste material varie entre 250 e 600 m²/kg. O autor evidencia que a elevada finura do material implica disponibilidade imediata para a reação com Ca(OH)₂.

"As cinzas volantes proporcionam ao concreto vantagens importantes e, portanto, é fundamental o conhecimento do papel e da influência desse material" (NEVILLE, 1997, p. 643). Conforme mencionado pelo autor e conforme acima citado, o uso desse material não é importante apenas do ponto de vista ambiental, mas também na influência que ele exerce nas propriedades do concreto.

As cinzas geradas na queima de carvão mineral em usinas termelétricas apresentam grande variabilidade em suas propriedades; suas características físicas, químicas e mineralógicas dependem de fatores como a composição do carvão de origem, as condições de combustão, o tipo e a eficiência do sistema de controle de

emissões, a retirada por precipitação dos gases e do grau de classificação das partículas pelo sistema de exaustão (NEVILLE, 1997; SABEDOT et al., 2011).

Sobre as propriedades gerais da cinza volante, Neville (1997, p. 640), afirma:

É um pouco difícil apresentar as informações disponíveis sobre a influência do uso desses três materiais cimentícios - cinza volante, escória de alto forno, sílica ativa - de forma objetiva e com validade genérica. Foi publicado um grande número de resultados de pesquisas, mas, em muitos deles, um pesquisador entusiasmado descreve apenas um conjunto de ensaios sobre um desses materiais, e mostra os benefícios do uso desse material, que, muitas vezes, é um produto local.

A partir do exposto pelo autor supracitado e do conteúdo abordado nos parágrafos anteriores, entende-se que a cinza volante e as adições minerais trazem vantagens técnicas consideráveis para o concreto, entretanto não é possível estabelecer modelos genéricos de previsão das suas influências devido à variabilidade dos modelos de estudos, que muitas vezes são baseados em variáveis específicas. Desta forma, é muito importante a revisão e a análise global dos resultados obtidos pelos diversos estudos já existentes, de modo a buscar entender o quadro geral das misturas com esse material.

Fica evidente diante desse quadro que há lacunas e respostas a serem respondidas no que diz respeito ao uso de materiais como a cinza volante. De acordo com Altheman et al. (2017), existem tipos de cinzas volantes que ainda não foram totalmente estudadas, como a cinza de carvão mineral da fabricação de alumínio. Embora as cinzas volantes apresentem menor velocidade nas reações de hidratação, influenciando pouco no ganho de resistência inicial, elas podem substituir o consumo de clínquer com substituições no cimento entre 40 e 50%.

Os esforços da comunidade acadêmica na busca por caracterização do seu comportamento são importantes também no sentido de se buscar compreender o processo de carbonatação. "Vê-se na união de esforços da comunidade acadêmica um elevado potencial para o esclarecimento do fenômeno que, neste sentido, nos levará à normalização dos procedimentos de ensaio." (PAULETTI et al., 2007, p. 17).

2.1.2 Sílica Ativa

A sílica ativa (SA), também conhecida como microssílica, fumo de sílica ou fumo de sílica condensada é um dos resíduos da fabricação do ferro silício ou silício metálico, obtida de quartzo de elevada pureza e de carvão em forno elétrico a arco submerso (NEVILLE, 2016).

A NBR 13956-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012, p. 2), que trata dos requisitos para uso da SA em concreto, argamassa e pasta, a define como:

Material decorrente do processo de produção de silício metálico ou ligas de ferro silício 75% em fornos elétricos, onde, durante o processo, é gerado o gás SiO que, ao sair do forno, oxida-se formando partículas de SiO₂, que são captadas por sistemas de filtros coletores; esse material constitui um tipo de pozolana formada essencialmente por partículas esféricas com diâmetros menores que 10⁻⁶ m de sílica no estado amorfo.

Ela é classificada e pode ser encontrada comercialmente como sílica ativa não densificada (SND) e sílica ativa densificada (SD). De acordo com a NBR 13956-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012), a SND é a sílica que não foi submetida a tratamento para aglomerar suas partículas e possui densidade aparente no estado solto entre 150kg/m³ e 350kg/m³; já a SD é a sílica que passou por processo de beneficiamento para aglomeração de suas partículas e apresenta densidade aparente no estado solto entre 350kg/m³ e 700kg/m³. Ela pode, ainda, segundo a mesma norma, estar na forma de dispersão aquosa. A sílica ativa na forma de dispersão aquosa (SDA) é a sílica que contém um teor de sólidos em dispersão aquosa de 50% em massa.

A sílica ativa é uma pozolana de elevada reatividade por possuir, em aspectos gerais, teores superiores a cerca de 90% de SiO₂ amorfo, um alto grau de amorfismo e uma elevada finura, melhorando o empacotamento das partículas do concreto (FRAGA et al., 2020; FRAGA; SOARES; CAPUZZO, 2021; NEVILLE, 2016).

A Tabela 4 estabelece os requisitos físicos e químicos que devem ser atendidos pela SA comercializada, bem como serve de parâmetro para a sua aceitação. Do ponto de vista químico, com concentração média maior que 85% de

SiO₂, e físico, com partículas de tamanho médio menores que 1µm, a SA é um material homogêneo.

Tabela 4 - Requisitos químicos e físicos da sílica ativa

Determinação	Unidade	Limite	Método de ensaio
SiO ₂ ^a	%	≥85,0	ABNT NBR 13956-2
Umidade ^b	%	≤3,0	ABNT NBR 13956-2
Perda ao fogo ^a	%	≤6,0	ABNT NBR 13956-2
Equivalente alcalino em Na ₂ O ^a	%	Informar	ABNT NBR 13956-2
Teor de sólidos na dispersão aquosa ^c	%	Não pode variar mais do que ±2 % do valor declarado pelo fabricante	ABNT NBR 13956-2
Índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias	%	≥105	ABNT NBR 13956-3
Finura por meio da peneira 45 µm	%	≤100	ABNT NBR 13956-4
Área específica B.E.T. (opcional) ^d	m ² g ⁻¹	15≤B.E.T.≤30	ASTM C 1069

^a A análise química, incluindo a perda ao fogo, deve ser realizada na base seca, ou seja, após a determinação do teor de umidade a (105±5) °C.

^b Não se aplica à sílica ativa na forma de dispersão aquosa (3.4).

^c Não se aplica à sílica ativa nas formas densificada (3.2) e não densificada (3.3).

^d O ensaio para a determinação da área específica, pelo método da ASTM C 1069, de acordo com o princípio proposto por Brunauer, Emmett e Teller (B.E.T.), substituindo-se alumina e quartzo por sílica ativa, deve ser realizado pelo produtor quando solicitado pelo consumidor.

Fonte: NBR 13956-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012)

Na influência que exerce nas propriedades de concretos e argamassas, a SA não tem o papel apenas de ser uma pozolana de elevada reatividade. Quando a interação é pozolânica, a SA reage com o hidróxido de cálcio (CH), oriundo da hidratação do cimento, e produz C-S-H adicional, conferindo melhorias relacionadas à durabilidade. Por ter elevada finura, atua como fíler, criando pontos de nucleação que refinam a estrutura de poros da pasta de cimento hidratada, densificando sua microestrutura e diminuindo a porosidade (FRAGA et al., 2020; FRAGA; SOARES; CAPUZZO, 2021).

Logo, conforme explicado acima, os benefícios da adição de sílica ativa ao concreto incluem tanto vantagens químicas quanto físicas. Tais vantagens são citadas pela NBR 13956-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012) como sendo, por exemplo, aumento da resistência à compressão e à flexão, redução da porosidade e permeabilidade, aumento da resistência a sulfatos, resistência à difusibilidade de íons cloreto, mitigação da reação álcali-agregado, redução da

ocorrência de eflorescência, aumento da resistividade elétrica e a produção de concreto consumindo menos energia e emissão de CO₂.

Corroborando com o exposto acima, Amaral, Macioski e Medeiros (2021) afirmam que:

As melhorias promovidas pela incorporação da sílica ativa na matriz cimentícia são atribuídas à capacidade de: (a) melhorar o empacotamento dos sólidos e o refinamento da estrutura porosa, através do preenchimento dos vazios entre os grãos de cimento; (b) prover pontos de nucleação para a precipitação dos produtos de hidratação nas primeiras idades, que contribuem para a formação de cristais menores de hidróxido de cálcio e com menor tendência de cristalização em orientações preferenciais; (c) exibir propriedades pozolânicas, que consistem na interação com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento, resultando na formação de silicatos de cálcio hidratado secundários (C-S-H) [...]; e (d) aumentar a resistência da zona de transição entre os agregados e a pasta cimentícia por meio da redução da porosidade local e do aumento na qualidade dos produtos de hidratação do cimento nessa região.

Os autores citados anteriormente deixam claro, ao elencar os pontos em que a sílica ativa exerce nas propriedades físicas e químicas, a importância do seu uso no concreto. É possível inferir do exposto, que no que diz respeito ao processo de corrosão das armaduras por carbonatação, de acordo com o que já foi mencionado nos capítulos anteriores, ao promover maior densificação da estrutura de poros da matriz cimentícia, a sílica ativa dificultará a difusão do CO₂ por esses poros.

