



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO FÍSICO E MECÂNICO DE
CONCRETOS COM DIFERENTES MATERIAIS POZOLÂNICOS COM
ENFOQUE NA RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO**

Augusto Magri Bresolin

Lajeado, Julho de 2021.

Augusto Magri Bresolin

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS
COM DIFERENTES MATERIAIS POZOLÂNICOS COM ENFOQUE NA
RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO**

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari Univates, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientadora: Ma. Débora Pedroso Righi Köhler

Lajeado, Julho de 2021

Augusto Magri Bresolin

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE CONCRETOS
COM DIFERENTES MATERIAIS POZOLÂNICOS COM ENFOQUE NA
RESISTÊNCIA À CARBONATAÇÃO**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada no componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Profa. Ma. Débora Pedroso Righi Köhler - Orientadora
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Profa. Ma. Rebeca Jéssica Schmitz
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Sra. Júlia Giordani Berton - Convidada
Universidade do Vale do Taquari - Univates

Lajeado, 01 de Julho de 2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Adilar e Ivone, por estarem sempre presentes, me incentivando e apoiando em todos os momentos, sem eles a realização deste sonho não seria possível. Sou infinitamente grato por proporcionarem esta oportunidade.

Agradeço também a minha namorada Ellen, que além de auxiliar no desenvolvimento deste trabalho, sempre compreendeu a demanda de tempo necessária para a realização deste, me motivando e ficando sempre ao meu lado ao longo desta caminhada.

Ao meu irmão Gustavo, por também me apoiar e auxiliar no desenvolvimento deste trabalho, contribuindo com o seu conhecimento sobre a área de pesquisa.

Agradeço à minha orientadora, a Profa. Ma. Débora Pedroso Righi Köhler, por sempre me ajudar e facilitar a realização deste trabalho, acreditando na minha capacidade para a execução desta pesquisa, sem a sua contribuição não teria sido possível alcançar os objetivos propostos para este estudo.

Agradeço também a todos os professores pelos ensinamentos compartilhados ao longo dos anos e, aos colegas e amigos que fizeram parte desta jornada desde o seu início, todos contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este estudo teve como objetivo avaliar as características físicas e mecânicas de concretos com a substituição do cimento por diferentes materiais pozolânicos, verificando também a resistência à carbonatação, por meio de ensaio de carbonatação acelerada. Para a realização desta pesquisa, a dosagem dos concretos foi realizada pelo método ABCP, sendo moldados 15 corpos de prova para cada traço, sendo 4 no total, divididos em traço referência (sem nenhuma adição) na proporção 1;2,53;3,54;0,65, e outros 3 traços com a substituição de 10% de cimento por sílica ativa, metacaulim e cinza volante, respectivamente, todos na proporção 0,90;0,10;2,53;3,54;0,65, com abatimento resultante de 100 mm para todos os traços. Para a validação dos resultados, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão nas idades de 7, 14 e 56 dias, além do ensaio de absorção por capilaridade por 72 horas, para as idades de 28 dias com cura em câmara úmida e 63 dias, dos quais 7 dias ficaram em cura úmida e 56 dias carbonatando. Para a carbonatação, os corpos de prova foram mantidos nas condições do ensaio, em câmara de carbonatação acelerada com 6% de concentração de CO₂ por 56 dias, sendo a profundidade carbonatada medida por meio de indicador de pH. Os resultados obtidos para todos os ensaios foram satisfatórios, sendo possível estabelecer uma relação entre os parâmetros de absorção por capilaridade e resistência à compressão, com a profundidade de carbonatação. Os traços com adição de metacaulim e cinza volante apresentaram os resultados mais promissores, com as maiores resistências à compressão, menores índices de absorção, além de apresentarem uma redução na profundidade de carbonatação em relação ao concreto referência. Entretanto, o traço com a adição de sílica ativa reduziu a resistência à compressão e a absorção por capilaridade em relação ao traço de referência, diminuindo também a resistência do concreto frente à carbonatação, apresentando a maior profundidade carbonatada dentre todos os traços estudados.

Palavras-chave: Carbonatação; Carbonatação acelerada; Concentração de CO₂; Câmara de carbonatação; Pozolanas.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the physical and mechanical characteristics of the concrete with the partial replacement of cement by different pozzolanic materials, also verifying the resistance to carbonation, through an accelerated carbonation test. To carry out this work, the dosage of concrete was executed by the ABCP method, with 15 concrete test samples being molded for each recipe, being 4 in total, divided into the reference recipe (without any addition) in the proportion of 1;2.53;3, 54;0.65, and other 3 recipes with the replacement of 10% of cement by silica fume, metakaolin and fly ash, respectively, all in the proportion of 0.90;0.10;2.53;3.54;0.65, with the resulting slump of 100mm for all recipes. To validate the results, the test samples were submitted to the compressive strength test at the ages of 7, 14 and 56 days, as well as the absorption by capillarity test for 72 hours, for the ages of 28 days being cured in a humid chamber, and 63 days, of which 7 days the healing process occurred in the humid chamber, and for the remaining 56 days, the samples were carbonated. For carbonation purposes, the concrete samples were kept under the conditions of the test, in an accelerated carbonation chamber with 6% concentration of CO₂ for 56 days, and the carbonated depth was measured with a pH indicator. The results obtained for all tests were satisfying, being possible to establish a link between the parameters of capillarity absorption and compressive strength, with the carbonation depth. The concrete recipes with the addition of metakaolin and fly ash showed the most promising results, with the highest compressive strength, lowest absorption indices, as well as being able to reduce the carbonation depth when compared to the reference concrete. However, the recipe with the addition of silica fume reduced both the compressive strength and capillarity absorption when compared to the reference recipe, but it also decreased the strength of the concrete against carbonation, resulting in the concrete with the greatest carbonated depth amongst all of the studied concrete recipes.

Palavras-chave: Carbonation; Accelerated carbonation ; Concentration of CO₂; Carbonation chamber; Pozzolanic materials.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Carbonatação do Hidróxido de Cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).....	26
Figura 02 - Fluxograma dos fatores que influenciam a carbonatação.....	28
Figura 03 - Ensaio de carbonatação acelerado.....	35
Figura 04 - Fluxograma da estratégia de pesquisa.....	44
Figura 05 - Concreto finalizado e verificação do teor de argamassa.....	58
Figura 06 - Ensaio de abatimento do tronco de cone do concreto.....	59
Figura 07 - Corpos de prova concretados.....	60
Figura 08 - Ensaio de resistência à compressão.....	61
Figura 09 - Ensaio de absorção por capilaridade.....	62
Figura 10 - Medição da altura de absorção de água.....	63
Figura 11 - Câmara de carbonatação acelerada.....	65
Figura 12 - Corpos de prova posicionados na câmara de carbonatação.....	66
Figura 13 - Leitura do termo higrômetro.....	67
Figura 14 - Solução de ácido sulfúrico e bicarbonato de sódio.....	68
Figura 15 - Preparação da solução de ácido sulfúrico e bicarbonato de sódio.....	69
Figura 16 - Reação entre a solução de ácido sulfúrico e bicarbonato de sódio.....	70
Figura 17 - Corpos de prova carbonatados.....	71
Figura 18 - Altura interna de água traço referência.....	79
Figura 19 - Altura interna de água traço sílica ativa.....	80
Figura 20 - Altura interna de água traço metacaulim.....	80

Figura 21 - Altura interna de água traço cinza volante.....	80
Figura 22 - Profundidade de carbonatação traço referência.....	84
Figura 23 - Profundidade de carbonatação traço sílica ativa.....	85
Figura 24 - Profundidade de carbonatação traço metacaulim.....	85
Figura 25 - Profundidade de carbonatação traço cinza volante.....	85

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 - Profundidade de carbonatação pelo tempo de exposição com base no tipo de cimento.....	39
Gráfico 02 - Profundidade de carbonatação de concretos com substituição e adição de teores de materiais pozolânicos.....	41
Gráfico 03 - Curva granulométrica do agregado graúdo brita 1.....	46
Gráfico 04 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	48
Gráfico 05 - Curva de Abrams - Relação do fator água/cimento com a resistência do concreto aos 28 dias.....	50
Gráfico 06 - Resistência à compressão dos corpos de prova de concreto.....	73
Gráfico 07 - Absorção de água por capilaridade aos 28 dias.....	75
Gráfico 08 - Absorção de água por capilaridade aos 63 dias.....	77
Gráfico 09 - Coeficiente de sorvidade dos concretos estudados.....	78
Gráfico 10 - Profundidade de carbonatação dos concretos.....	82
Gráfico 11 - Absorção por capilaridade x Profundidade de carbonatação.....	86

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 - Classes de agressividade ambiental.....	20
Quadro 02 - Processos, mecanismos e sintomas de degradação do concreto armado.....	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Relações entre a classe de agressividade e o concreto.....	21
Tabela 02 - Cobrimento mínimo das estruturas de concreto armado em correspondência com a classe de agressividade ambiental.....	22
Tabela 03 - Concentração média de CO ₂ com relação ao ambiente.....	29
Tabela 04 - Granulometria do agregado graúdo brita 1.....	45
Tabela 05 - Granulometria agregado miúdo.....	47
Tabela 06 - Consumo de água estimado (L/m ³).....	51
Tabela 07 - Volume agregado graúdo por metro cúbico de concreto.....	52
Tabela 08 - Consumo de materiais por metro cúbico de concreto para os diferentes traços....	55
Tabela 09 - Quantidade de corpos de prova por traço e por ensaio.....	56
Tabela 10 - Quantidade de materiais para a fabricação do concreto por traço.....	56
Tabela 11 - Altura interna de absorção de água.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

°C	Graus <i>Celsius</i>
a/c	Água-cimento
a/agl	Água-aglomerante
ABCP	Associação Brasileira de Cimento <i>Portland</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i> - Instituto Americano de Concreto
ARI	Alta Resistência Inicial
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
cm	centímetros
CO ₂	Dióxido de carbono
CORSAN	Companhia Riograndense de Saneamento
CP	Cimento <i>Portland</i>
Cps	Corpos de prova
CP V - ARI	Cimento <i>Portland</i> classe cinco de alta resistência inicial
H ₂ O	Água
H ₂ S	Ácido Sulfúrico
Kg	Quilograma
Kg/m ³	Quilograma por metro cúbico

KOH	Hidróxido de Potássio
LATEC	Laboratório de Tecnologia da Construção
L/m ³	Litro por metro cúbico
m ³	metro cúbico
ml	mililitro
mm	milímetro
MPa	Megapascal
NaOH	Hidróxido de Sódio
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NM	Norma do Mercosul
pH	Potencial hidrogeniônico
PVC	Policloreto de vinila
SO ₂	Dióxido de Enxofre

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo geral	15
1.1.2 Objetivos específicos	15
1.2 Justificativa da pesquisa	15
1.3 Estrutura do trabalho	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado	18
2.2 Mecanismos mais comuns de manifestação patológica	23
2.2.1 Carbonatação	25
2.2.1.1 Concentração de CO ₂	28
2.2.1.2 Difusão	30
2.2.1.3 Temperatura	30
2.2.1.4 Umidade Relativa	31
2.2.1.5 Permeabilidade	32
2.3 Métodos de medir a carbonatação	33
2.3.1 Ensaio de carbonatação natural	33
2.3.2 Ensaio de carbonatação acelerado	34
2.3.3 Medição da profundidade de carbonatação	36
2.4 Uso de materiais pozolânicos nas misturas de concreto	37
2.5 Estudos referentes ao uso de pozolanas em combate a frente de carbonatação	38
3 MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 Estratégia de Pesquisa	43
3.1.1 Variáveis Estudadas	44
3.2 Materiais	45
3.2.1 Cimento	45

3.2.2 Agregado Graúdo	45
3.2.3 Agregado Miúdo	46
3.2.4 Água	48
3.2.5 Sílica Ativa	48
3.2.6 Cinza Volante	49
3.2.7 Metacaulim	49
3.3 Estudo de dosagem do Concreto	49
3.4 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova	55
3.5 Resistência à Compressão	60
3.6 Absorção de Água por Capilaridade	61
3.7 Carbonatação Acelerada	64
3.7.1 Câmara de Carbonatação Acelerada	64
3.7.2 Ensaio de Carbonatação Acelerado	65
3.7.3 Medição da Profundidade de Carbonatação	70
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
4.1 Resistência à Compressão do Concreto	72
4.2 Absorção de Água por Capilaridade do Concreto	75
4.2.1 Absorção de Água por Capilaridade aos 28 dias de idade	75
4.2.2 Absorção de Água por capilaridade aos 63 dias de idade	76
4.2.3 Altura de Absorção de Água	78
4.3 Resistência à Carbonatação	81
4.4 Absorção por Capilaridade x Carbonatação	86
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	88
REFERÊNCIAS	91
APÊNDICE	98

1 INTRODUÇÃO

O concreto armado é um dos materiais mais utilizados na construção de edifícios em todo o mundo, o que faz com que estudos sobre esse material sejam cada vez mais importantes. Uma vez que o concreto é suscetível a manifestações patológicas que podem comprometer a segurança e durabilidade da estrutura, a carbonatação é considerada um dos fenômenos mais perigosos devido aos danos causados ao concreto, bem como, ser a principal responsável pela corrosão das armaduras.

A carbonatação, conforme Pauletti (2009) e Neville (2016), pode ser definida como um processo físico-químico de degradação da estrutura, ocorrendo por meio da entrada de agentes agressivos no concreto através dos poros presentes neste material, especialmente o gás carbônico (CO_2). Este reage diretamente com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e resulta na formação do carbonato de cálcio (CaCO_3), reduzindo a alcalinidade interna do concreto, fazendo com que a película passivadora que envolve a armadura seja danificada, causando a corrosão do aço. Além disso, a velocidade com que esse fenômeno ocorre irá depender diretamente da concentração de CO_2 presente na atmosfera, bem como da quantidade, tamanho e conexão dos poros do concreto, que podem reduzir ou acelerar a difusão desse gás no interior da estrutura.

Segundo Cascudo e Carasek (2011) e Ferreira (2013), o concreto de cobrimento apresenta grande importância na proteção contra a entrada de agentes agressivos na estrutura, uma vez que esse processo ocorre do meio externo para o interior da estrutura, sendo indispensável a sua execução com materiais de alta qualidade, buscando um concreto forte,

com baixos índices de permeabilidade e porosidade. Pauletti (2009) ressalta que a carbonatação, ao longo da vida útil da estrutura, não pode atingir uma profundidade superior à espessura do cobrimento, pois isso resultaria no processo de corrosão da armadura.

Desta forma, em meio a necessidade de aprimorar as características do concreto armado de modo que seja possível aumentar sua durabilidade e vida útil, estudos com a adição de diferentes materiais pozolânicos na mistura do concreto vêm sendo desenvolvidos. Eles têm o objetivo de verificar o comportamento deste material em relação a resistência mecânica, permeabilidade e resistência à penetração de agentes agressivos, além de ser ambientalmente correto, uma vez que reduz o descarte impróprio destes minerais.

De acordo com Neville e Brooks (2013) e Mehta e Monteiro (2014), as pozolanas, quando adicionadas ao concreto, fazem com que suas características físicas e químicas sejam melhoradas, aumentando a resistência à compressão e reduzindo a porosidade e permeabilidade, o que, por consequência, aumenta a resistência deste material contra os ataques de agentes agressivos, dificultando o processo de carbonatação. Por outro lado, Cascudo e Carasek (2011) citam que os materiais pozolânicos, dependendo dos teores adicionados, podem ser prejudiciais para o concreto, uma vez que, para formar mais cristais que aumentam a resistência, grande parte do hidróxido de cálcio presente na estrutura é consumido, diminuindo a reserva alcalina e resultando em um processo de carbonatação mais acelerado.

Por fim, em meio a este cenário, esta pesquisa visa estudar o comportamento do concreto frente à carbonatação, com a substituição de teores de cimento por diferentes materiais pozolânicos, utilizando para este estudo a sílica ativa, metacaulim e cinza volante. O objetivo é estabelecer um equilíbrio na mistura desses materiais no concreto, de modo que sejam benéficos tanto para a resistência mecânica e permeabilidade, quanto para a resistência contra o fenômeno de carbonatação.

1.1 Objetivos

A seguir são apresentados os objetivos geral e específicos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o comportamento de concretos com a substituição de teores de cimento por diferentes materiais pozolânicos, verificando a resistência do material frente à carbonatação, por meio de ensaio de carbonatação acelerado.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa estão elencados a seguir.

- a) Avaliar a profundidade de carbonatação em concretos com adição de diferentes materiais pozolânicos, por meio de ensaio de carbonatação acelerado;
- b) Avaliar a resistência à compressão dos concretos com diferentes materiais pozolânicos;
- c) Avaliar a permeabilidade dos concretos com diferentes adições pozolânicas;
- d) Verificar a relação entre as características mecânicas dos concretos com adições de materiais pozolânicos, com a resistência do concreto frente à carbonatação.

1.2 Justificativa da pesquisa

De acordo com Possan (2010), o fator durabilidade das estruturas está se tornando cada vez mais importante na construção civil a nível mundial, buscando desde a fase de projeto, inovações técnicas que possibilitem ampliar a vida útil das estruturas de concreto armado, uma vez que manifestações patológicas, principalmente relacionadas com a corrosão da armadura, estão se tornando cada vez mais comuns. Além disso, Mehta e Monteiro (2014) ressaltam a importância dessas inovações, afirmando que os custos de reparos e reformas em edificações ao longo de sua vida útil, têm se tornado mais onerosos que os custos para a construção da obra.

Segundo Kulakowski (2002) e Pauletti (2009), a carbonatação é um dos principais processos de degradação que provocam a corrosão das armaduras, ocorrendo em qualquer ambiente em que o CO_2 esteja presente na atmosfera, mesmo em ambientes rurais, onde a concentração é mínima, sendo mais agressivo conforme a concentração desse gás se eleva. O mecanismo da carbonatação, conforme Neville (2016), é um processo que ocorre quando o

CO₂ do ambiente penetra na estrutura por meio dos poros, reduzindo o pH do concreto, causando a despassivação da armadura, que resulta na corrosão do aço.

Como forma de medir e estudar o fenômeno da carbonatação, Possan (2004) e Pauletti (2009) citam que podem ser realizados ensaios naturais e acelerados, priorizando a execução de ensaios acelerados, devido ao tempo reduzido e a possibilidade de controlar os fatores ambientais, como temperatura, umidade relativa e concentração de CO₂, proporcionando resultados confiáveis. Porém, salientam que não existem padrões e normas para definir parâmetros para os ensaios, o que faz com que a diversificação de ambientes de ensaios acelerados sejam infinitas, tornando muito complexa a comparação entre os resultados.

Mehta e Monteiro (2014) complementam que a carbonatação é mais acelerada e profunda em concretos que apresentam maior permeabilidade e porosidade, além de menor resistência mecânica, ficando evidente a necessidade de aprimorar essas características do concreto. Mesmo a NBR 6118 (ABNT, 2014) definindo parâmetros mínimos de espessura de cobertura, classes de resistência e relação água/cimento (a/c) com base nas classes de agressividade de cada ambiente, ainda são necessários novos estudos com diferentes materiais, como as pozolanas, buscando novas alternativas para tornar o concreto mais resistente.

Cascudo e Carasek (2011) citam que as adições pozolânicas vêm sendo cada vez mais utilizadas na construção civil, pois além de proporcionarem melhores características estruturais ao concreto, o descarte impróprio destes resíduos é reduzido, diminuindo também o consumo de cimento, atribuindo características sustentáveis ao concreto. Além disso, Mehta e Monteiro (2014) ressaltam que os materiais pozolânicos, quando adicionados na mistura do concreto, aumentam a resistência à compressão, além de reduzir os índices de vazios da estrutura, por serem materiais mais finos que o cimento, reduzindo a porosidade e permeabilidade do concreto, elevando a resistência à carbonatação.

Contudo, autores como Kulakowski (2002), Hoppe Filho (2008) e Possan (2010) perceberam em suas pesquisas que, dependendo dos teores de pozolanas adicionadas ao concreto e da relação a/c, o mecanismo de carbonatação se torna mais acelerado, apresentando

também maiores profundidades, devido à redução da concentração de hidróxido de cálcio e alcalinidade gerada por essas adições.

Desta forma, é possível perceber a necessidade de encontrar um equilíbrio nos teores das adições pozolânicas no concreto, com o objetivo de aumentar a resistência desse material frente à carbonatação, uma vez que já é conhecido que as pozolanas melhoram outras características do concreto, como a resistência à compressão e permeabilidade, propiciando maior viabilidade técnica na utilização destes materiais, de modo que não prejudiquem a vida útil da estrutura.

1.3 Estrutura do trabalho

A estrutura deste trabalho de conclusão de curso é composta por cinco capítulos. O primeiro capítulo aborda a introdução sobre o tema, apresentando também os objetivos geral e específicos e a justificativa da pesquisa. No capítulo 2 é elaborado o referencial teórico sobre o assunto, com conceitos sobre a durabilidade do concreto e as manifestações patológicas mais comuns que ocorrem na estrutura. Além disso, é explicado o fenômeno da carbonatação e os principais mecanismos que influenciam esse processo, as formas de medir a profundidade carbonatada no concreto e, por fim, é abordado sobre concretos com adições pozolânicas e como esse material se comporta frente à carbonatação. O capítulo 3 engloba os procedimentos metodológicos que serão utilizados nesta pesquisa, para a realização dos ensaios e obtenção dos resultados. No capítulo 4 estão apresentados os resultados obtidos para os ensaios propostos, bem como a discussão e comparação destes. O capítulo 5 refere-se às considerações finais desta pesquisa, além de uma revisão sobre melhorias e necessidades encontradas com base nos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, estão contidas as seções de durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado, os mecanismos mais comuns de manifestação patológica, a carbonatação e os processos que influenciam a sua reação, os principais métodos de medir a carbonatação, os principais usos de materiais pozolânicos nas misturas de concreto e, por fim, os estudos referentes ao uso das pozolanas no combate à frente de carbonatação.

Os assuntos abordados em cada seção tem como objetivos apresentar as contribuições geradas pela incorporação de adições minerais pozolânicas no concreto, no que diz respeito a melhoria da resistência e durabilidade desse material frente aos processos de carbonatação que degradam o concreto armado.

2.1 Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado

O avanço tecnológico na área da construção civil ao longo dos anos modificou drasticamente as características das edificações, criando-se estruturas com uma arquitetura mais arrojada, maior esbeltez e maiores esforços. Ao mesmo tempo, buscou-se aumentar as velocidades dos processos construtivos, sendo necessário um amplo estudo e conhecimento dos materiais a serem aplicados nas estruturas, para garantir as suas características de durabilidade e vida útil.

Para Pauletti (2004) e Lucena (2016), o conceito de durabilidade das estruturas de concreto tem como principal fundamento que o projeto, a construção e operação do edifício devem atender a todos os requisitos de segurança estrutural, bem como estética e utilidade

aceitáveis, resistindo também aos esforços necessários, além de suportar por um tempo, as condições agressivas e intempéries causadas pelo meio ambiente, sem que sejam necessários reparos e manutenções onerosos.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) preconiza que as estruturas de concreto armado devem ser projetadas e construídas de modo que, durante toda a sua vida útil, as características de segurança, estabilidade e utilização sejam mantidas, de acordo com as influências ambientais previstas na época do projeto. Pauletti (2004) ainda complementa que a durabilidade tem ligação direta com a camada superficial da estrutura de concreto armado, salientando a importância de que os materiais dessa camada sejam de alta qualidade.

Mehta e Monteiro (2014) adicionam que a durabilidade do concreto pode ser definida também pela resistência às ações das intempéries, aos ataques físico-químicos que ocorrem na estrutura, bem como a sua capacidade de resistir aos desgastes e abrasões, além de outras exigências de serviço.

Percebe-se que conceito de durabilidade e vida útil da estrutura estão interligados, sendo que a NBR 6118 (ABNT, 2014) conceitua a vida útil de projeto (VUP) como o período de tempo em que a estrutura de concreto armado consegue manter as suas características, sendo aplicável para todas as partes da estrutura, com o tempo de vida útil podendo variar entre elas. Como definição do tempo de vida útil de projeto, a NBR 15575 (ABNT, 2013) determina que, a VUP mínima para uma edificação e suas partes é de 50 anos, considerando as limitações financeiras em relação às manutenções, de modo que a estrutura se mantenha, por esse período, com condições aceitáveis de utilização.