Sendo assim, "sem dúvidas, o maior uso da sílica ativa é com o objetivo de produzir concretos com propriedades melhoradas, principalmente resistência inicial elevada ou baixa penetrabilidade" (NEVILLE, 2016, p. 696). O resultado de seu uso em porcentagens controladas será a obtenção de concretos mais duráveis e mais resistentes à ação de agentes deletérios.

2.1.3 Metacaulim

O metacaulim (MK) está entre os materiais pozolânicos que possuem elevada reatividade e é obtido pela calcinação e moagem de argilas cauliníticas ou caulins de elevada pureza. Suas partículas são essencialmente lamelares e sua estrutura é predominantemente não cristalina (SANTOS; ALBUQUERQUE; RIBEIRO, 2020). Os

requisitos físicos e químicos que devem ser atendidos pelo metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta, estão resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 – Requisitos químicos e físicos do metacaulim

Componente	Unidade	Limite	Método de ensaio
SiO ₂	%	≥ 44,0 e ≤ 65,0	ABNT NBR NM 22 ou ABNT NBR 14656
Al ₂ O ₃	%	≥ 32,0 e ≤ 46,0	ABNT NBR NM 11-2 ou ABNT NBR 14656
CaO + MgO	%	≤ 1,5	ABNT NBR NM 11-2 ou ABNT NBR 14656
SO ₃	%	≤ 1,0	ABNT NBR NM 16
Na ₂ O	%	≤ 0,5	ABNT NBR NM 17
Equivalente alcalino em Na ₂ O	%	≤ 1,5	ABNT NBR NM 17
Umidade	%	≤ 2,0	ABNT NBR NM 24
Perda ao fogo	%	≤ 4,0	ABNT NBR NM 18
Resíduo na peneira com abertura de malha de 45 μm	%	≤ 10,0	ABNT NBR 15894-3
Índice de desempenho com cimento aos 7 dias	%	≥ 105	ABNT NBR 15894-2
Índice de atividade pozolânica Chappelle (opcional)	mgCa(OH) ₂ /gmaterial	≥ 750	ABNT NBR 15895
Área específica B.E.T (opcional)	m ² .g ⁻¹	≥ 15	ASTM C-1069

A análise química, incluindo a perda ao fogo, deve ser realizada na base seca, ou seja, após determinação do teor de umidade a (105 ± 5) °C.

A critério do consumidor, podem ser solicitados os ensaios de atividade pozolânica pelo método preconizado pela ABNT NBR 15895 (método de Chappelle) e ensaio para determinação da área específica pelo método ASTM C-1069, de acordo com o princípio proposto por Brunauer, Emmett e Teller (B.E.T), que devem, quando solicitados, atender aos valores mínimos apresentados na Tabela 1.

Nota Equivalente alcalino em Na₂O → $Na_2O_{eq} = 0,658 \%K_2O + \%Na_2O$.

Fonte: NBR 15894-1 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010)

Conforme explica Figueiredo et al. (2014) e Carmo e Portella (2008), o metacaulim apresenta uma superfície específica de cerca de 60.000 m²/kg e sua composição sílico-aluminosa é representada por 50%-55% de SiO₂ e 40-45% de Al₂O₃.

Conforme explicado acima, o metacaulim é obtido pela calcinação de argilas caulínicas ou caulins. A composição química da caulinita gira em torno de teores de

39,8% de Al_2O_3 , 46,3% SiO_2 e 13,9% de H_2O e microestruturalmente ela deve conter partes lamelares tetraédricas de silicato (SiO_4) e octaédrica de gibsita (CARMO e PORTELLA, 2008). As Tabelas 6 e 7 apresentam a composição química típica do metacaulim, da argila caulinítica e do caulim.

Tabela 6 - Composição química típica do metacaulim

Composição típica do metacaulim	Porcentagem em massa
SiO ₂	51,52
Al ₂ O ₃	40,18
Fe ₂ O ₃	1,23
CaO	2,00
MgO	0,12
Álcalis	0,53
Perda ao Fogo	2,01

Fonte: (CARMO e PORTELLA, 2008, p. 311)

Tabela 7 - Composição química típica da argila caulinítica e do caulim

Composição	Argila Caulinítica Típica	Caulim Teórico
SiO ₂	> 40,0% e < 60,0%	46,54%
Al ₂ O ₃	> 25,0% e < 45,0%	39,50%
Fe ₂ O ₃	< 8,0%	-
Na ₂ O	< 0,1%	-
K ₂ O	< 3,0%	-
TiO ₂	< 1,0%	-
CaO	< 1,0%	-
H ₂ O (PF)	> 8,0% e < 18,0%	13,96%
Outros	< 1,0%	-
Relação Al ₂ O ₃ /SiO ₂	-	0,85

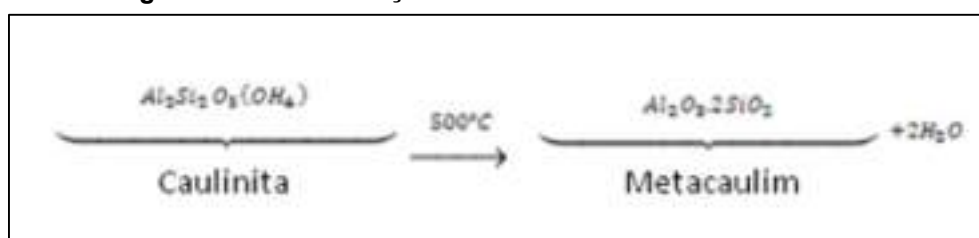
Fonte: (ROCHA, 2005, p. 13)

O uso do MK como pozolana é muito vantajoso em concretos e argamassas devido à sua alta reatividade com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, produzindo silicatos e aluminatos de cálcio hidratados. A elevada reatividade do material se deve à sua superfície específica elevada, a maior parte das partículas desse material gira em torno de

16µm, o que gera elevada finura e faz com que ele seja capaz de acelerar a reação pozolânica (FIGUEIREDO et al., 2014).

Diante do exposto acima e da comprovada atividade pozolânica do Metacaulim, deve-se ressaltar que a sua composição química não é parâmetro para a pozolanicidade, servindo, apenas, como padrão de controle de produção e de aceitação do produto. "Para o desenvolvimento das propriedades pozolânicas das argilas é necessário que elas sofram um tratamento térmico entre 400°C e 550°C" (RODRIGUES, 2014, p. 12). A equação da Figura 1 descreve como a caulinita, por meio do tratamento térmico, se transforma em metacaulim.

Figura 1 - Transformação da caulinita em metacaulim



Fonte: (RODRIGUES, 2014, p. 12)

Conforme explicado acima, a pozolanicidade das argilas e sua transformação em metacaulim ocorre em elevadas temperaturas. Este tratamento térmico causa um grande desequilíbrio físico-químico, que faz com que, ao entrar em contato com a alcalinidade do concreto, o silício e o alumínio da metacaulinita se dissolva e reaja com o CH, produzindo silicatos, aluminossilicatos e aluminatos de cálcio hidratados (CARMO; PORTELLA, 2008; SANTOS; ALBUQUERQUE; RIBEIRO, 2020; SOUSA; RÊGO, 2020).

O efeito químico do metacaulim resulta diretamente das reações desencadeadas pelo composto, especialmente a reação pozolânica. No caso do metacaulim, que é rico em alumínio, a reação pozolânica consome hidróxido de cálcio (CH) para formar aluminossilicato de cálcio hidratado (C-A-S-H). Portanto, sua ocorrência pode ser avaliada pela medição do teor de CH nas amostras, feita com análise termogravimétrica. Até 7 dias de hidratação, estudos mostram que o teor de CH em pastas com metacaulim aumenta com a idade, revelando que a reação pozolânica ainda não ocorre com grande relevância nesse período (SOUSA; RÊGO, 2020).

Além do efeito químico, o metacaulim atua fisicamente no concreto por meio do efeito fíler. Por meio desse efeito há o preenchimento dos vazios e a densificação

da zona de transição pasta/agregado (CARMO; PORTELLA, 2008). De acordo com Sousa; Rêgo (2020), no efeito filer do metacaulim ocorre primeiramente a nucleação desencadeada pela maior área superficial do MK em comparação com a do cimento. O segundo efeito "ocorre em cimentos compostos com metacaulim, porque neles existe um menor teor de clínquer para a mesma quantidade de água, acarretando mais espaço disponível para a formação dos produtos de hidratação do clínquer" (SOUSA; RÊGO, 2020).

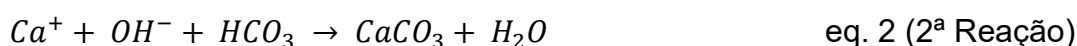
O uso desse material como adição ou como substituição parcial de cimento visa atender a necessidades técnicas nos quesitos de durabilidade, resistência e absorção. Deve-se atentar também para as vantagens econômicas e ambientais ao reaproveitar subprodutos industriais. Santos et al. (2020) afirmam que o conhecimento do processo de carbonatação ainda é pouco entendido e não possui um procedimento normativo para sua determinação, desta forma os estudos envolvendo adições como o MK são de suma importância para o entendimento do fenômeno.

2.2 CARBONATAÇÃO

Pode-se dizer que as estruturas de concreto estão sujeitas a diversos agentes patológicos e à deterioração ao longo do tempo. Um dos fenômenos que causa a sua deterioração e diminui sua durabilidade é a corrosão das armaduras devido ao mecanismo de carbonatação. De acordo com Gomes (2006) e Neville (1997), por possuir elevada alcalinidade, o concreto fornece proteção ao aço por meio de uma camada passivadora delgada que o protege da reação com o oxigênio e com a água. A corrosão devido à carbonatação é classificada como corrosão generalizada e eletroquímica em meio aquoso (GOMES, 2006).