Um aspecto muito importante em relação à durabilidade das estruturas de concreto armado é a agressividade do ambiente. Para isso, a NBR 6118 (ABNT, 2014) definiu que essa agressividade são ações físico-químicas que ocorrem na estrutura, sem relação com as ações térmicas, mecânicas ou hidráulicas previstas inicialmente em projeto. Assim, conforme o Quadro 01 a seguir, a referida norma estabeleceu parâmetros de classificação de agressividade, de acordo com os diferentes meios de exposição das estruturas.

Quadro 01 - Classes de agressividade ambiental

Classe de Agressividade Ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito Forte	Industrial	Elevado
		Respingos de Maré	

Fonte: Adaptada pelo autor com base na NBR 6118 (ABNT,2014)

Com base nisso, Neville (2016), Medeiros, Andrade e Helene (2011) e Lucena (2016) ressaltam que os conceitos de durabilidade, vida útil e agressividade estão associadas, ou seja, não podem ser analisados particularmente, uma vez que todos resultam da relação das estruturas de concreto armado com o meio em que elas estão inseridas. Assim, é possível relacionar a durabilidade com o desempenho que a estrutura deve apresentar ao longo de sua vida útil, resistindo às agressividades do meio, preservando as suas características físicas e de serviço, cumprindo com os objetivos pretendidos no projeto.

Outra característica do concreto que tem relação direta com a sua durabilidade é a absorção de água, ou seja, sua permeabilidade. Para Vasconcelos e Akasaki (2010), a água é um dos principais elementos que geram manifestações patológicas na estrutura, uma vez que pode causar reações nos materiais que compõem o concreto, dissolvendo seus compósitos de forma degenerativa. Além disso, Ferreira (2006) acrescenta que os poros capilares do concreto e suas conexões são extremamente importantes frente a durabilidade, sendo que, quanto maior a quantidade de poros, maior e mais profunda será a penetração de água no concreto, diminuindo a resistência deste material frente às ações físicas e químicas.

Do mesmo modo, é possível afirmar que a porosidade do concreto pode ser relacionada a diversos fatores, surgindo por meio de falhas de adensamento na concretagem, pela falta de água para a hidratação do cimento, além da perda de água pelo processo natural

de evaporação, tornando o concreto um material poroso (BAUER, 2008). Em contrapartida, Mehta e Monteiro (2014) salientam que por meio de controles de dosagem, em que, reduzindo a relação água/cimento (a/c) da mistura, porém, mantendo níveis de consumo de cimento adequados, bem como cura e adensamento efetivos, é possível reduzir de forma significativa a permeabilidade do concreto, sem interferir negativamente em outras características, como a resistência mecânica por exemplo, uma vez que porosidade e resistência são inversamente proporcionais.

Tendo em vista que a durabilidade do concreto é afetada tanto pela agressividade do meio como pela permeabilidade da mistura, a NBR 12655 (ABNT, 2015) estabeleceu critérios mínimos de relação a/c, resistência e consumo de cimento Portland com base nas quatro classes de agressividade, de acordo com Tabela 01 a seguir.

Tabela 01 - Relações entre a classe de agressividade e o concreto

Concreto	Tipo	Classe de Agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	$\leq 0,65$	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,45$
	CP	$\leq 0,60$	$\leq 0,55$	$\leq 0,50$	$\leq 0,45$
Classe de Concreto (ABNT NBR 8953)	CA	$\geq C20$	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C40$
	CP	$\geq C25$	$\geq C30$	$\geq C35$	$\geq C40$
Consumo de Cimento Portland por metro cúbico de concreto kg/m^3	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado

CP Componentes e elementos estruturais de concreto protendido

Fonte: Adaptada pelo autor com base na NBR 12655 (ABNT, 2015)

É importante ressaltar também que, devido aos avanços tecnológicos ocorridos na área da construção civil em relação ao concreto, segundo Mehta e Monteiro (2014), com a inclusão de aditivos na mistura que reduzem a relação a/c, mas mantém as condições de trabalhabilidade, é possível obter concretos de alta resistência com um menor consumo de

cimento, que apresentam menor teor de vazios, menor porosidade e maior resistência às ações do meio ambiente.

Outro material que compõe a estrutura de concreto armado e que está diretamente ligado a durabilidade é o aço. Silva, Alves e Marques (2013) destacam que a armadura complementa o concreto, uma vez que o aço apresenta alta resistência à tração, suprimindo a baixa resistência em relação a esse esforço por parte do concreto. Ainda, Ann et al. (2010) ressaltam que, em ambientes urbanos, devido às altas taxas de emissão de CO₂, a armadura tende a sofrer corrosão por meio da carbonatação. Conforme Zhou et al. (2015), esse é um processo que gera deterioração do concreto armado, causando a despassivação da armadura, bem como removendo a aderência entre ambos materiais, o que gera fissuração excessiva, deslocamentos e perda da resistência mecânica da estrutura.

Desta forma, com o objetivo de prevenir esse tipo de processo de degradação da estrutura, Neville (2016) e Saldanha (2013) salientam que o concreto deve envolver a armadura por meio de uma camada de cobrimento, formando uma película passivadora ao redor do aço, protegendo-o das ações das intempéries, sendo esse um material altamente vulnerável às degradações ambientais. Assim, com o intuito de preservar a durabilidade da estrutura de concreto armado, a NBR 6118 (ABNT, 2014) estabelece critérios mínimos de cobrimento do concreto, com base na classe de agressividade em que a estrutura se encontra. Na Tabela 02 é possível visualizar as espessuras mínimas de cobrimento.

Tabela 02 - Cobrimento mínimo das estruturas de concreto armado em correspondência com a classe de agressividade ambiental

Tipo de Estrutura	Componente ou Elemento	Classe de Agressividade Ambiental			
		I	II	III	IV
		Cobrimento Nominal (mm)			
Concreto Armado	Laje	20	25	35	45
	Viga / Pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo	30		40	50

Fonte: Adaptada pelo autor com base na NBR 6118 (ABNT, 2014)

Por fim, para Medeiros, Andrade e Helene (2011), é de extrema importância os estudos e conhecimentos em relação a durabilidade e vida útil das estruturas, pois assim, é possível compreender o desempenho dos materiais que compõem a estrutura concreto armado, bem como realizar previsões das manifestações patológicas que podem ocorrer, com o objetivo de preveni-las, buscando garantir de forma adequada as especificações e parâmetros normativos necessários.

2.2 Mecanismos mais comuns de manifestação patológica

De acordo com Souza e Ripper (2009), é muito comum que as estruturas de concreto armado apresentem manifestação patológica, o que indica que a estrutura está sofrendo processos de degradação. Estes processos, conforme Neville (2016) podem ser classificados como físicos, químicos ou mecânicos, sendo que muitas vezes podem atuar de forma simultânea. Além disso, Lima (2005) ressalta a importância de compreender as ações químicas e físicas que ocorrem na estrutura, visto que são mecanismos de alta influência na degradação das estruturas.

Em relação a manifestações patológicas geradas por processos mecânicos, Andrade (2005) e Souza e Ripper (2009) destacam que são solicitações extrínsecas à estrutura, que podem comprometer tanto o concreto quanto a armadura, uma vez que facilitam a entrada de agentes agressivos que deterioram o concreto armado, reduzindo consideravelmente a sua resistência e segurança. Como principais causas de patologias de ordem mecânica é possível citar o recalque de fundação, impactos e choques acidentais, além de ações imprevisíveis como explosões, inundações, sismos e tempestades. Ainda, conforme Camargo (2017), o deslocamento e fissuração do concreto são os sintomas mais comuns causados por solicitações mecânicas.

De acordo com Souza e Ripper (2009), as manifestações patológicas causadas por ações físicas são inerentes à estrutura, ou seja, dependem diretamente dos materiais empregados em sua construção, sendo geradas por dilatação térmica devido a variações de temperatura, ações do vento, gelo e degelo, umidade e incêndios. Por meio destas ações a estrutura poderá sofrer fissuração, desgaste superficial, escamamento do concreto e, em casos mais graves, o colapso da estrutura. Santos (2012) ressalta a importância de serem utilizados

materiais de alta qualidade na fabricação do concreto armado, uma vez que irão determinar as características de resistência contra os processos físicos de degradação da estrutura.

Para Santos (2012), as manifestações patológicas geradas por ações químicas ocorrem mais facilmente após a degradação por ações físicas, uma vez que a estrutura acaba sendo fragilizada, sofrendo com fissuras e deslocamentos do concreto, bem como a permeabilidade e porosidade aumentam, causando uma redução da resistência, fazendo com que a estrutura de concreto armado fique suscetível a ataques químicos. Poggiali (2009) ainda complementa que os processos de degradação química ocorrem quando agentes externos à estrutura, como o CO_2 e ácidos, por exemplo, reagem diretamente com os materiais constituintes do concreto armado. Podem ser citados como exemplos de processos químicos o ataque por sulfatos, cloretos e água pura, além da reação álcali-agregado e carbonatação, sendo este último o foco desta pesquisa. Com o objetivo de relacionar de forma mais simplificada os processos, sintomas e reações de causas mecânicas, físicas e químicas, foi elaborado o Quadro 02 com base na pesquisa de Santos (2012).

Quadro 02 - Processos, mecanismos e sintomas de degradação do concreto armado.

Processo de Degradação	Mecanismos de Degradação	Sintomas	Afeta Diretamente
Mecânico	Choques e Impactos	Fissuração e deslocamento do concreto; perda de armadura	Concreto e armadura
	Recalque das Fundações		
	Ações Imprevisíveis		
Físico	Desgaste Superficial (abrasão, erosão e cavitação)	Desgaste superficial do concreto	Concreto
	Cristalização de sais nos poros do concreto	Fissuração e escamamento do concreto	Concreto
	Retração hidráulica do concreto fresco	Fissuração do concreto	Concreto
	Retração e dilatação térmica (variação de temperatura)		
	Incêndio (ação do fogo)	Fissuração, expansão dos agregados, desagregação do concreto; Colapso da armadura	Concreto e armadura

Químico	Reação álcali-agregado	fissuração e expansão do concreto	Concreto
	Hidratação dos óxidos do cimento		
	Ataque por sulfatos	Decomposição química da pasta, fissuração, expansão, perda de massa e resistência do concreto; Despassivação do aço	Concreto e armadura
	Ataque por ácidos	Decomposição química da pasta, lixiviação, desagregação, expansão e fissuração do concreto	Concreto
	Água pura	Decomposição química, dissolução e lixiviação da pasta, eflorescência, estalagmite e estalactite	Concreto
	Carbonatação	Redução do PH do concreto, despassivação e corrosão da armadura	Concreto e armadura
	Ataque por cloretos	Despassivação e corrosão da armadura	Concreto e armadura

Fonte: Adaptada pelo autor com base em Santos (2012 p. 10).

2.2.1 Carbonatação

A carbonatação, conforme Neville (2016) e Pauletti (2004), é um fenômeno físico-químico natural em que os materiais componentes do cimento reagem diretamente com o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera, e com outros gases ácidos também presentes no meio, como o ácido sulfúrico (H_2S) e o dióxido de enxofre (SO_2), diminuindo a alcalinidade do material, bem como substituindo gradualmente os seus compostos por carbonatos. Cascudo e Carasek (2011) comentam que esse processo faz com que o pH do concreto seja reduzido, além de modificar a sua microestrutura.

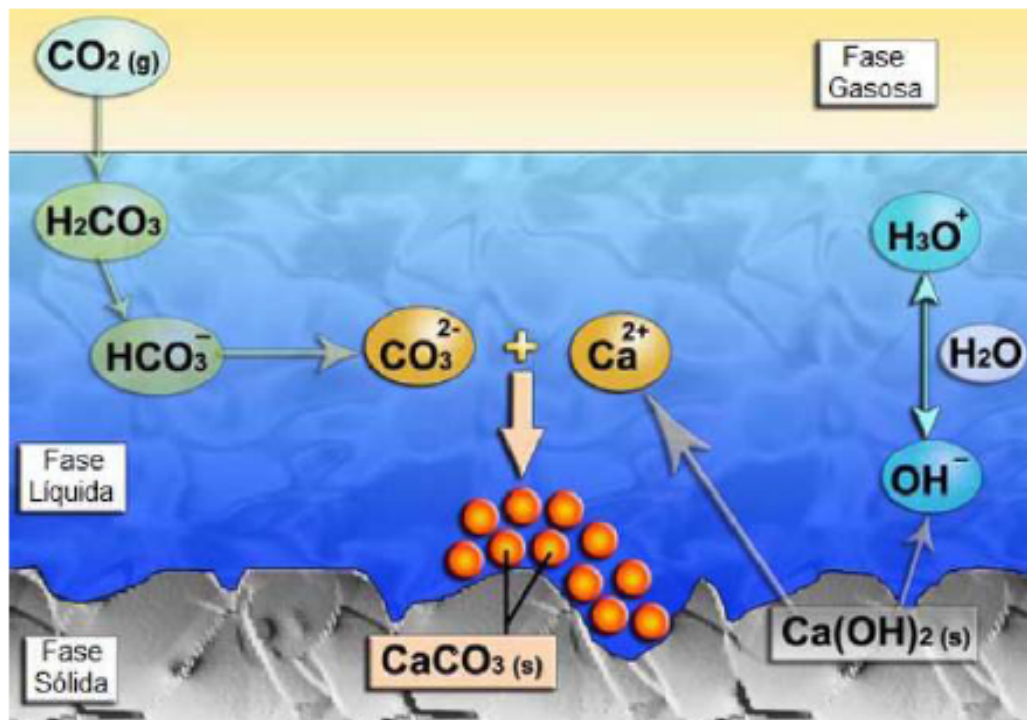
De acordo com Kulakowski (2002) e Saldanha (2013) o processo da carbonatação ataca diretamente os compostos alcalinos do cimento, como o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), hidróxido de sódio (NaOH) e o hidróxido de potássio (KOH), além de reagir também com os

silicatos presentes no material, sendo que a reação principal ocorre entre o CO_2 e o Ca(OH)_2 . Assim, Cascudo e Carasek (2011) complementam que, na reação entre o dióxido de carbono e o hidróxido de cálcio, ocorre a formação do carbonato de cálcio (CaCO_3), que aparece na forma mineralógica (cristais), sendo insolúvel. Dessa forma, o fenômeno da carbonatação pode ser representado pela Equação 1.



Conforme Mehta e Monteiro (2014), o hidróxido de cálcio está presente na pasta hidratada de cimento em quantidades entre 20% a 25% do volume sólido, uma vez que este elemento se apresenta na forma cristalizada. Cascudo e Carasek (2011) e Recena (2017) ressaltam que o Ca(OH)_2 confere ao concreto um ambiente de alta alcalinidade e pH elevado, porém, vulnerável ao ataque de ácidos. Além disso, este composto é o principal caminho para os agentes agressivos penetrarem na estrutura de concreto, fazendo com que o pH seja drasticamente reduzido e a resistência mecânica fique comprometida. A seguir, na Figura 01, é possível visualizar o processo de carbonatação do hidróxido de cálcio.

Figura 01 - Carbonatação do Hidróxido de Cálcio (Ca(OH)_2).



Fonte: Thiéry (2005)

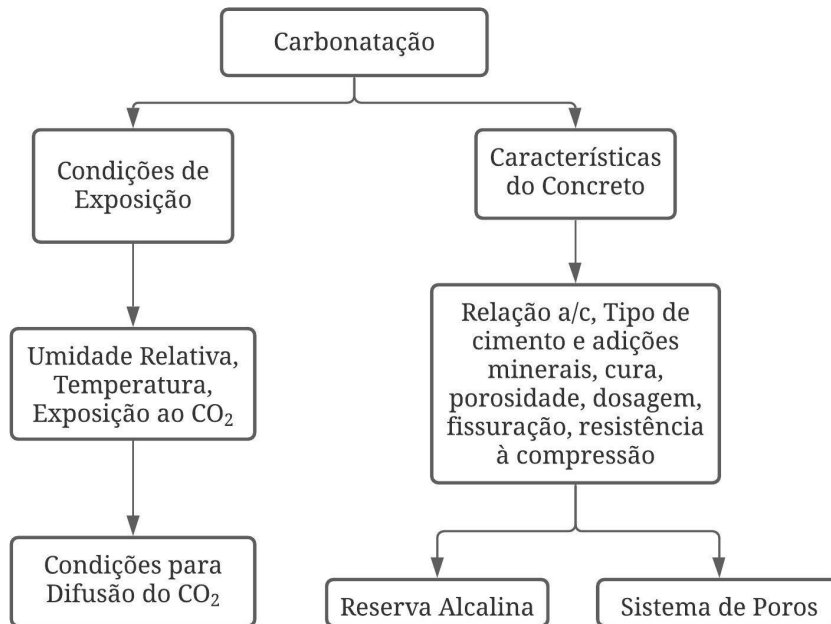
A redução da alcalinidade e do pH no concreto é extremamente perigosa, pois, segundo Souza e Ripper (2009), esses fatores, em níveis adequados, atuam como uma proteção aos ataques de agentes agressivos. Ainda, de acordo com Mehta e Monteiro (2014) o concreto, em condições normais, apresenta pH em torno de 12,5 e, depois de carbonatado, o pH pode atingir níveis inferiores a 8,5. Desta forma, segundo Possan (2010), essa redução do pH gera um ambiente de baixa alcalinidade, fazendo com que a camada passivadora do concreto sobre o aço seja afetada, processo este denominado de despassivação da armadura. Isto torna este material altamente propenso à corrosão, o que faz com que o aço oxide e perca resistência, além de expandir no interior do concreto gerando fissuras e deslocamentos, comprometendo a segurança da estrutura de concreto armado.

Como forma de proteção frente à carbonatação, o cobrimento do concreto desempenha uma importante função, sendo uma barreira física e química, dificultando que agentes agressivos penetrem na estrutura e danifiquem o aço, além de desenvolver uma película passivadora para a armadura, devido à formação de um ambiente de alta alcalinidade. Desse modo, é imprescindível que o cobrimento do concreto seja executado com materiais de alta qualidade, garantindo um desempenho adequado, evitando que a carbonatação atinja uma profundidade maior que sua espessura, protegendo a armadura no interior da estrutura (PAULETTI, 2009; FERREIRA, 2013).

Silva (2011) afirma que a carbonatação tem como seus principais mecanismos de transporte de CO_2 para o interior da estrutura o processo de difusão, a permeabilidade e a absorção capilar. Cascudo e Carasek (2011) e Saldanha (2013) ressaltam que a resistência à carbonatação do concreto está atrelada ao período de tempo e a dificuldade de a difusão ocorrer, considerando que o dióxido de carbono é transportado pela espessura do cobrimento. Além disso, os autores acrescentam que outras variáveis podem influenciar diretamente na profundidade e velocidade de carbonatação, fatores relacionados ao concreto como a relação a/c, fissuração, porosidade, tipo de cimento e adições minerais, dosagem, processo de cura, resistência à compressão, além de fatores relacionados ao meio ambiente, tais como a umidade relativa, temperatura, concentração e tempo de exposição aos agentes agressivos, especialmente o CO_2 . Dependendo das características dessas variáveis, elas podem contribuir

ou dificultar o processo de carbonatação. A Figura 02 a seguir apresenta um breve resumo destes fatores e suas influências.

Figura 02 - Fluxograma dos fatores que influenciam a carbonatação



Fonte: Adaptado pelo autor com base em Cascudo e Carasek (2011).

De acordo com o tema proposto para esta pesquisa, dentre todos os mecanismos que influenciam a carbonatação, serão detalhados os mais relevantes para os ensaios, sendo eles a concentração de CO_2 , difusão, temperatura, umidade relativa e permeabilidade.

2.2.1.1 Concentração de CO_2

Para Pauletti (2009) e Saldanha (2013) a concentração de CO_2 no ambiente é um dos principais parâmetros de influência na carbonatação, sendo que, quanto maior essa concentração, maior a profundidade, velocidade e ocorrência desse fenômeno. Além disso, ressaltam que ambientes fechados apresentam uma maior concentração desse elemento quando comparado com áreas externas abertas, uma vez que não apresentam condições adequadas para a renovação do ar. Neville (2016) também cita uma relação diretamente proporcional entre o aumento das concentrações de CO_2 na atmosfera, com maiores velocidades de carbonatação do concreto.

Conforme Saldanha (2013), o dióxido de carbono, em um cenário adequado, apresenta concentração de 0,032% de volume do total de gases na atmosfera, sendo que pode chegar a 0,05% em áreas rurais e, em ambientes urbanos, atinge valores de até 1,20%. Neville (2016) comenta que a carbonatação pode ocorrer mesmo em locais que apresentem baixas concentrações de CO₂, onde a partir de 0,03% de volume deste gás já se observam ações deste fenômeno de degradação do concreto. Com base nisso, Possan (2010) reuniu dados de diferentes autores e elaborou um compilado com os teores de CO₂ para diferentes ambientes, de acordo com a Tabela 03 a seguir.

Tabela 03 - Concentração média de CO₂ com relação ao ambiente

Ambiente	Concentração média de CO₂ (%)
Campo aberto	0,015
Estábulo	0,075
Zona rural	0,03 a 0,05
Zona industrial	0,045
Zona urbana	0,08 a 0,1
Zona urbana, metrópoles	0,30
Zona urbana, tráfego intenso	0,1 a 1,20
Zonas de alta agressividade	1,00
Laboratório não ventilado	menor que 0,1
Laboratório climatizado	0,088
Túneis	0,1 a 0,3

Fonte: Possan (2010)

Segundo Pauletti (2009), devido ao grande período de tempo necessário para analisar um ensaio de carbonatação natural, os pesquisadores têm aderido a técnica de ensaios acelerados, em que são utilizadas concentrações entre 1% e 100% de CO₂, porém, ainda não foi possível estabelecer um teor ideal. Saldanha (2013) acrescenta que, expondo o concreto em teores de CO₂ de 4% no período de uma semana, os resultados seriam correspondentes com estruturas de concreto que passaram por um ano de exposição, em níveis naturais desse elemento. Por outro lado, Pauletti (2009) e Possan (2010) ressaltam que, quando a estrutura atinge certos teores de concentração CO₂, mudanças inesperadas na microestrutura do

concreto podem ocorrer, sendo que ocorre um preenchimento dos poros devido a água liberada e os carbonatos gerados pela reação, dificultando o processo de difusão, evidenciando que as altas profundidades de carbonatação nem sempre estejam relacionadas a elevadas taxas de gás carbônico.

2.2.1.2 Difusão

O mecanismo de difusão pode ser definido como um transporte baseado em diferenças de concentração em relação a dois ambientes, sendo assim, para a carbonatação, trata-se do fluxo da região de alta concentração de CO_2 , ambiente externo, para uma região de baixa concentração, o interior da estrutura de concreto, uma vez que a sua efetividade irá depender também das características da microestrutura, bem como da presença de diferentes elementos no interior dos poros (MEDEIROS, 2008; NEPOMUCENO, 2005).

Segundo Neville (2016), a difusão do CO_2 no concreto tem sua condição crítica quando a umidade do ambiente apresentar níveis entre 50% a 80%, pois esse processo necessita de um meio aquoso para ocorrer, porém, em situações de muita saturação este mecanismo é retardado e, em ambientes secos as reações de carbonatação não se realizam. Cascudo e Carasek (2011) ressaltam que a difusão do dióxido de carbono se desloca no interior do concreto por meio dos poros levemente saturados, encontrando o caminho até afetar a armadura. Por outro lado, Leemann et al. (2015) perceberam que concretos com adição de escória de alto forno apresentam grande resistência frente a difusão, sendo que, devido ser um material de granulometria fina, auxilia no preenchimento dos vazios, resultando em um concreto menos poroso.

2.2.1.3 Temperatura

Conforme Saldanha (2013), as variações de temperatura influenciam diretamente na quantidade e velocidade das reações químicas no meio ambiente, bem como na quantidade de água em volume presente no ar. Porém, Papadakis et al. (1991) e Neville (2016) acrescentam que, no quesito velocidade de carbonatação, a temperatura não exerce função direta quando apresenta valores entre 20 °C e 40 °C, sendo que, mecanismos como a concentração de CO_2 , difusão e umidade relativa, são mais efetivos dentro deste intervalo. Por outro lado, em

ambientes onde o concreto recebe insolação direta e sofre com grandes variações de temperatura, a carbonatação é aumentada.

De acordo com Ribeiro et al. (2014), a temperatura atua diretamente sobre as reações álcali-agregados, em que ocorre a expansão do concreto por tensões internas, gerando fissuras, as quais são observadas em maior quantidade quanto mais alta for a temperatura, o que facilita a entrada de agentes agressivos, contribuindo para o processo de carbonatação. Desta forma, Pauletti (2009) e Saldanha (2013) complementam que, embora não seja possível chegar a um consentimento entre os autores sobre a atuação direta da temperatura e suas variações em relação a velocidade e profundidade de carbonatação, ela não pode ser desprezada, sendo possível afirmar que este fator atua de forma indireta, gerando manifestações patológicas que facilitam a entrada do CO_2 no concreto, desencadeando a carbonatação e, posteriormente, a corrosão das armaduras.