De acordo com Farias e Silva (2019), a camada alcalina que serve de proteção às armaduras sofre com o ataque de agentes agressivos como o dióxido de carbono (CO_2), que reage com o hidróxido de cálcio [$Ca(OH)_2$] presente no concreto, tornando essa camada menos alcalina.

Reação de carbonatação para o hidróxido de cálcio (GOMES, 2006, p. 23):

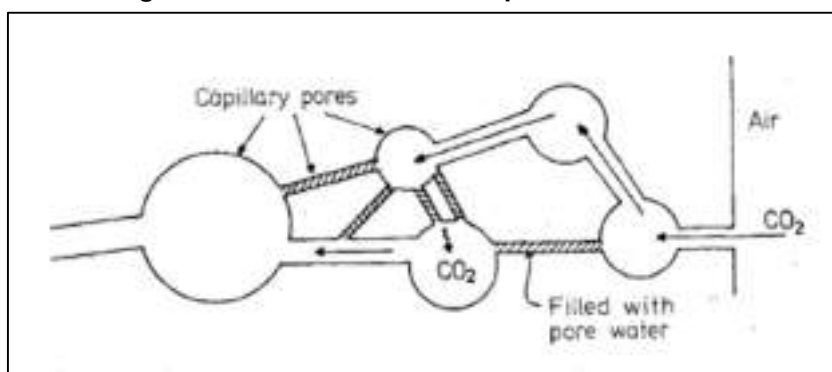


A profundidade da frente carbonatada avança a partir da superfície seguindo de forma progressiva para o interior do concreto, este processo cria duas zonas de pH totalmente distintos, variando de um pH próximo a 13 para um pH próximo a 8 (HELENE e CUNHA, 2001).

A velocidade desse fenômeno depende de vários fatores como materiais, tipo de cimento, relação água/cimento e grau de hidratação, dosagem e condições ambientais, tendendo para uma profundidade máxima em função da colmatação gradativa dos poros, efeito dessa mesma carbonatação (GOMES, 2006; NEVILLE, 1997).

Conforme explicado acima, é possível verificar que todo o processo está relacionado a fatores que influenciam na difusividade do CO_2 , pois sua ação ocorre mesmo em concentrações baixas. Como asseguram (NARDINO et al., 2019) e (SILVA et al., 2019), a carbonatação do concreto é um processo físico-químico que envolve a difusão e reação do CO_2 com os produtos de hidratação do cimento e outros constituintes sólidos carbonatáveis. Neste contexto, fica claro que, conforme afirma (NEVILLE, 1997, p. 498), "o fator fundamental que controla a carbonatação é a difusividade da pasta de cimento hidratada". A difusão do CO_2 nos poros do concreto pode ser observada na Figura 2.

Figura 2 - Difusão do CO_2 nos poros do concreto



Fonte: (TUUTTI, 1982)

De acordo com Helene e Cunha (2001), para que as reações de carbonatação ocorram conforme as equações 1 e 2, o CO_2 precisa se difundir pela estrutura de poros do concreto do exterior para seu interior e a velocidade deste processo é

influenciada pela umidade relativa do ambiente. Além disso, os autores deixam claro que a difusão do CO_2 em meio aquoso é 10^4 vezes menor do que através do ar. Por outro lado, conforme afirma Neville (1997), o CO_2 gasoso do ambiente não é reativo e é somente na presença de umidade que ele reage com a pasta de cimento hidratada.

Assim sendo, conforme mencionado pelos autores, pode-se constatar que se não houver umidade, apenas ar, o CO_2 se difundirá mais rápido através dos poros e não haverá carbonatação, pois o gás não é reativo. Ela também não ocorrerá na situação em que os poros estejam completamente preenchidos por água, pois o CO_2 se difundirá muito lentamente. Portanto, como afirma (NEVILLE, 1997, p. 496), "a velocidade máxima de carbonatação ocorre a umidades relativas entre 50% e 70%", pois os poros estarão parcialmente preenchidos por água.

Conforme explicado acima, todo esse mecanismo é prejudicial ao concreto porque pode afetar a sua vida útil e durabilidade ao promover a corrosão das armaduras. As adições abordadas por este trabalho promovem alterações nas propriedades do concreto resultante, por exemplo, na porosidade e permeabilidade. Tornando-se, assim, de suma importância estudos que verifiquem seus comportamentos naquele processo.

(NEVILLE, 1997, p. 500) afirma que:

O ponto de partida nessa avaliação é o conhecimento da microestrutura e de outras propriedades da pasta de cimento resultantes do uso dos diversos materiais cimentícios naquilo em que essas propriedades influenciam a carbonatação física ou quimicamente. [...] O cimento composto conduz a um teor menor de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na pasta de cimento, de modo que é necessária uma quantidade menor de CO_2 para retirar todo $\text{Ca}(\text{OH})_2$, produzindo CaCO_3 . [...] No entanto, há um outro efeito da reação entre sílica pozzolânica e o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ou seja, resulta uma estrutura mais densa da pasta de cimento, de modo que a difusividade é reduzida e a carbonatação passa a ser mais lenta.

O autor supracitado, portanto, esclarece que as adições minerais pozzolânicas são importantes no que diz respeito à redução da difusividade do CO_2 , devido à densificação da estrutura de poros da pasta de cimento hidratada. Por outro lado, ao consumir a reserva alcalina, estas adições podem causar aumento na velocidade de carbonatação. Esse é o motivo pelo qual é relevante frisar a importância da realização de estudos que busquem analisar tanto física quanto quimicamente as propriedades do concreto resultante de cimentos com estas adições.

Diante desse quadro, fica evidente que todo o mecanismo é complexo e que envolve diferentes variáveis, como relação água/aglomerante, tipo de cimento, temperatura, concentração de CO₂ no ambiente, umidade relativa do ar, produção, aplicação e idade do concreto. Todos estes fatores estão diretamente relacionados com a dificuldade ou facilidade de disseminação do gás e sua consequente reação com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 INFLUÊNCIA DA CINZA VOLANTE NA CARBONATAÇÃO

Buscando a compreensão da influência da cinza volante no processo de carbonatação, foram abrangidos neste capítulo os resultados obtidos pelos trabalhos dos autores Raisdorfer (2015), Ferreira (2013) e Abreu (2004). Em seus trabalhos, os autores utilizaram, além de cinza volante, outras adições como por exemplo sílica ativa, metacaulim e sílica de casca de arroz. Para a estruturação e análise deste capítulo serão extraídos apenas os resultados obtidos com o uso da cinza volante.

Raisdorfer (2015) utilizou em seu estudo teores de cinza volante nas porcentagens de 10% e 30%, ambos em substituição parcial e em adição ao cimento. Ferreira (2013) utilizou o teor de 25% em substituição parcial ao cimento e Abreu (2004) trabalhou com teores de 0%, 15%, 30% e 45% de substituição. Para o ensaio de carbonatação Raisdorfer (2015) e Abreu (2004) trabalharam com o procedimento de carbonatação acelerada, já Ferreira (2013) trabalhou com o processo de carbonatação natural e realizou uma análise estatística dos resultados obtidos para encontrar o coeficiente de carbonatação. Essas informações estão resumidas na Tabela 8.

Tabela 8 - Características dos estudos selecionados para a cinza volante

Pesquisador	Teor de adição	Teor de substituição	Carbonatação
Raisdorfer (2015)	10% e 30%	10% e 30%	Acelerada
Ferreira (2013)	-	25%	Natural
Abreu (2004)	-	0%, 15%, 30% e 45%	Acelerada

Fonte: Própria (2022)

As informações das variáveis principais dos estudos selecionados para a cinza volante encontram-se resumidas na Tabela 9.

Tabela 9 - Características gerais dos estudos selecionados para a cinza volante

Pesquisador	Tipo material	Dimensão das amostras (cm)	Cura (dias)	Sazonamento	UR (%)	T (°C)	CO ₂ (%)
Raisdorfer (2015)	Concreto	Cilíndricas 10x20	Câmara úmida 28 dias	21 dias	60 ± 0,5	40 ± 0,1	5
Ferreira (2013)	Concreto	Cilíndricas 10x20 para ensaio de resistência à compressão. Prismáticas 20x20x50 para ensaio de carbonatação.	Câmara úmida 28 dias	91 dias	Variável	Variável	-
Abreu (2004)	Concreto	Cilíndricas 10x20 para ensaio de resistência à compressão. Prismáticas 10x10x6 para ensaio de carbonatação.	Câmara úmida 28 dias	-	70 ± 5	25 ± 2	5 e superiores a 50

Fonte: Própria (2022)

Todos os pesquisadores realizaram as leituras da profundidade de carbonatação por meio de indicador químico à base de fenolftaleína. Os resultados de coeficientes de carbonatação encontram-se resumidos na Tabela 10.