2.2.1.4 Umidade Relativa

Para Pauletti (2009) e Saldanha (2013) a umidade relativa do meio ambiente causa grande influência no processo de carbonatação do concreto, uma vez que este material apresenta grande capacidade de absorção de água, mantendo sua estrutura porosa parcialmente saturada. Já que existe uma tendência de equilíbrio entre a umidade do ambiente externo com a estrutura interna do concreto, o que auxilia no processo de difusão do CO_2 , conforme citado em 2.2.1.2 por Neville (2016).

Pauletti (2004) e Possan (2010) ressaltam que, quando a umidade relativa do ambiente encontra-se em níveis próximos a 40%, a reação de carbonatação não ocorre, pois os elementos necessários para reagirem com o CO_2 não são dissolvidos. Além disso, Neville (2016) complementa que, se a umidade estiver abaixo dos 25% no ambiente, a estrutura porosa do concreto não terá presença suficiente de água para formar o ácido carbônico, impedindo o processo de carbonatação. Já quando a umidade apresenta níveis de 100%, a saturação completa dos poros faz com que a difusão do dióxido de carbono seja extremamente lenta, podendo até evitar que as reações ocorram.

Não existindo um consenso sobre o valor ideal da umidade relativa do ambiente para a maior eficiência da carbonatação, Roy et al. (1999) *apud* Pauletti (2004) realizou uma pesquisa sobre carbonatação acelerada do concreto com variações de umidade entre 54% a 92%, percebendo que até 75% a carbonatação foi acelerada, além de estabelecer o valor de 65% como umidade ótima. Saldanha (2013) também cita que os poros do concreto, quando parcialmente saturados, apresentam a condição mais crítica para a ocorrência da carbonatação e a corrosão das armaduras.

2.2.1.5 Permeabilidade

Cascudo e Carasek (2011) definem a característica de permeabilidade do concreto como sendo a mobilidade de elementos gasosos e líquidos no interior do concreto por meio dos poros e suas ligações, sendo que, quanto maiores forem as conexões porosas da estrutura, mais rápido e profundo é o avanço do CO₂. Neville (2016) complementa que a relação a/c tem grande influência sobre essa característica, uma vez que, quanto maior for essa relação, a porosidade do concreto aumenta, aumentando também a permeabilidade e, por consequência, a velocidade de carbonatação é maior. Por outro lado, Saldanha (2013) salienta que, quando a relação a/c é reduzida, o concreto se torna mais compacto, ou seja, menos poroso, tendo sua resistência frente à carbonatação melhorada.

Para Neville (2016) é importante separar a relação entre porosidade e permeabilidade, uma vez que a porosidade é quantificada com base no volume de concreto em que os poros estão presentes. Entretanto, essa característica só contribui para a permeabilidade se os poros estiverem interligados, pois aumentam a mobilidade dos fluidos, ou seja, nem sempre um concreto altamente poroso é um concreto com alta permeabilidade. Andrade (1992) *apud* Pauletti (2004) estabeleceu uma relação entre porosidade e permeabilidade, em que um concreto é compacto e tem boa qualidade com menos de 10% de porosidade. Entre 10% e 15% o concreto é permeável e suscetível a agentes agressivos. Por fim, quando a porosidade é maior que 15%, a permeabilidade do concreto é muito alta, facilitando a entrada de agentes agressivos, sendo ineficiente na proteção da armadura.

Sobre a relação a/c, Neville (2016) estabelece um comparativo entre esse fator e a carbonatação, afirmando que uma profundidade carbonatada de 15 mm em concretos com

fator a/c 0,60 e 0,45 é de 15 anos e 100 anos, respectivamente. Ribeiro et al. (2014) ainda destacam que a carbonatação é 4 vezes maior em um concreto com relação a/c 0,80, quando comparado com outro de fator 0,45. Segundo Figueiredo (2004), para um concreto ser mais compacto e menos poroso, é importante que sua relação a/c seja baixa, reduzindo a entrada de CO_2 no interior da estrutura. Porém, quanto mais elevada essa relação se torna, a permeabilidade aumenta de forma proporcional, propiciando o ataque de agentes agressivos.

2.3 Métodos de medir a carbonatação

Como formas de realizar estudos sobre a carbonatação no concreto existem dois tipos de ensaios que são utilizados, o ensaio natural e o acelerado e, para a medição da profundidade carbonatada, são utilizadas diferentes soluções que reagem com o pH do concreto, resultando em diferentes colorações. Neste estudo será utilizada a solução de fenolftaleína.

2.3.1 Ensaio de carbonatação natural

Conforme Pauletti (2009) e Saldanha (2013) os ensaios de carbonatação natural tem como objetivo expor o concreto as condições de degradação reais do ambiente, buscando obter resultados que sirvam como base de comparação para os ensaios acelerados, além de estabelecer parâmetros para sua realização. Por outro lado, Tasca (2012) cita que existem dificuldades para comparar os resultados obtidos entre estes ensaios, uma vez que o ensaio acelerado submete o concreto a condições de concentração de CO_2 , umidade e temperatura controlados, enquanto os ensaios naturais expõem a estrutura as condições naturais do meio ambiente, variando de forma significativa entre diferentes regiões.

Pauletti (2009) e Possan (2010) ainda acrescentam que, devido ao grande tempo necessário para a realização do ensaio natural, ele acaba sendo pouco utilizado, mas consegue estabelecer uma relação de tempo e profundidade de carbonatação, para utilizar nos ensaios acelerados. Porém as comparações entre estes ensaios devem ser extremamente cuidadosas, devido à existência de diversas particularidades entre os parâmetros estabelecidos, os quais variam entre as diferentes pesquisas nesta área, fazendo com que não seja possível generalizar os resultados obtidos. Contudo, Ferreira, Fréz e Medeiros (2013) ressaltam a importância do

ensaio natural, pois permite que sejam avaliadas as reações simultâneas dos agentes agressivos no concreto, em diferentes condições climáticas e particularidades de cada ambiente.

2.3.2 Ensaio de carbonatação acelerado

De acordo com Pauletti (2009) e Raisdorfer (2015) os ensaios de carbonatação acelerado tem como objetivo expor o concreto a altas taxas de concentração de dióxido de carbono em uma câmara de carbonatação. Na câmara, é possível estabelecer um controle sobre todas as condições ambientais que auxiliam as reações deste fenômeno, proporcionando um ambiente que favorece a ocorrência da carbonatação. Por isso, obtém-se resultados em um curto período de tempo, sendo que, em um ensaio natural, seriam necessários de 5 a 20 anos para que os resultados fossem confiáveis. Segundo Possan (2010), em um estudo realizado pela autora, para a carbonatação atingir profundidade de 15mm no concreto em condições naturais foram necessários 7 anos, enquanto em condições aceleradas, esses mesmos valores foram obtidos após 3 meses.

Para Saldanha (2013), este ensaio consiste em abrigar as amostras de concreto na câmara de carbonatação acelerada, estabelecer os parâmetros de temperatura, teores de CO_2 e umidade relativa e mantê-los controlados. Com isso, o concreto é exposto a concentrações de dióxido de carbono muito superiores às encontradas em um ambiente natural, resultando em elevadas profundidades de carbonatação. Pauletti, Possan e Dal Molin (2007) também comentam que, devido aos avanços tecnológicos e maiores velocidades construtivas empregadas na área da construção civil, os ensaios acelerados são de grande importância para a análise e avaliação das características de durabilidade de materiais cimentícios, no menor tempo possível.

Em relação à câmara de carbonatação, Pauletti (2009) e Saldanha (2013) ressaltam a importância de encontrar uma forma de ventilar permanentemente a câmara, uma vez que o gás carbônico apresenta uma alta densidade em relação aos outros gases do ambiente, acomodando-se de forma natural na parte mais inferior do equipamento. Assim, a ventilação faz com que o CO_2 se misture, homogeneizando o ar no interior do protótipo, permitindo aos

Corpos de Prova (CP) uma maior absorção deste gás. O ensaio de carbonatação acelerado pode ser visualizado na Figura 03 a seguir.

Figura 03 - Ensaio de carbonatação acelerado



Fonte: Pauletti (2004)

Por outro lado, para Possan (2004), é importante ter cuidado com os resultados de ensaios acelerados de pequena duração, pois muitas vezes a reação completa da carbonatação ainda não ocorreu, não representando uma situação real. Além disso, Pauletti (2009) e Saldanha (2013) citam que, por não existirem normatizações para os ensaios, cada autor estabelece parâmetros diferentes em relação a concentração de CO_2 , temperatura, umidade, cura do concreto, o que faz com que a comparação de resultados não seja confiável, necessitando com urgência de definições padronizadas.

Tendo em vista que não existem normas que regulamentam os parâmetros para os ensaios de carbonatação acelerada, de modo que seja possível comparar e validar os resultados que serão obtidos, é de suma importância que seja feita uma pesquisa em trabalhos

acadêmicos que abordam este assunto, buscando medidas básicas de controle deste ensaio, atribuindo confiabilidade ao estudo proposto. Desta forma, as pesquisas de Kulakowski (2002), Pauletti (2004), Possan (2004), Pauletti (2009), Possan (2010), Saldanha (2013), Raisdorfer (2015), Coelho (2016), Lucena (2016), Scheeren (2020) apresentam estudos detalhados sobre o assunto, servindo como base para os parâmetros necessários para os ensaios.

2.3.3 Medição da profundidade de carbonatação

De acordo com Pauletti (2004), a medição da profundidade de carbonatação pode ser realizada utilizando indicadores químicos de pH, sendo a fenolftaleína uma solução adequada, por ser de custo acessível e fácil aplicação, obtendo-se uma boa leitura para os resultados. Kulakowski (2002) comenta que a solução do indicador de pH deve ser borrifada no concreto, na superfície deste material após ser fraturado no sentido longitudinal, sendo que, após a aplicação da fenolftaleína, a área carbonatada do concreto apresentará uma coloração cinza e, a área sem presença de carbonatação, a coloração rosa.

A solução de fenolftaleína, conforme Cascudo e Carasek (2011), deve ser preparada utilizando-se 700 ml de etanol, adicionando-se 10 gramas do reagente e misturando até que todos sólidos sejam dissolvidos, formando uma mistura homogênea. Após, são adicionados 300 ml de água destilada, finalizando a composição do indicador químico. Pauletti (2004) complementa que a solução será visível com a cor rosa quando o pH do concreto estiver acima de 9,5. Contudo, essa coloração não indica que a área não sofreu carbonatação, mas sim, que os teores de hidróxido de cálcio são elevados nesta região. No ensaio, o indicador deve ser aplicado de forma imediata após o rompimento da amostra, de modo a evitar que os gases do ambiente comprometam o resultado.

Segundo Pauletti (2004), Ribeiro et al. (2014) e Neville (2016), existem outros métodos de medição de profundidades de carbonatação além dos indicadores químicos de pH, como por exemplo a petrografia, difração de raio X, espectrometria de infravermelho, termogravimetria. Estes ensaios são utilizados quando são necessárias mais definições sobre

as características do avanço da carbonatação no concreto, sendo de difícil aplicação e execução, bem como de alto custo.

2.4 Uso de materiais pozolânicos nas misturas de concreto

Hoppe Filho (2008) e Cascudo e Carasek (2011) destacam que as adições de materiais pozolânicos na mistura do concreto estão sendo empregadas em grande escala na construção civil nos últimos anos. Assim, diversos pesquisadores estão buscando novos estudos sobre essas composições, com o intuito de avaliar o desempenho do concreto em relação a sua resistência mecânica, trabalhabilidade, menores custos e durabilidade. Além disso, Prudêncio Júnior, Santos e Dafico (2003) e Vasconcelos e Akasaki (2010) ressaltam a importância destes estudos, uma vez que, dependendo do tipo de pozolana adicionada, as características do concreto são aprimoradas, sendo possível viabilizar a utilização destes minerais, proporcionando a correta destinação desses resíduos, os quais poluem o meio ambiente.

Para poder compreender o comportamento das adições minerais ao cimento, é necessário entender os conceitos básicos sobre o efeito filer e o pozolânico. Moraes (2001) e Mehta e Monteiro (2014) citam que o efeito filer faz com que ocorra um refinamento dos poros da estrutura, reduzindo o tamanho e quantidade de poros capilares e suas interconexões, bem como diminuindo os vazios e aumentando a compacidade, reduzindo consideravelmente a permeabilidade do concreto e, conseqüentemente, as profundidades de carbonatação são menores. Esse efeito ocorre quando é feita a adição ou substituição parcial dos teores de cimento por pozolanas, modificando e aprimorando as características microestruturais do concreto.

Por outro lado, segundo Pauletti (2004), quando um material pozolânico é adicionado a mistura sem a retirada de teores de cimento, ocorre sim uma redução na carbonatação, porém, quando a pozolana é inserida como substituição ao cimento, mantendo uma igualdade da relação a/c, dependendo dos teores de pozolana utilizados, o processo de carbonatação pode ser acelerado, apresentando maiores profundidades conforme os teores de substituição são aumentados. Entretanto, em porcentagens baixas de substituição, a carbonatação pode ser reduzida, existindo a necessidade de encontrar um equilíbrio entre esses teores.

De acordo com Dal Molin (2011) e Mehta e Monteiro (2014), o efeito pozolânico se refere às reações químicas das adições pozolânicas com o hidróxido de cálcio do cimento, sendo que, a hidratação desses materiais resulta na formação de compostos cimentícios similares aos do próprio cimento Portland. Entretanto, ao invés de liberar o Ca(OH)_2 , essa reação consome esse elemento para a formação de cristais que atribuem maior resistência. Esse efeito ocorre lentamente, fazendo com que o ganho de resistência e o calor de hidratação liberado também sejam processos lentos. Contudo, essas adições minerais, por serem materiais de elevada finura, fazem com que a microestrutura do concreto seja modificada, preenchendo os vazios e reduzindo a porosidade do concreto.

Por outro lado, Hoppe Filho (2008) e Cascudo e Carasek (2011) salientam que, mesmo que as pozolanas adicionadas aumentem a resistência e refinem os poros, elas também consomem o Ca(OH)_2 reduzindo a alcalinidade do concreto, facilitando as reações de carbonatação por ocorrerem com menores teores de CO_2 , comprometendo a durabilidade e vida útil da estrutura. Em contrapartida, devido à redução da quantidade e conexões entre os poros do concreto, o processo de difusão do CO_2 é retardado, reduzindo as velocidades de carbonatação. Por fim, os autores complementam que o tipo e o teor de pozolana utilizada, a relação a/c e até o tipo de cura realizada, influenciam diretamente no comportamento da carbonatação dos concretos com adições minerais.

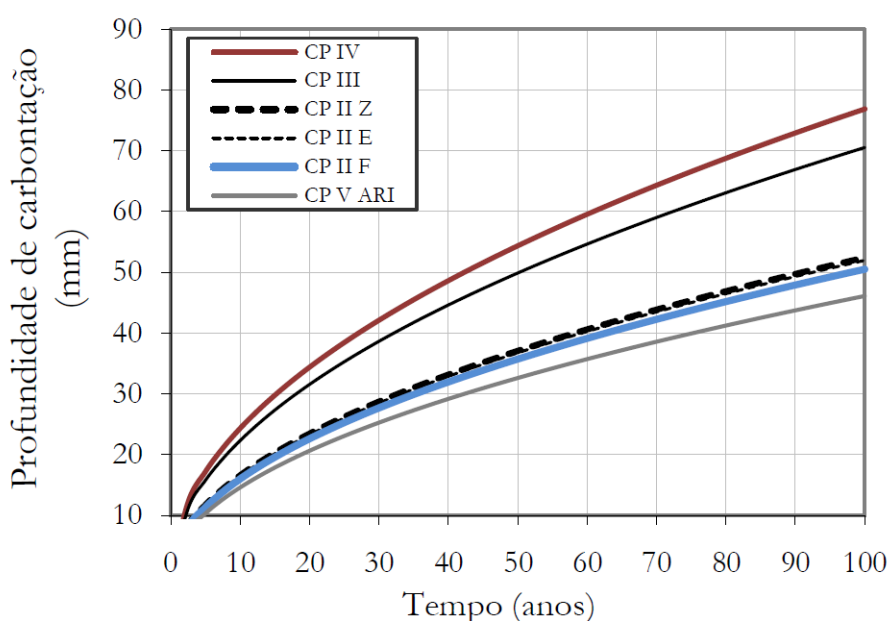
2.5 Estudos referentes ao uso de pozolanas em combate a frente de carbonatação

Com base no que foi exposto sobre o comportamento dos concretos com adições pozolânicas frente a carbonatação, é evidente que diversos fatores contribuem para as reações, sendo necessário avaliar diferentes pesquisas e resultados, de modo a estabelecer um equilíbrio entre teores de cimento Portland e pozolanas que seja vantajoso para o concreto em todos os aspectos. Dessa forma, serão apresentadas as considerações de diferentes autores sobre esse tema, contemplando diferentes porcentagens de adição e substituição entre cimento e pozolana, variando também a relação a/c, bem como os tipos de materiais pozolânicos.

Possan (2010) estabelece uma relação inicial com base no tipo de cimento utilizado, considerando o CP V - ARI, que por apresentar um alto teor de pureza e baixo teor de adições pozolânicas, a profundidade de carbonatação é menor quando comparada com outros tipos de

cimento que contém pozolanas em sua composição, como o CP III e o CP IV, por exemplo. Esse fato é comprovado por Papadakis et al. (1992) apud Pauletti (2004), em que foi constatado que em cimentos com adições pozolânicas, por apresentarem menor quantidade de hidróxido de cálcio, a carbonatação ocorre mais rapidamente. No Gráfico 01 a seguir é possível visualizar essa relação.

Gráfico 01 - Profundidade de carbonatação pelo tempo de exposição com base no tipo de cimento



Fonte: Possan (2010 p. 156)

Com base nisso, iniciaram-se estudos com novas adições pozolânicas ao concreto, como a sílica ativa, cinza volante, metacaulim, entre outras. Em relação à sílica, Possan (2010) relaciona estudos de diversos autores, observando que, quando a resistência do concreto é alta, ou seja, maior que 50 MPa, a adição de sílica ativa não influencia negativamente frente a carbonatação, porém, quando a resistência é menor, conforme os teores de adição de sílica aumentam, a carbonatação se torna mais profunda. Papadakis (2000) confirma essa mesma relação, porém ressalta que ocorre quando o cimento é substituído por um teor de sílica ativa, fazendo com que ocorra uma redução das quantidades de hidróxido de cálcio, elevando as profundidades de carbonatação, sendo que essa relação geralmente ocorre para teores de sílica ativa superiores a 18%.

Na pesquisa de Possan (2004), realizada com a adição ao cimento de teores de sílica entre 5% e 20%, o concreto apresentou um aumento na resistência à compressão axial, porém, em relação à carbonatação, a resistência foi menor do que o concreto sem adições, ou seja, a profundidade carbonatada foi maior. Para este mesmo intervalo de teores de sílica ativa adicionado ao concreto, Kulakowski (2002) observou que o pH do concreto reduziu de 13,5 para 12. Hoppe Filho (2008) explica que essa redução no pH ocorre porque a pozolana consome o hidróxido de cálcio, criando novos cristais de resistência.

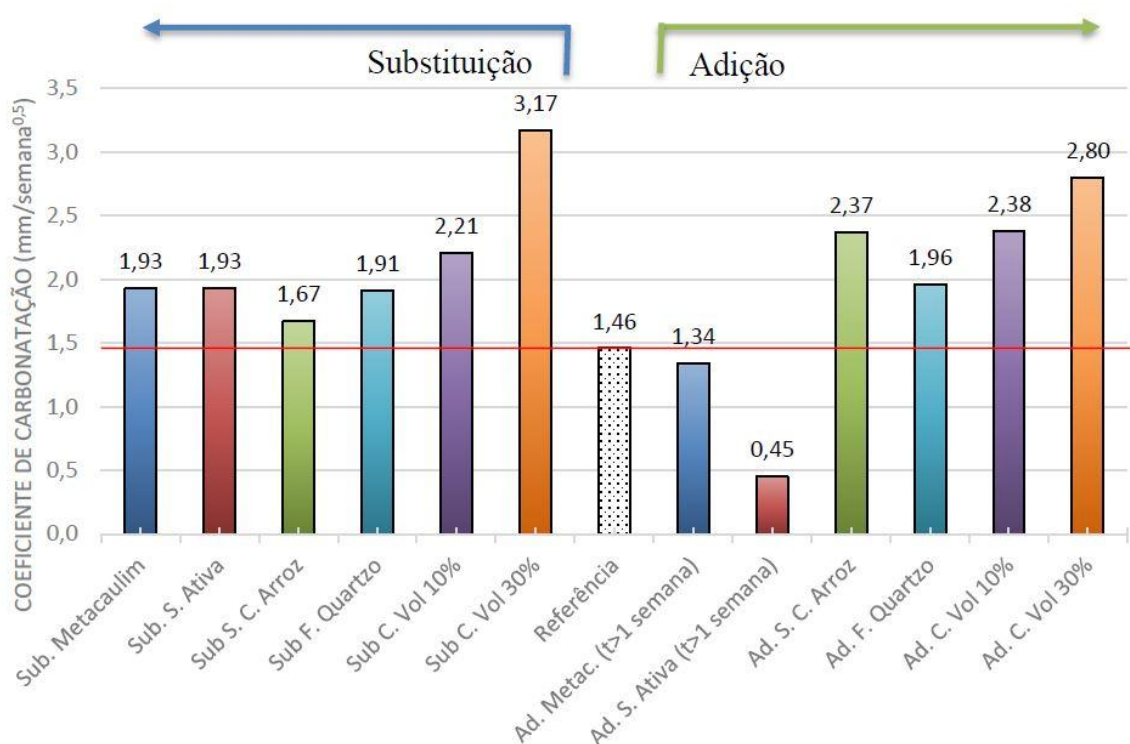
Ainda em relação a sílica ativa, Raisdorfer (2015) percebeu em sua pesquisa que, quando a sílica é adicionada em forma de substituição de 10% de teor de cimento, a profundidade carbonatada não sofre nenhuma alteração em relação a um concreto sem adições. Porém, ao adicionar 10% de sílica sem retirada de teor de cimento, a resistência frente à carbonatação aumenta consideravelmente, como pode ser observado no Gráfico 02.

Em relação ao metacaulim, Cabrera e Rojas (2001) perceberam em sua pesquisa que, adicionando um teor de 15% deste material ao concreto, o hidróxido de cálcio pode ser consumido por completo, acelerando drasticamente a carbonatação e corrosão da armadura. Porém, Duan et al. (2012) realizaram ensaios em que substituíram cimento por metacaulim, observando que para teores de substituição de 10% e fator água/aglomerante 0,50, a porosidade do concreto foi reduzida, sendo que a velocidade e profundidade de carbonatação também foram menores que o concreto referência, devido ao aumento da densidade gerada por essa substituição, o que aumentou a resistência a entrada de agentes agressivos na estrutura. Porém, em um estudo similar, Raisdorfer (2015) percebeu que, com a substituição do cimento por metacaulim em 10%, a profundidade de carbonatação foi maior quando comparada com um concreto em que foi feita a adição de 10% desse mesmo material, mantendo a relação a/agl de 0,50 para as duas situações. Isso ocorre pelo fato de que a reserva alcalina é menor na primeira situação. Esses resultados estão indicados no Gráfico 02 abaixo.

Raisdorfer (2015) realizou pesquisas sobre a carbonatação em concretos com a adição de teores de cinza volante e também com a substituição de teores de cimento por cinza volante, percebendo que, com a presença dessa pozolana, o concreto tende a apresentar profundidades de carbonatação superiores a um concreto sem adições, considerando a mesma relação a/agl para ambos os casos. No seu estudo, adicionou teores de 10% e 30% de cinza

volante, bem como os teores de substituição de cimento por essa cinza foram os mesmos. Além disso, a relação a/agl para todos os traços foi a mesma, 0,50. É possível visualizar no Gráfico 02 a seguir os resultados de profundidade de carbonatação deste autor, notando que, conforme ocorria o aumento desses teores de cinza volante, as profundidades de carbonatação também eram maiores, obtendo os valores de 2,21 e 3,17 para a substituição de 10% e 30% de cinza volante respectivamente e, 2,38 e 2,80 para a adição desse material nestes mesmos teores.

Gráfico 02 - Profundidade de carbonatação de concretos com substituição e adição de teores de materiais pozolânicos.



Fonte: Raisdorfer (2015).