Tabela 10 - Coeficientes médios de carbonatação para a cinza volante

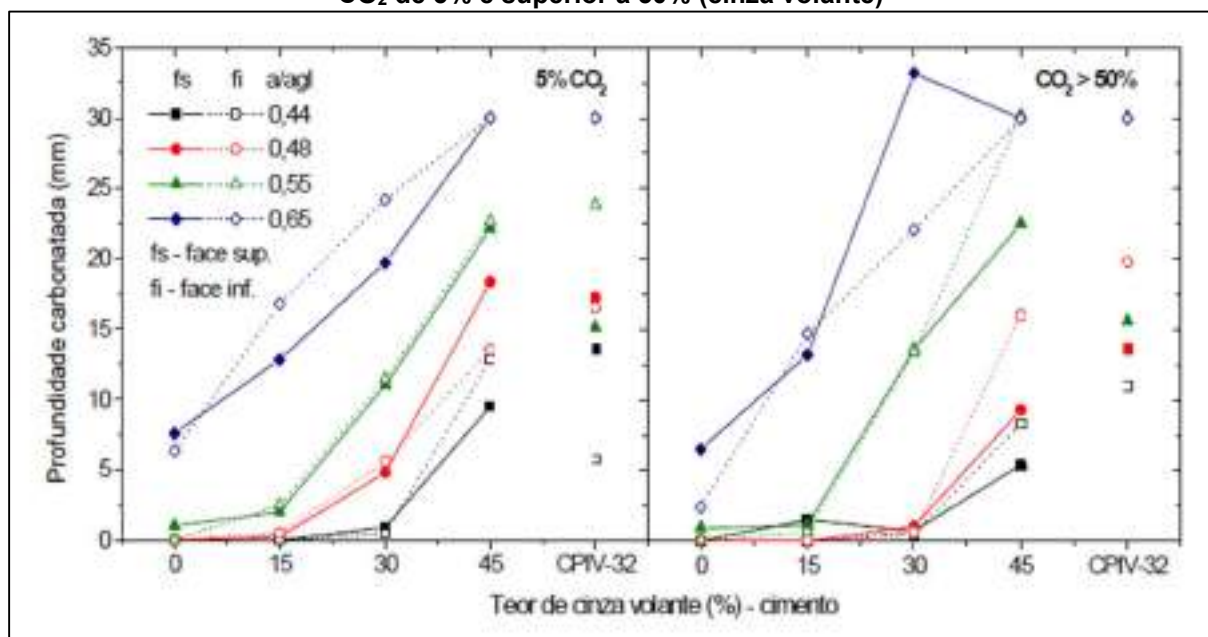
Fonte	Relação a/lig	Cura	Coefficiente Carbonatação Referência	Tipo adição	Tipo substituição	Coefficiente Carbonatação (mm.semana ^{0,5})	Comparação com Concreto Referência (%)
Raisdorfer (2015)	0,5	úmida	1,46	CV 10%	-	2,38	63
				CV 30%	-	2,90	92
				-	CV 10%	2,21	51
				-	CV 30%	3,17	117
Ferreira (2013)	0,40	úmida	1,92	-	CV 25%	3,13	63
		seca	3,19	-	CV 25%	4,97	56
	0,55	úmida	4,46	-	CV 25%	6,59	48
		seca	5,52	-	CV 25%	8,44	53
	0,70	úmida	5,69	-	CV 25%	8,59	51
		seca	6,66	-	CV 25%	12,02	80
Abreu (2004)	0,44	úmida	-	-	CV 0%, 15%, 30% e 45%	-	-
	0,48		-	-	CV 0%, 15%, 30% e 45%	-	-
	0,55		-	-	CV 0%, 15%, 30% e 45%	-	-
	0,65		-	-	CV 0%, 15%, 30% e 45%	-	-

CV - Cinza Volante

O foco do estudo realizado por Abreu (2004) está na despassivação da armadura, desta forma, em seu trabalho a análise da profundidade de carbonatação busca compreender o comportamento do fenômeno nas misturas qualitativamente. Os dados de profundidade de carbonatação foram apresentados apenas para a idade de

62 dias, impossibilitando assim, para comparação com os demais trabalhos selecionados, o cálculo do coeficiente de carbonatação. Os resultados obtidos por Abreu (2004) para a profundidade de carbonatação estão resumidos nos gráficos da Figura 3.

Figura 3 - Profundidade carbonatada após 62 dias de carbonatação em câmaras com teor de CO₂ de 5% e superior a 50% (cinza volante)



Fonte: (ABREU, 2004, p. 80)

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e absorção obtidos por Raisdorfer (2015) e Ferreira (2013) estão resumidos na Tabela 11. Os resultados de resistência obtidos por Abreu (2004) encontram-se resumidos na Figura 4.

Tabela 11 - Valores de resistência à compressão e absorção capilar para a cinza volante

Fonte	Propriedade	Idade	Relação a/agi	Referência	Tipo adição	Tipo substituição	Valores obtidos	Comparação (%)	
Raisdorfer (2015)	Res. à Compressão (Mpa)	28 dias	0,5	61,5	CV 10%	-	37,70	-39	
				61,5	CV 30%	-	35,90	-42	
				61,5	-	CV 10%	40,10	-35	
				61,5	-	CV 30%	39,60	-36	
	Sonidade (g/(cm ² tempo ^{0,5}))	28 dias	0,5	0,0107	CV 10%	-	0,0115	7	
				0,0107	CV 30%	-	0,0123	15	
				0,0107	-	CV 10%	0,0090	-15	
				0,0107	-	CV 30%	0,0070	-35	
Ferreira (2013)	Res. à Compressão (Mpa)	7 dias	0,40	20,10	-	CV 25%	22,5	-20	
				0,55	21,90	-	CV 25%	14,7	-33
				0,70	15,80	-	CV 25%	12,6	-20
		28 dias	0,40	32,90	-	CV 25%	34,9	6	
				0,55	24,80	-	CV 25%	23,5	-5
				0,70	18,90	-	CV 25%	25,7	36
		91 dias	0,40	47,30	-	CV 25%	41,00	-13	
				0,55	39,20	-	CV 25%	31,30	-20
			0,70	29,80	-	CV 25%	33,20	11	
				0,40	47,10	-	CV 25%	41,20	-13
		182 dias	0,55	38,90	-	CV 25%	28,40	-27	
				0,70	29,40	-	CV 25%	27,80	-5
	0,40		0,42	-	CV 25%	0,29	-31		
			0,55	0,37	-	CV 25%	0,31	-15	
	Absorção capilaridade (g/cm ²)	28 dias	0,70	1,04	-	CV 25%	0,49	-53	
				0,40	0,62	-	CV 25%	0,46	-26
			91 dias	0,55	0,94	-	CV 25%	0,81	-14
				0,70	0,70	-	CV 25%	0,53	-24
		182 dias	0,40	1,06	-	CV 25%	0,52	-51	
				0,55	0,85	-	CV 25%	0,78	-8
0,70			0,63	-	CV 25%	0,85	35		
			Resultados resumidos na Figura 4.						
Abreu (2004)	Res. à Compressão (Mpa)	-	O trabalho não realizou ensaios para determinação de absorção de água por capilaridade.						
	Absorção de água	-	O trabalho não realizou ensaios para determinação de absorção de água por capilaridade.						

CV - Cinza Volante

Figura 4 - Valores médios dos ensaios de resistência à compressão axial para a cinza volante

a/agi	Idade	Teor de cinza volante (%)				Cimento CPIV 32
		0	15	30	45	
0,44	7	35,65	34,95	29,45	23,25	22,70
	28	36,00	44,85	40,40	32,15	33,55
	91	52,50	52,25	48,85	44,35	34,85
	182	54,70	55,6	49,95	45,60	38,30
0,48	7	32,80	29,55	24,20	20,95	17,85
	28	40,80	35,35	35,15	31,80	27,20
	91	42,05	50,45	37,65	38,05	33,50
	182	43,90	49,20	45,10	40,20	38,00
0,55	7	26,55	23,95	18,20	14,70	14,80
	28	34,55	34,75	29,80	24,80	18,85
	91	38,75	41,75	37,65	32,15	28,80
	182	39,80	39,15	36,95	34,30	32,65
0,65	7	21,20	19,15	13,40	9,75	10,45
	28	28,40	24,45	19,55	16,00	16,25
	91	31,90	28,70	26,55	24,05	19,10
	182	31,65	29,20	26,35	24,60	20,70

Fonte: (ABREU, 2004)

Verificando os resultados obtidos pelos autores em seus trabalhos, observa-se que a resistência à carbonatação dos concretos estudados com a adição ou substituição parcial ao cimento de cinza volante foi afetada negativamente. De acordo com Ferreira (2013) a análise dos resultados individuais com a variação da relação a/agl (água/aglomerante) demonstra que a carbonatação dos concretos com cinza volante é bastante afetada por esse parâmetro.

3.2 INFLUÊNCIA DA SÍLICA ATIVA NA CARBONATAÇÃO

Para estruturação deste tópico foram selecionados os resultados obtidos nos trabalhos de Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017); Kulakowski (2002) e Souza (2021).

Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017) utilizaram uma porcentagem de 10% em massa de sílica ativa em substituição parcial e em adição ao consumo de cimento. Segundo o autor, essa porcentagem foi utilizada por ser um valor médio para a utilização de pozolanas de alta reatividade. Mantendo a relação água/cimento constante, o trabalho de Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017) buscou como variáveis de resposta resultados de resistência à compressão, sorvidade (absorção capilar) e velocidade de carbonatação.

Já Kulakowski (2002) realizou seu trabalho utilizando concreto e argamassa em diferentes níveis de relação água/aglomerante e sílica resumidos na Figura 5. A moldagem dos corpos de prova de concreto e argamassa seguiu o planejamento estatístico resumido na Figura 6.

Figura 5 - Resumo das variáveis de controle de concreto e argamassa (sílica ativa)

Variável	Concreto	Argamassa
Relação água/aglomerante	0,30; 0,35; 0,45; 0,60; 0,80	0,40; 0,55; 0,70
Teor de sílica ativa (%)	0; 5; 10; 15; 20	0; 10; 20
Idade de ensaio (dias) (Tempo de exposição CO ₂)	35; 56; 91; 126 (7); (28); (63); (98)	56; 91; 126 (28); (63); (98)

Fonte: (KULAKOWSKI, 2002)

Figura 6 - Planejamento da moldagem de corpos de prova de concreto e argamassa (sílica ativa)

		Concreto					Argamassa							
		Relação água/aglomerante					Relação água/aglomerante							
		0,30	0,35	0,45	0,60	0,80	0,30	0,35	0,40	0,45	0,55	0,60	0,70	0,80
sílica ativa (%)	0	2x		2x		2x			3x (5x)		3x (5x)		3x (5x)	
	5		2x		2x									
	10	2x		2x		2x			3x (5x)		3x (5x)		3x (5x)	
	15		2x		2x									
	20	2x		2x		2x			3x (5x)		3x (5x)		3x (5x)	

Obs.: Valores entre () referem-se ao número de repetições de corpos-de-prova para resistência à compressão em argamassas.

Fonte: (KULAKOWSKI, 2002)

Souza (2021), por sua vez, produziu concretos com adição de 10% em massa de sílica ativa e trabalhou com uma relação a/c fixada em 0,4. Seu traço de estudo com a adição de sílica ativa foi produzido a partir de um traço de concreto convencional de traço unitário 1:2,13:2,87:0,5.

Todos os trabalhos realizaram seus estudos utilizando o método de carbonatação acelerada e as informações das variáveis principais dos três estudos selecionados estão resumidas nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 - Características dos estudos selecionados para a sílica ativa

Pesquisador	Teor de adição	Teor de substituição	Carbonatação
Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017)	10%	10%	Acelerada
Kulakowski (2002)	0%, 5%, 10%, 15% e 20%	-	Acelerada
Souza (2021)	10%	-	Acelerada

Tabela 13 - Características gerais dos estudos selecionados para a sílica ativa

Pesquisador	Tipo material	Dimensão das amostras (cm)	Cura (dias)	Sazonamento	UR (%)	T (°C)	CO ₂ (%)
Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017)	Concreto	Cilíndricas 10x20	Câmara úmida 28 dias	20 dias	60 ± 0,5	-	5 ± 1
Kulakowski (2002)	Concreto e argamassa	Prismáticas 10x10x30 para concreto e 44x4x16 para argamassa	Câmara úmida 14 dias	-	70 ± 2	25 ± 1	5
Souza (2021)	Concreto	Prismáticas 10x10x40	Câmara úmida 28 dias	14 dias	65 ± 5	27 ± 2	3 ± 0,5

As medidas de profundidade de carbonatação foram realizadas por meio de indicador químico à base de fenolftaleína. Os resultados de coeficiente de carbonatação obtidos por Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017) e Souza (2021) estão resumidos na Tabela 14.

Tabela 14 - Coeficientes médios de carbonatação para a sílica ativa

Fonte	Relação a/c	Cura	Coeficiente Carbonatação Referência	Tipo adição	Tipo substituição	Coeficiente Carbonatação	Comparação com Concreto Referência (%)
Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017)	0,5	úmida	1,46	SA 10%	-	0,45	-69
				-	SA 10%	1,94	33
Souza (2021)	0,40	úmida	0,592	SA 10%	-	0,357	-40
Kulakowski (2002)	-	úmida	-	-	-	-	-

SA - Sílica Ativa

O resultado do coeficiente de carbonatação obtido por Kulakowski (2002) não está resumido na Tabela 14 porque em seu trabalho não foi apresentado um valor médio que represente todos os traços e as diferentes porcentagens de adição do seu programa experimental. Analisando estatisticamente os dados obtidos em sua pesquisa, Kulakowski (2002) afirma que, embora a contribuição da sílica ativa não seja significativa para a profundidade de carbonatação, observa-se para relações a/c acima de 0,70 um aumento da carbonatação em torno de 50%.

Kulakowski (2002) afirma que até a idade de 126 dias para as relações água/aglomerante de 0,30; 0,35 e 0,45 as profundidades de carbonatação, estatisticamente, são nulas. Nesta faixa de relação água/aglomerante as profundidades de carbonatação não ultrapassaram 2mm.

A influência na resistência à compressão e na sorvidade dos concretos produzidos por Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017) e Souza (2021) estão resumidos na Tabela 15.

Tabela 15 - Valores de resistência à compressão e absorção capilar para a sílica ativa

Fonte	Propriedade	Idade	Relação a/lig	Referência	Tipo adição	Tipo substituição	Valores obtidos	Comparação (%)
Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017)	Res. à Compressão (Mpa)	28 dias	0,5	55,08	SA 10%	-	70,00	27
				55,08	-	SA 10%	62,00	13
	Sorvidade ($g/cm^2 \cdot tempo^{0,5}$)	-	0,5	0,0052	SA 10%	-	0,0028	-46
				0,0052	-	SA 10%	0,0047	-10
Souza (2021)	Res. à Compressão (Mpa)	28 dias	0,4	49,78	SA 10%	-	53,40	7
	Sorvidade ($g/cm^2 \cdot tempo^{0,5}$)	-	0,4	0,0047	SA 10%	-	0,0045	-4
Kulakowski (2002)	Res. à Compressão (Mpa)	-	variável	-	-	-	-	-
	Sorvidade ($g/cm^2 \cdot tempo^{0,5}$)	-	variável	-	-	-	-	-

SA - Sílica Ativa

Kulakowski (2002) observou em seu programa experimental que houve aumento de resistência à compressão para adição de sílica ativa em todos os níveis de relação água/aglomerante, atingindo em média 10% de ganho na resistência à compressão com a adição de 10% de sílica ativa.

No que se refere à absorção em concretos, a análise estatística realizada por Kulakowski (2002) indica forte significância da adição de sílica ativa e da relação água/aglomerante na redução da taxa de absorção, ou seja, a diminuição da relação água/aglomerante e o aumento do teor de adição são positivos para a redução da absorção. Kulakowski (2002) constatou que o melhor custo/benefício está no teor de adição de 10% de sílica ativa, pois houve uma diminuição de cerca de 30% na absorção enquanto o aumento para 20% de adição proporcionou apenas uma redução de 9%.

3.3 INFLUÊNCIA DO METACAULIM NA CARBONATAÇÃO

Foram selecionados os dados dos trabalhos de Carmo e Portella (2008), Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017), Raisdorfer (2015) e Santos, Albuquerque e Ribeiro (2020).

Carmo e Portella (2008) analisaram a influência da adição de 8% de metacaulim na resistência à compressão do concreto moldando corpos de prova para análise nas idades de 7, 28 e 90 dias. Utilizaram o cimento Portland composto CP II - Z 32, a consistência foi fixada em 70 ± 1 mm e os traços dos concretos foram dosados pelo método do módulo de finura. A relação água/aglomerante dos concretos de

referência e do concreto com adição de metacaulim, bem como a dosagem e o abatimento do tronco de cone estão resumidos na Tabela 16.

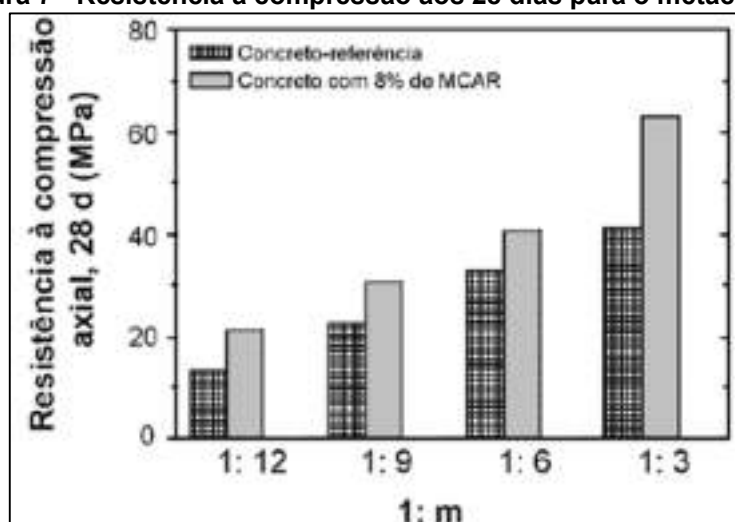
Carmo e Portella (2008) afirmam que os valores de resistência à compressão obtidos foram proporcionais ao tempo de cura e ao teor de adição mineral e inversamente proporcional à relação água/aglomerante. Os resultados obtidos para as idades de 28 e 90 dias estão representados nas Figuras 7 e 8.