É possível perceber nos resultados de Raisdorfer (2015) que, com a adição ou substituição de teores de cinza volante, a profundidade de carbonatação aumenta consideravelmente em relação ao concreto sem adições. Isso ocorre porque, segundo Gobbi (2014) e Neville (2016), essa pozolana apresenta alta reatividade, ou seja, consome uma grande quantidade de Ca(OH)_2 do concreto, o que contribui para a perda de resistência do concreto frente à carbonatação.

De acordo com Papadakis (2000) e Possan (2004), quando a relação a/c for inferior a 0,45, devido ao concreto apresentar baixa porosidade, a profundidade de carbonatação é mínima, sofrendo pouca ou nenhuma influência das adições, podendo ser desprezada. Porém, conforme essa relação aumenta e os teores de pozolana se elevam, a carbonatação é acelerada, atingindo também maiores profundidades, fazendo com que a despassivação da armadura ocorra mais rapidamente, prejudicando a segurança da estrutura.

Com base nestas pesquisas, fica evidente a necessidade de aprofundar cada vez mais os estudos nessa área, buscando avaliar diferentes teores de adições ou substituições de materiais pozolânicos, de modo a atingir um fator de equilíbrio, aprimorando as estruturas de concreto e aumentando sua resistência frente à carbonatação e outros agentes agressivos, conforme os materiais e métodos propostos para este trabalho.

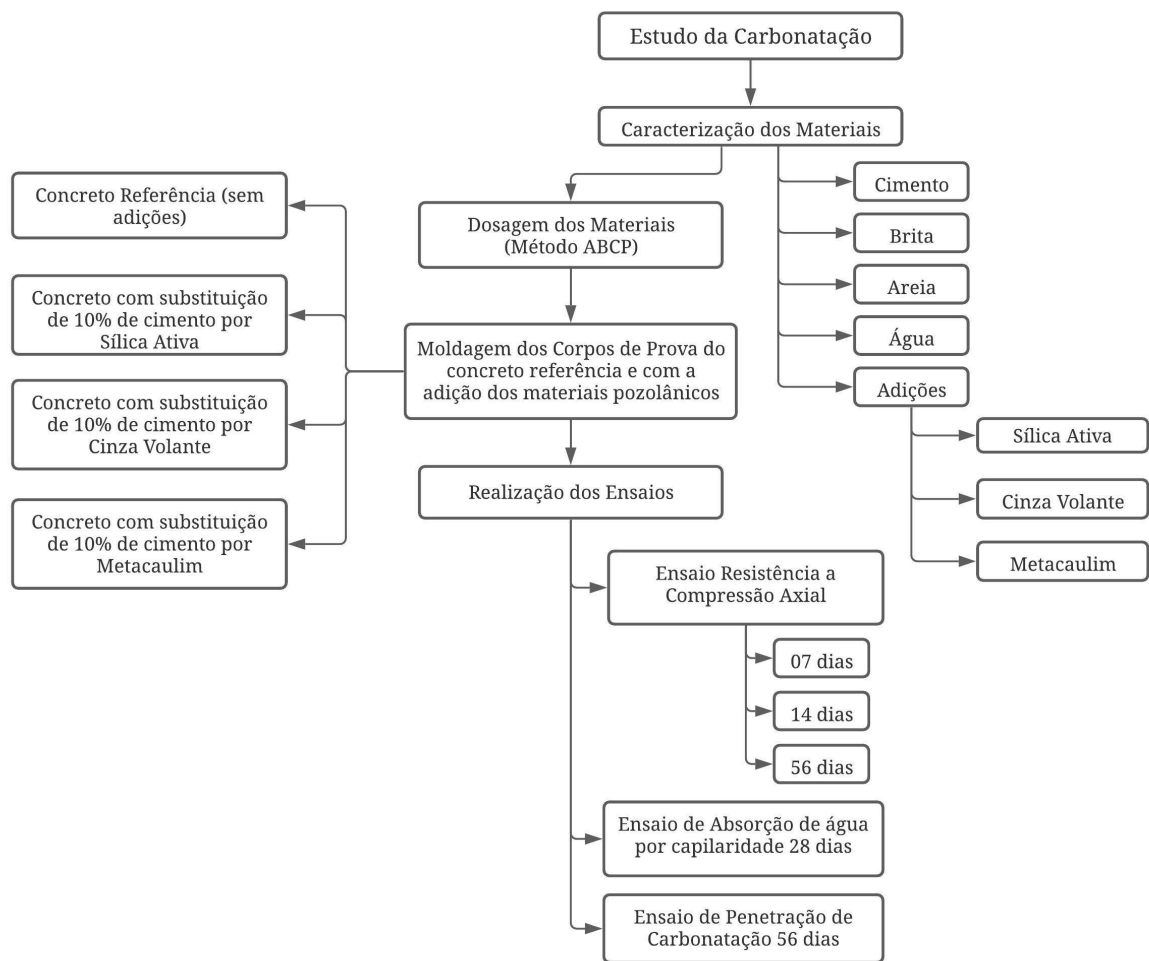
3 MATERIAIS E MÉTODOS

O Programa experimental foi desenvolvido com base nos materiais e métodos abaixo descritos, sendo o estudo realizado com a utilização de concreto com a substituição do teor de cimento por três diferentes materiais pozolânicos, com o objetivo de verificar e comparar a influência destes materiais perante a resistência característica à compressão, resistência e desempenho frente à carbonatação e a permeabilidade da mistura final.

3.1 Estratégia de Pesquisa

Essa pesquisa foi dividida em três etapas, sendo a primeira a caracterização dos materiais utilizados para a fabricação do concreto, por meio de ensaios de caracterização. A segunda etapa consiste na dosagem dos materiais seguindo o método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Por fim, na terceira etapa deste estudo foram realizados os ensaios de laboratório específicos, conforme as normas vigentes, nos corpos de prova moldados com cada um dos tipos de concreto propostos para este trabalho, conforme Figura 04, que representa o fluxograma desta estratégia.

Figura 04 - Fluxograma da estratégia de pesquisa



Fonte: Autor (2021).

3.1.1 Variáveis Estudadas

Estão descritas abaixo as variáveis presentes no programa experimental, em relação ao tipo de concreto com adições minerais em teor percentual de massa, em substituição ao cimento Portland, com a denominação do traço.

- a) Traço Ref: Concreto Referência (sem adições);
- b) Traço SA: Concreto com Substituição de 10% de cimento Portland por Sílica Ativa;
- c) Traço Meta: Concreto com Substituição de 10% de cimento Portland por Metacaulim;
- d) Traço CV: Concreto com Substituição de 10% de cimento Portland por Cinza Volante.

3.2 Materiais

3.2.1 Cimento

O cimento utilizado para o experimento foi o CP V - ARI RS, da marca Cauê, por ser um tipo de cimento com baixo teor de adições pozolânicas, não interferindo diretamente sobre as pozolanas que foram adicionadas, proporcionando uma melhor comparação dos resultados finais. Conforme o fabricante, este cimento atende a todas as características físico-químicas estabelecidas pela NBR 16697 (ABNT, 2018), além de que a sua caracterização segue os procedimentos estabelecidos pela NBR 16605 (ABNT, 2017), tendo como massa específica o valor de 2,90 g/cm³.

3.2.2 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado na produção do concreto foi a pedra britada de rocha basáltica nº 1, conhecida comercialmente como brita 1, livre de impurezas, disponibilizada pelo Laboratório de Tecnologia da Construção (LATEC) da Univates. Este agregado passou pelos ensaios da NBR NM 53 (ABNT, 2009), da NBR 7217 (ABNT, 1987) e NBR 7211 (ABNT, 2005), para a determinação da massa específica e massa unitária, respectivamente.

Os ensaios de caracterização foram realizados pelo próprio laboratório da universidade, seguindo todos os procedimentos estabelecidos pelas normas acima citadas, obtendo-se os resultados de granulometria indicados na Tabela 04 e no Gráfico 03 a seguir.

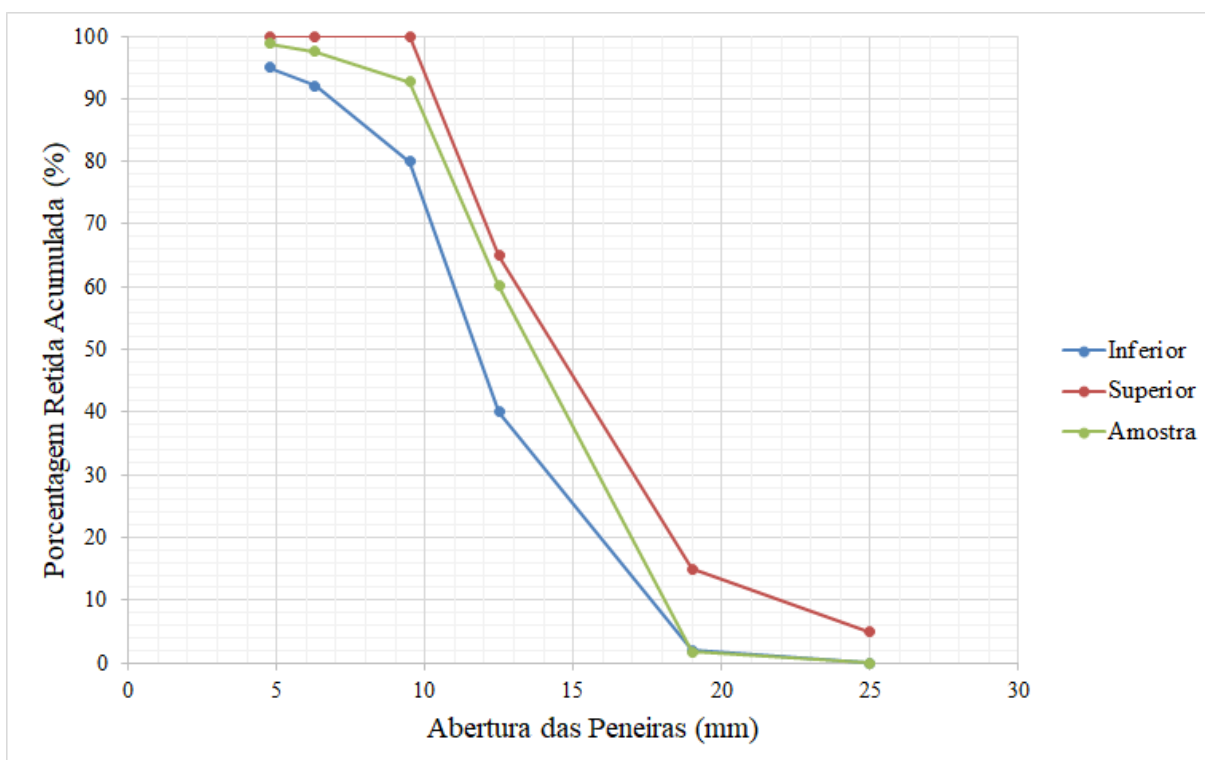
Tabela 04 - Granulometria do agregado graúdo brita 1

Abertura Nominal (mm)	Retido Acumulado (%)	Retido Individual (%)	Limites B1 (%) (NBR 7217)	
			Superior	Inferior
25,00	0	0	0	5
19,00	1,77	1,77	2	15
12,50	60,12	58,35	40	65
9,50	92,68	32,56	80	100
6,30	97,55	4,87	92	100
4,75	98,78	1,23	95	100
2,36	99,44	0,66	100	100

1,18	99,45	0,01	100	100
0,60	99,45	0	100	100
0,30	99,46	0,01	100	100
0,15	99,47	0,01	100	100
Fundo	100	0,53	100	100

Fonte: Autor (2021).

Gráfico 03 - Curva granulométrica do agregado graúdo brita 1



Fonte: Autor (2021).

A partir dos ensaios realizados, foi possível determinar as características do agregado graúdo, sendo a sua massa específica de $2,94 \text{ g/cm}^3$, massa específica aparente de $2,79 \text{ g/cm}^3$, absorção de 1,82 % e massa unitária de $1,47 \text{ g/cm}^3$, com a dimensão máxima do agregado de 19 mm.

3.2.3 Agregado Miúdo

Como agregado miúdo, foi utilizada a areia natural média da região do Vale do Taquari, livre de impurezas, fornecida pelo LATEC da Univates, sendo que os ensaios para determinação da granulometria e massa específica deste material atenderam ao disposto na

NBR 7217 (ANBT, 1987), NBR 7211 (ABNT, 2005) e na NBR NM 52 (ABNT, 2009). Além disso, previamente a sua utilização, a areia deve passar por um processo de secagem e limpeza, para que a umidade não interfira no traço final do concreto.