Tabela 16 - Características principais dos concretos com metacaulim

Relação (a/aglomerante)	Abatimento (mm)	Dosagem (relação 1:m)
Concreto de Referência		
1,03	65	12
0,74	70	9
0,49	70	6
0,29	65	3
Concreto com 8% de metacaulim		
1,00	65	12
0,71	65	9
0,49	70	6
0,29	60	3

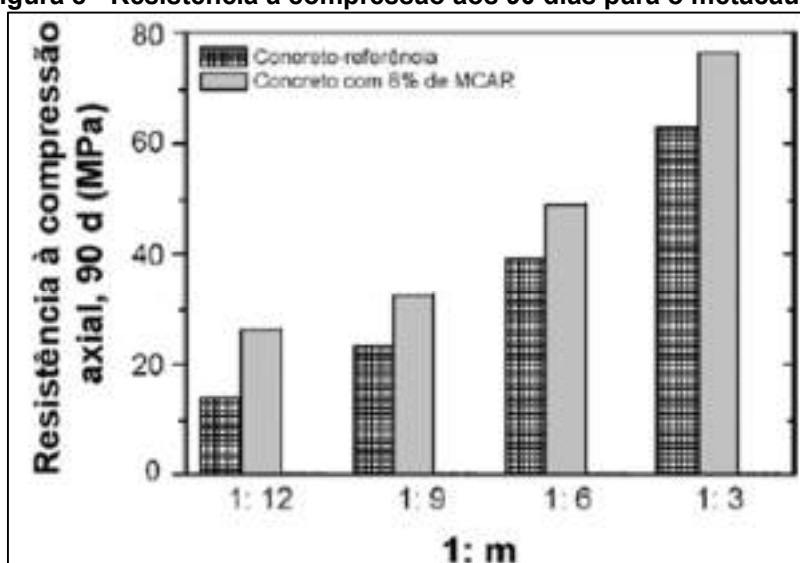
Fonte: adaptado de (CARMO e PORTELLA, 2008)

Figura 7 - Resistência à compressão aos 28 dias para o metacaulim



Fonte: (CARMO e PORTELLA, 2008)

Figura 8 - Resistência à compressão aos 90 dias para o metacaulim



Fonte: (CARMO e PORTELLA, 2008)

Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017) e Raisdorfer (2015) estudaram a influência do metacaulim como adição e como substituição parcial ao cimento na velocidade de carbonatação e sua relação com a absorção, relação água/aglomerante e resistência à compressão. Santos, Albuquerque e Ribeiro (2020) analisaram os resultados de carbonatação para adição de metacaulim à massa de cimento.

Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017) e Raisdorfer (2015) estudaram a influência do metacaulim em substituição parcial e em adição ao consumo de cimento em massa no teor de 10%; já Santos, Albuquerque e Ribeiro (2020) analisaram apenas em adição nos teores de 5%, 10% e 15%.

Todos os autores trabalharam com o método de carbonatação acelerada e as principais variáveis estão resumidas na Tabela 17 e 18.

Tabela 17 - Características dos estudos selecionados para o metacaulim

Pesquisador	Teor de adição	Teor de substituição	Carbonatação
Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017)	10%	10%	Acelerada
Raisdorfer (2015)	10%	10%	Acelerada
Santos, Albuquerque e Ribeiro (2020)	0%, 5%, 10% e 15%	-	Acelerada
Carmo e Portella (2008)	8%	-	-

Tabela 18 - Características gerais dos estudos selecionados para o metacaulim

Pesquisador	Tipo material	Dimensão das amostras (cm)	Cura (dias)	Sazonamento	UR (%)	T (°C)	CO ₂ (%)
Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017)	Concreto	Cilíndricas 10x20	Câmara úmida 28 dias	20 dias	60 ± 0,5	-	5 ± 1
Raisdorfer (2015)	Concreto	Cilíndricas 10x20	Câmara úmida 28 dias	21 dias	60 ± 0,5	40 ± 0,1	5 ± 1
Santos, Albuquerque e Ribeiro (2020)	Concreto	Prismáticas	Câmara úmida 28 dias	-	65 ± 5	29 ± 1	5 ± 0,5
Carmo e Portella (2008)	Concreto	-	-	-	-	-	-

Os resultados de resistência à carbonatação obtidos nos trabalhos de Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017) e Raisdorfer (2015) estão resumidos na Tabela 19 e resistência à compressão e sorvidade na Tabela 20; para Santos, Albuquerque e Ribeiro (2020) os dados de resistência à carbonatação, resumidos na tabela 19, foram calculados de acordo com os dados gráficos da Figura 9 . Para o trabalho de Santos, Albuquerque e Ribeiro (2020) estão representados graficamente nas Figuras 9 e 10 a profundidade de carbonatação para duas situações, corpos de prova secos em estufa por 24 horas após cura e corpos de prova saturados, nas Figuras 11 e 12, resistência à compressão e sorvidade.

Tabela 19 - Coeficientes médios de carbonatação para o metacaulim

Fonte	Relação a/lig	Cura	Coefficiente Carbonatação Referência	Tipo adição	Tipo substituição	Coefficiente Carbonatação	Comparação com Concreto Referência (%)
Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017)	0,5	úmida	1,46	MTC 10%	-	1,34	-8
				-	MTC 10%	1,93	32
Raisdorfer (2015)	0,5	úmida	1,46	MTC 10%	-	1,34	-8
				-	MTC 10%	1,93	32
Santos, Albuquerque e Ribeiro (2020)	0,6	úmida	1,37	MTC 5%	-	1,18	-19
				MTC 10%	-	1,18	-19
				MTC 15%	-	1,20	-18
Carmo e Portella (2008)	variável	-	-	-	-	-	-

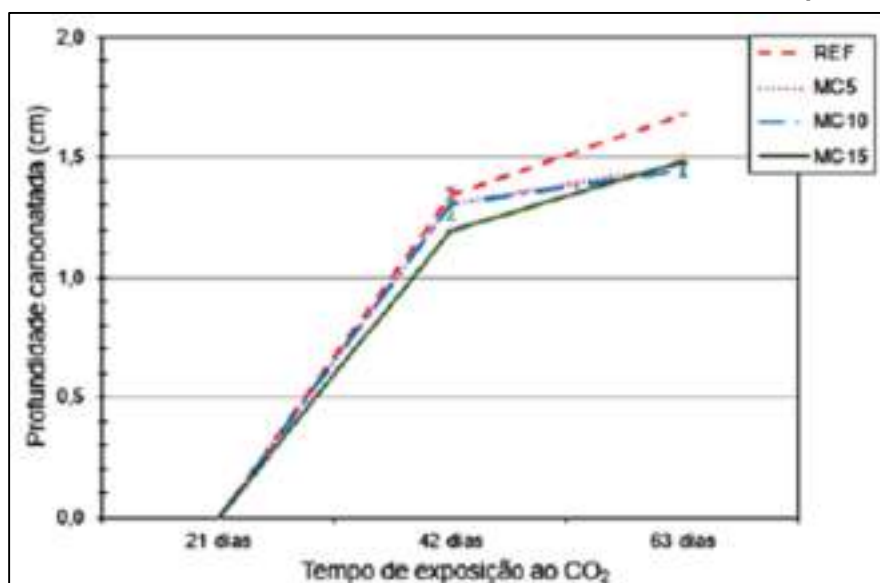
MTC - Metacaulim

Tabela 20 - Resistência à compressão e sorvidade para o metacaulim

Fonte	Propriedade	Idade	Relação ar/lig	Referência	Tipo adição	Tipo substituição	Valores obtidos	Comparação (%)
Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017)	Res. à Compressão (Mpa)	28 dias	0,5	55,00	MTC 10%	-	78,00	42
				55,00	-	MTC 10%	63,00	15
	Sorvidade (g/(cm ² tempo ^{0,5}))	-	0,5	0,0852	MTC 10%	-	0,0046	-12
				0,0852	-	MTC 10%	0,0053	2
Raisdorfer (2015)	Res. à Compressão (Mpa)	28 dias	0,5	55,00	MTC 10%	-	78,00	42
				55,00	-	MTC 10%	63,00	15
	Sorvidade (g/(cm ² tempo ^{0,5}))	-	0,5	0,0852	MTC 10%	-	0,0046	-12
				0,0852	-	MTC 10%	0,0053	2
Santos, Albuquerque e Ribeiro (2020)	Res. à Compressão (Mpa)	28 dias	0,6	38,00	MTC 5%	-	39,00	3
				38,00	MTC 10%	-	41,00	8
				38,00	MTC 15%	-	42,00	11
	Sorvidade (g/(cm ² tempo ^{0,5}))	28 dias	0,6	0,0192	MTC 5%	-	0,0175	-8
				0,0192	MTC 10%	-	0,0168	-13
				0,0192	MTC 15%	-	0,0156	-19
Carro e Portela (2008)	Res. à Compressão (Mpa)	Resultados dos ensaios apresentados nas Figuras 7 e 8.						
	Sorvidade (g/(cm ² tempo ^{0,5}))	Não foram realizados ensaios para essa propriedade.						

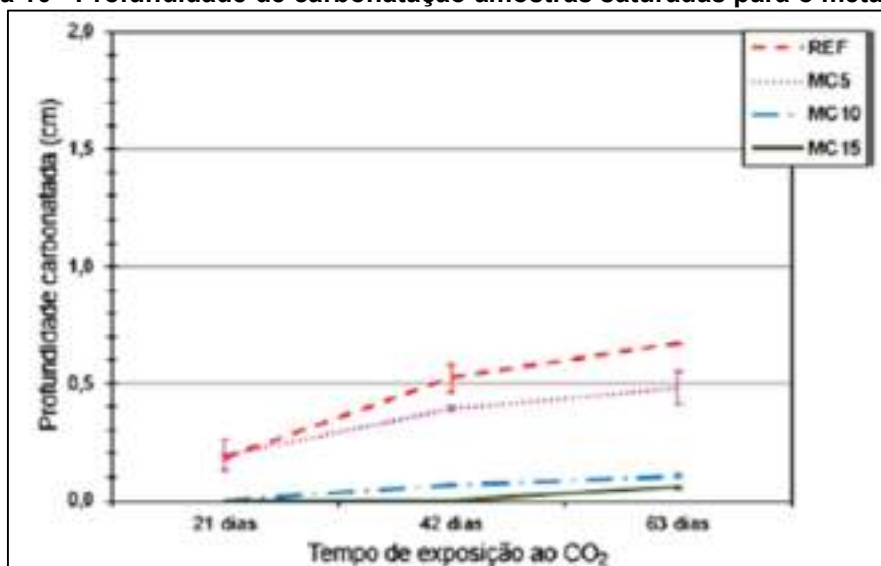
MTC - Metacaulim

Figura 9 - Profundidade de carbonatação amostras secas em estufa para o metacaulim



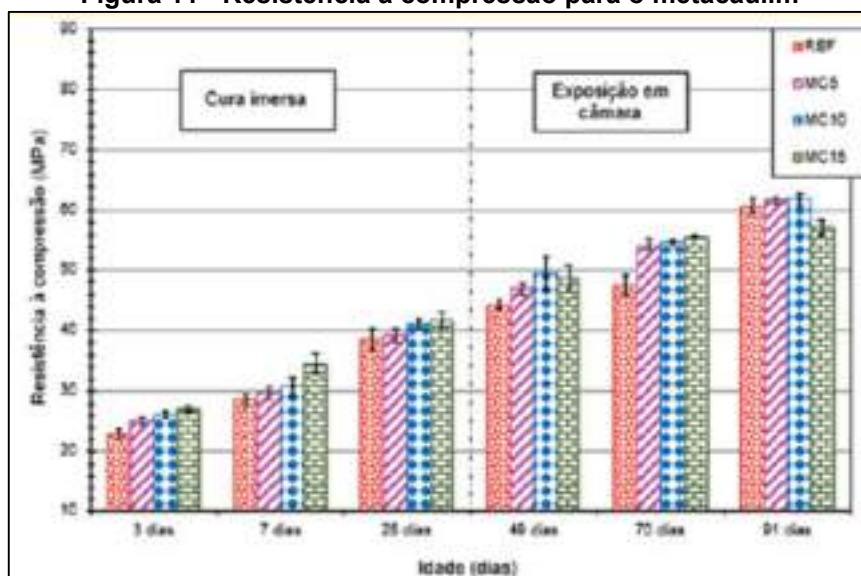
Fonte: (SANTOS, ALBUQUERQUE e RIBEIRO, 2020)

Figura 10 - Profundidade de carbonatação amostras saturadas para o metacaulim



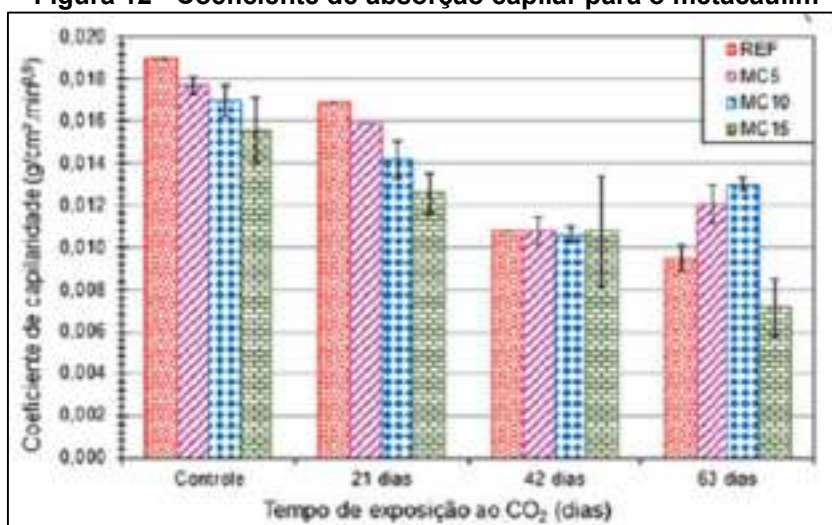
Fonte: (SANTOS, ALBUQUERQUE e RIBEIRO, 2020)

Figura 11 - Resistência à compressão para o metacaulim



Fonte: (SANTOS, ALBUQUERQUE e RIBEIRO, 2020)

Figura 12 - Coeficiente de absorção capilar para o metacaulim



Fonte: (SANTOS, ALBUQUERQUE e RIBEIRO, 2020)

3.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A pesquisa foi realizada por meio de uma revisão bibliográfica e os dados foram extraídos dos estudos selecionados. As buscas foram realizadas utilizando as bases de dados da SciELO, Google Acadêmico e Bibliotecas Digitais que atendiam às palavras chaves de busca relacionadas com a pesquisa.

A coleta e seleção dos dados buscou realizar uma pesquisa de natureza básica para compilar os dados obtidos pelos autores selecionados no que se refere à carbonatação. A busca principal foram os resultados de coeficientes de carbonatação, contudo, para auxiliar na compreensão da influência da cinza volante, da sílica ativa e do metacaulim foram observados também os resultados de resistência à compressão e absorção capilar.

Entre as adições minerais analisadas, a cinza volante, tanto no uso como adição quanto em substituição parcial ao cimento, apresentou os piores resultados, visto que todos os estudos realizados em diferentes condições e porcentagens encontraram resultados negativos para a resistência à carbonatação.

Para melhor visualização do exposto, a Tabela 21 apresenta um resumo com os resultados obtidos pelos trabalhos pesquisados. Pode-se observar que para a sílica ativa e o metacaulim empregados como adição ao cimento houve diminuição do coeficiente de carbonatação. Para justificar a tendência de diminuição da velocidade de carbonatação no caso de adição ao cimento, os autores afirmam que nessa

situação há maior reserva alcalina, produzindo um concreto menos permeável, dificultando a difusão do CO₂.

A cinza volante, quando comparada à sílica ativa e ao metacaulim, foi a que apresentou o pior desempenho com relação à carbonatação. A sílica ativa, por sua vez, apresentou-se como a adição mais indicada, pois apresentou os melhores resultados quando adicionada à massa de cimento e quando em substituição obteve resultados semelhantes aos do metacaulim.

Tabela 21 - Resumo dos coeficientes de carbonatação dos estudos selecionados

Fonte	Relação a/lig	Cura	Coefficiente Carbonatação Referência	Tipo adição	Tipo substituição	Coefficiente Carbonatação (mm.semana ^{-0,5})	Comparação com Concreto Referência (%)
Raisdorfer (2015)	0,5	úmida	1,46	CV 10%	-	2,38	63
				CV 30%	-	2,80	92
				-	CV10%	2,21	51
				-	CV 30%	3,17	117
Ferreira (2013)	0,40	úmida	1,92	-	CV 25%	3,13	63
		seca	3,19	-	CV 25%	4,97	56
	0,55	úmida	4,46	-	CV 25%	6,59	48
		seca	5,52	-	CV 25%	8,44	53
	0,70	úmida	5,69	-	CV 25%	8,59	51
		seca	6,66	-	CV 25%	12,02	80
Abreu (2004)	0,44	úmida	-	-	CV 0%, 15%, 30% e 45%	-	-
	0,48		-	-	CV 0%, 15%, 30% e 45%	-	-
	0,55		-	-	CV 0%, 15%, 30% e 45%	-	-
	0,65		-	-	CV 0%, 15%, 30% e 45%	-	-
Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017)	0,5	úmida	1,46	SA 10%	-	0,45	-69
				-	SA 10%	1,94	33
Souza (2021)	0,40	úmida	0,592	SA 10%	-	0,357	-40
Kulakowski (2002)	-	úmida	-	-	-	-	-
Medeiros, Raisdorfer e Filho (2017)	0,5	úmida	1,46	MTC 10%	-	1,34	-8
				-	MTC 10%	1,93	32
Raisdorfer (2015)	0,5	úmida	1,46	MTC 10%	-	1,34	-8
				-	MTC 10%	1,93	32
Santos, Albuquerque e Ribeiro (2020)	0,6	úmida	1,37	MTC 5%	-	1,18	-19
				MTC 10%	-	1,18	-19
				MTC 15%	-	1,20	-18
Carmo e Portella (2008)	variável	-	-	-	-	-	-

CV - Cinza Volante, SA - Sílica Ativa, MTC - Metacaulim

No que se refere à absorção de água por capilaridade e à resistência à compressão, foi possível observar de modo geral, que as adições minerais agiram positivamente na melhoria dessas propriedades dos concretos produzidos ao refinarem a estrutura de poros do concreto e densificando a sua macroestrutura.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste trabalho permitiu verificar a influência de diferentes tipos de adições minerais ao comportamento do concreto no que se refere à carbonatação, absorção de água e resistência à compressão. Foram estudados, por meio de uma revisão da literatura e dos resultados de trabalhos desenvolvidos anteriormente, como se comportaram concretos desenvolvidos com a adição de cinza volante, sílica ativa e metacaulim, tanto em adição ao cimento como em substituição parcial em diferentes condições de ensaio, porcentagens e dosagens.

Deve-se ressaltar que todos os concretos produzidos com substituição à massa de cimento apresentaram resultados negativos para a resistência à carbonatação e os concretos produzidos com adição apresentaram resultados favoráveis, com exceção da cinza volante que apresentou resultados negativos em todas as situações analisadas.

Dada a importância do tema, torna-se necessário o desenvolvimento de estudos que visem padronizar as variáveis, procedimentos e parâmetros de ensaio envolvendo adições minerais, pois observa-se variabilidade nos métodos adotados nas pesquisas analisadas, dificultando a extrapolação dos resultados para o dia a dia. A pesquisa e padronização dos resultados nas tabelas apresentadas foi dificultada por essa variabilidade de métodos e apresentação dos resultados.

Assim sendo, essa dificuldade de padronização permitiu a criação de sugestões para trabalhos futuros seguindo essa linha de pesquisa. Apresentam-se algumas sugestões a seguir:

- Estudar uma faixa ótima de adição que proporcione ganhos na resistência à compressão e absorção capilar;
- Padronização da apresentação de dados para comparação com trabalhos já desenvolvidos;
- Analisar diversas porcentagens de adição e substituição de adições minerais para identificar em quais faixas há melhores comportamentos com relação à resistência à carbonatação.

REFERÊNCIAS

- ABREU, Aguida G. D. **Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante**. Tese (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 212. 2004.
- ALTHEMAN, D. *et al.* Avaliação de cinza volante de carvão mineral em matrizes cimentícias. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 6, p. 1320-1337, nov. 2017.
- AMARAL, Marcela; MACIOSKI, Gustavo; MEDEIROS, Marcelo H. F. D. Atividade pozolânica da sílica ativa: análise em pastas cimentícias com diferentes teores de substituição. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 26, n. 3, out. 2021.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM - **C1069: Standard Test Method for Specific Surface Area of Alumina or Quartz by Nitrogen Adsorption**. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653: Materiais Pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12826: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação do índice de finura por meio de peneirador aerodinâmico**. Rio de Janeiro. 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956-1: Sílica Ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956-2: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 2: Ensaio químicos**. Rio de Janeiro. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956-3: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 3: Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 7 dias**. Rio de Janeiro. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956-4: Sílica ativa para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 4: Determinação da finura por meio da peneira 45 µm**. Rio de Janeiro. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14656: Cimento Portland e matérias-primas - Análise química por espectrometria de raios X - Método de ensaio**. Rio de Janeiro. 2001.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-2: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 2: Determinação do índice de desempenho com cimento aos sete dias.** Rio de Janeiro. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15894-3: Metacaulim para uso com cimento Portland em concreto, argamassa e pasta Parte 3: Determinação da finura por meio da peneira 45 μm .** Rio de Janeiro. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado.** Rio de Janeiro. 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5751: Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias.** Rio de Janeiro. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias.** Rio de Janeiro. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 11-2: Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria Parte 2: Método ABNT .** Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 16: Cimento Portland - Análise química - Determinação de anidrido sulfúrico.** Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 17: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama.** Rio de Janeiro. 2012.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 22: Cimento Portland com adições de materiais pozolânicos - Análise química - Método de arbitragem.** Rio de Janeiro. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 24: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de umidade.** Rio de Janeiro. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 25: Materiais pozolânicos - Determinação do teor de álcalis disponíveis**. Rio de Janeiro. 2003.

CARMO, J. B. D.; PORTELLA, K. F. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. **Cerâmica**, v. 54, n. 331, p. 309-318, set. 2008.

FARIAS, Gabriela C. D.; SILVA, Daiane D. S. D. Análise da Evolução da Profundidade de Carbonatação em Estruturas de Concreto ao Longo do Tempo. **Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil UNESC**, p. 1-19, 2019.

FERREIRA, Murilo B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás. Goiânia, p. 197. 2013.

FIGUEIREDO, C. P. *et al.* O papel do metacaulim na proteção dos concretos contra a ação deletéria de cloretos. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 4, p. 685-708, ago. 2014.

FRAGA, Yuri S. B. *et al.* Efeito da ultrasonificação da sílica ativa e da nanossílica coloidal em pastas de cimento. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, p. 1-16, 2020.

FRAGA, Yuri S. B.; SOARES, Lucas M. G.; CAPUZZO, Valdirene M. S. Influência da densificação da sílica ativa nas propriedades de materiais cimentícios. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 229-242, set. 2021.

GIL, Antonio C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6ª. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOMES, Nivaldo D. A. **Estruturas de Concreto Armado em Ambiente Urbano: Avaliação da Carbonatação à Luz das Recomendações da NBR 6118:2003**. Dissertação (Mestrado em Ciências Exatas e da Terra) - Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, p. 112. 2006.

HELENE, Paulo R. L.; CUNHA, Ana Caria Q. D. **Despassivação das Armaduras de Concreto por Ação da Carbonatação**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/283. São Paulo: EPUSP, p. 13 + anexos. 2001.

HOPPE FILHO, Juarez *et al.* Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-X (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 3, p. 18, Agosto 2017.

HOPPE FILHO, Juarez. **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismo de hidratação, microestrutura e carbonatação de concreto**. Tese (Doutorado) - Escola politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, p. 247. 2008.

ISAIA, Geraldo Cechella; GASTALDINI, Antonio Luiz Guerra. Perspectivas ambientais e econômicas do concreto com altos teores de adições minerais: um estudo de caso. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, p. 19-30, 17 abr. 2004.

KULAKOWSKI, Marlova P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas com adição de sílica ativa**. Tese (Escola de Engenharia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) - Universidade federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 199. 2002.

MEDEIROS, Marcelo H. F. D.; RAISDORFER, Janderson W.; FILHO, Juarez H. Influência da sílica ativa e do metacaulim na velocidade de carbonatação do concreto: relação com resistência, absorção e relação a/c. **Ambiente Construído**, v. 17, n. 4, p. 125-139, dez 2017.

NARDINO, Cladilson *et al.* Previsão de Vida Útil por Modelos Matemáticos e Carbonatação Natural. **Revista Técnico-Científica**, v. 0, n. 4SPPC132, p. 300-311, 24 Setembro 2019.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto**. 2ª. ed. São Paulo: Pini, 1997. 828 p.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. 5ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PAULETTI, Cristiane; POSSAN, Edna; DAL MOLIN, Denise C. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 7-20, out./dez. 2007.

PIRES, P. F. **Estudo da carbonatação avançada em concretos contendo adições minerais**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de Goiás. Goiânia, p. 141. 2016.

PRODANOV, Cleber C.; FREITAS, Ernani C. D. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2ª. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

RAISDORFER, Janderson W. **Influência da Adição ou Substituição de Adições Minerais ao Cimento Portland: Efeitos na Carbonatação, Absorção Capilar e Resistividade de Concretos**. Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil. Curitiba, p. 151. 2015.

ROCHA, Guilherme G. N. **Caracterização microestrutural do metacaulim de alta reatividade**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas - Universidade de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2005.

RODRIGUES, Dardania A. E. **Efeitos da adição de metacaulim na absorção capilar e profundidade de carbonatação de concretos**. Dissertação (Mestrado) -

Curso de pós-Graduação em Engenharia Química - Escola de Engenharia da UFMG. Belo Horizonte. 2014.

RODRIGUES, Dardania Aparecida E.; GOMES, Abdias M.; LINS, Vanessa D. F. C. Efeito da adição de metacaulim na absorção capilar e carbonatação do concreto. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 22, Jan. 2017.

SABEDOT, Sydney *et al.* **Caracterização e aproveitamento de cinzas da combustão de carvão mineral geradas em usinas termelétricas**. Anais do III Congresso de Carvão Mineral. Gramado-RS, p. 15. 2011.

SABEDOT, Sydney *et al.* TECNOLOGIA MINERAL PARA CINZAS DA COMBUSTÃO DE CARVÃO MINERAL DA REGIÃO CARBONÍFERA DO BAIXO JACUÍ-RS. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais, e Mineração**, São Paulo, v. 12, n. 3, p. 244-250, jul./set. 2015.

SANTOS, B. S.; ALBUQUERQUE, D. D. M.; RIBEIRO, D. V. Efeito da adição do metacaulim na carbonatação de concretos de cimento Portland. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 13, n. 1, p. 1-18, mar. 2020.

SILVA, Matheus *et al.* **Avanço da Carbonatação em Concretos para idades Iniciais**. II Simpósio Brasileiro sobre Reabilitação das Construções - SBREB II. Fortaleza: 2019. p. 8.

SOUSA, Matheus I. C.; RÉGO, João H. D. S. Hidratação de pastas de cimento ternárias com metacaulim e nanossílica nas idades iniciais. **Revista MATÉRIA**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 4, p. 1-13, dez. 2020.

SOUZA, Ana Luiza R. D. **Efeitos da mistura de sílica ativa e nanossílica na durabilidade do concreto**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília. Brasília, p. 171. 2021.

TUUTTI, Kyösti. **Corrosion of Steel in Concrete**. Swedish Cement and Concrete, Research Institute. Stockholm. 1982.