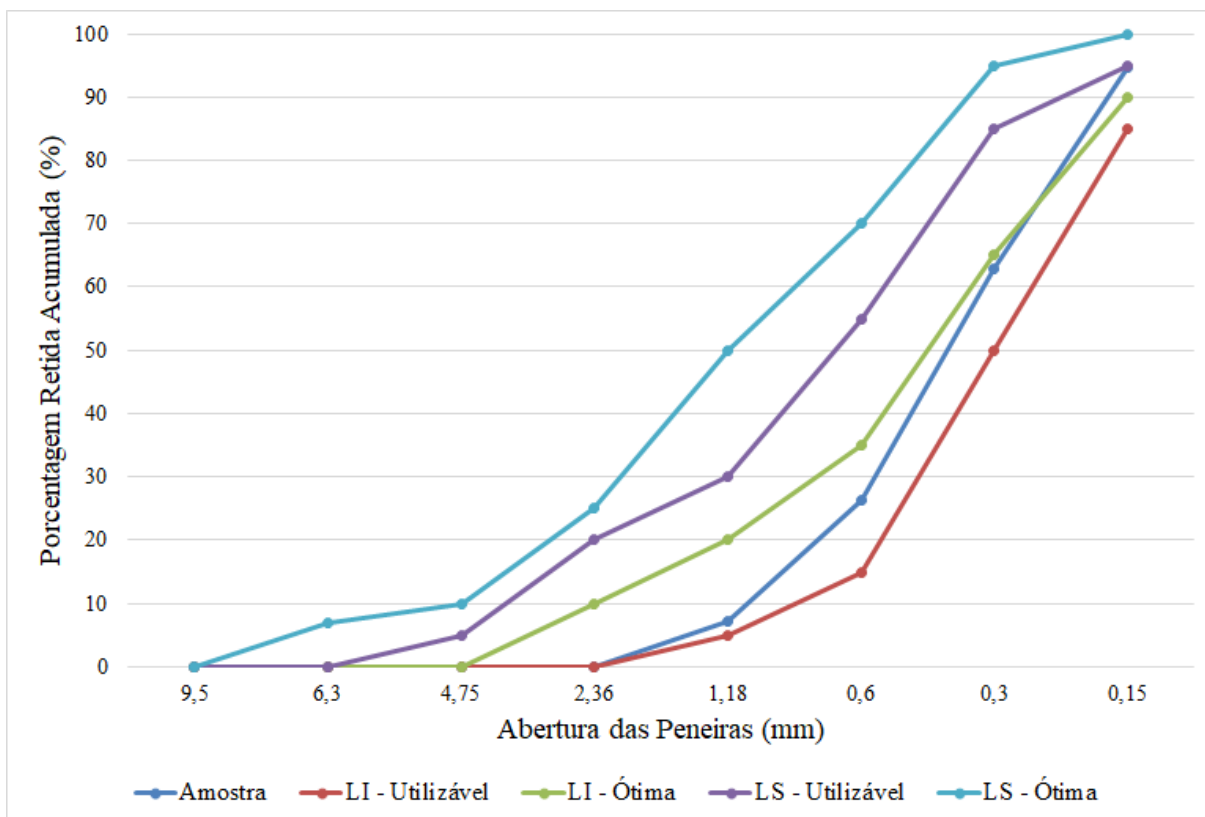
Os ensaios de caracterização deste agregado também foram realizados pelo laboratório da universidade, atendendo a todos os parâmetros exigidos pelas normas acima citadas, resultando em uma massa específica de $2,61 \text{ g/cm}^3$, massa unitária de $1,52 \text{ g/cm}^3$ e módulo de finura de 1,91. A granulometria do agregado miúdo está indicada na Tabela 05 e Gráfico 04 a seguir.

Tabela 05 - Granulometria agregado miúdo

Abertura Nominal (mm)	Retido Acumulado (%)	Retido Individual (%)	Porcentagem retida acumulada (NBR 7217)			
			Limites Inferiores (%)		Limites Superiores (%)	
			Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Utilizável	Zona Ótima
25,00	0	0	0	0	0	0
19,00	0	0	0	0	0	0
12,50	0	0	0	0	0	0
9,50	0	0	0	0	0	0
6,30	0	0	0	0	0	7
4,75	0	0	0	0	5	10
2,36	0	0	0	10	20	25
1,18	7,22	7,22	5	20	30	50
0,60	26,4	19,18	15	35	55	70
0,30	62,84	36,44	50	65	85	95
0,15	94,61	31,77	85	90	95	100
Fundo	100	5,39	100	100	100	100

Fonte: Autor (2021).

Gráfico 04 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Autor (2021).

3.2.4 Água

A água que foi utilizada para a produção do concreto é fornecida pelo abastecimento público da CORSAN, uma vez que os corpos de prova foram produzidos no laboratório da Univates. Segundo a NBR 15900-1 (ABNT, 2009), quando utilizada água de abastecimento público não são necessários ensaios, uma vez que é considerada adequada para a fabricação de concretos.

3.2.5 Sílica Ativa

A Sílica Ativa foi um dos materiais pozolânicos que foi adicionado em substituição ao teor de cimento à mistura do concreto, sendo um material que proporciona maior durabilidade e impermeabilidade ao concreto. Foi utilizada a Sílica da marca Silmix, a qual apresenta as características mínimas exigidas pelas NBR 13956 (ABNT, 2012). Ainda, conforme o

fabricante, o ensaio para determinação da massa específica foi executado conforme os padrões da NBR 16605 (ABNT, 2017), resultando em um valor de 2,19 g/cm³.

3.2.6 Cinza Volante

Outro material pozolânico que foi adicionado à mistura do concreto em substituição ao cimento é a cinza volante, sendo da marca CGTEE. De acordo com o fabricante, esse material teve a sua massa específica determinada por meio de ensaios, seguindo o disposto na NBR 16605 (ABNT, 2017), resultando no valor de 1,94 g/cm³.

3.2.7 Metacaulim

A terceira adição pozolânica em substituição ao cimento no concreto foi o Metacaulim HP ULTRA, da marca Metacaulim do Brasil, sendo um material fino que apresenta características semelhantes à sílica ativa quando adicionado na mistura. Conforme o fabricante, a determinação massa específica deste agregado foi realizado seguindo todos parâmetros e especificações da NBR 16605 (ABNT, 2017), sendo este valor de 2,56 g/cm³.

3.3 Estudo de dosagem do Concreto

O concreto utilizado para este estudo foi fabricado com cimento Portland, o qual é amplamente empregado na construção civil. O método de dosagem deste material seguiu todos os procedimentos técnicos desenvolvidos pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

O método de dosagem desenvolvido pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) apresenta características únicas, uma vez que foi baseado no método americano do *American Concrete Institute* (ACI), fazendo adaptações para a realidade e condições dos materiais brasileiros (RODRIGUES, 1998).

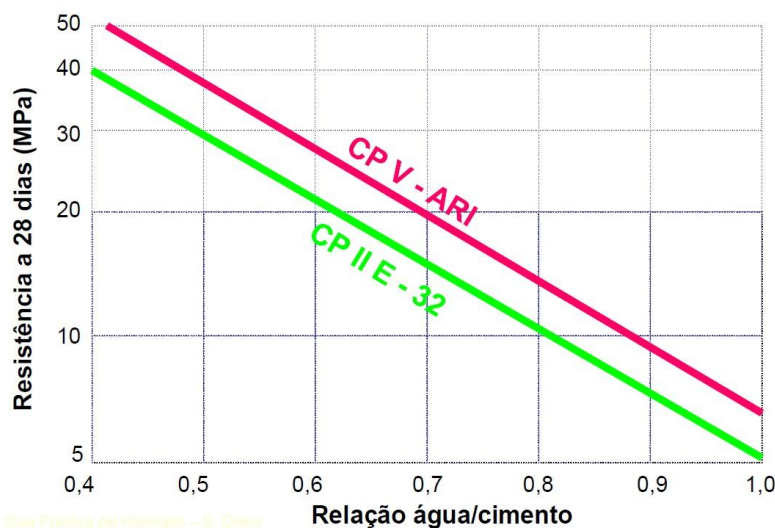
Ainda de acordo com Rodrigues (1998), o método de dosagem ABCP pode ser dividido em três etapas principais:

- a) A etapa 1 consiste em caracterizar todos os materiais utilizados, determinando a resistência à compressão do cimento aos 28 dias, a massa unitária, dimensão máxima e

- do agregado graúdo, módulo de finura do agregado miúdo, absorção de ambos os agregados e, ainda, a massa específica real para os três materiais;
- b) A etapa 2 tem como objetivo determinar as características do concreto fresco e endurecido, sendo elas a plasticidade e a resistência química e mecânica;
 - c) A terceira etapa é a dosagem final, a qual é subdividida em cinco partes, obtendo-se os valores para consumo de cimento, água, areia e brita.

Com base em todos os valores e características obtidas nas etapas 1 e 2, é possível iniciar a etapa 3, sendo o primeiro passo a fixação da relação água/cimento (a/c). Rodrigues (1998) ressalta que este fator deve levar em conta a durabilidade e resistência mecânica do concreto necessárias para o meio de exposição. Além disso, Borges e Carreiro (2017) citam que a NBR 12655 (ABNT, 2015) pode servir como base para determinar o fator da relação água/cimento, conforme estabelecido na Tabela 01. Para a determinação da resistência do concreto e da relação a/c, é possível utilizar a curva de Abrams, indicada no Gráfico 05.

Gráfico 05 - Curva de Abrams - Relação do fator água/cimento com a resistência do concreto aos 28 dias



Fonte: ABESC (2016).

Com base neste gráfico, foi determinada a relação a/c de 0,65, que proporciona um concreto com resistência mínima de 25 MPa. A partir da fixação destes parâmetros foi iniciada a segunda parte da dosagem, que consiste em estimar a quantidade de água por metro cúbico de concreto. Para Rodrigues (1998), a quantidade de água da mistura depende diretamente das características dos agregados empregados no concreto, sendo possível

determinar o consumo de água conforme a Tabela 06 abaixo, que relaciona o resultado do teste de abatimento do tronco de cone com a dimensão máxima característica do agregado graúdo.

Tabela 06 - Consumo de água estimado (L/m³)

Abatimento do Tronco de Cone (mm)	Dimensão máxima característica do agregado graúdo				
	9,5 mm	19,0 mm	25,0 mm	32,0 mm	38,0 mm
40 a 60	220 L/m³	195 L/m³	190 L/m³	185 L/m³	180 L/m³
60 a 80	225 L/m³	200 L/m³	195 L/m³	190 L/m³	185 L/m³
80 a 100	230 L/m³	205 L/m³	200 L/m³	195 L/m³	190 L/m³

Fonte: Rodrigues (1998)

De acordo com a tabela 06 acima, foi estabelecido o abatimento de tronco de cone de 80 a 100 mm, que proporciona boa trabalhabilidade. A dimensão máxima do agregado graúdo é de 19 mm, o que resulta em consumo de água de 205 L/m³. Após determinado o consumo de água da mistura, a terceira parte da dosagem consiste em calcular o consumo de cimento, por meio da Equação 2 abaixo:

$$C = \frac{Ca}{a/c} \quad (2)$$

Sendo:

C: Consumo de Cimento (kg/m³);

Ca: Consumo de água (L/m³);

a/c: Relação água/cimento (kg/kg).

A partir dessa equação, o consumo de cimento obtido para o traço do concreto foi de 315,40 Kg/m³. A quarta parte da dosagem é referente a determinação do consumo de agregado graúdo (Cb) por metro cúbico de concreto, sendo que, Conforme a Tabela 07, desenvolvida a partir de experimentos pela ABCP, por meio da relação entre a dimensão máxima característica do agregado graúdo, com o módulo de finura do agregado miúdo, é possível determinar o volume compactado a seco do agregado graúdo.

Tabela 07 - Volume agregado graúdo por metro cúbico de concreto

MF	D _{máx} (mm)				
	9,5 mm	19,0 mm	25,0 mm	32,0 mm	38,0 mm
1,8	0,645	0,770	0,795	0,820	0,845
2,0	0,625	0,750	0,775	0,800	0,825
2,2	0,605	0,730	0,755	0,780	0,805
2,4	0,585	0,710	0,735	0,760	0,785
2,6	0,565	0,690	0,715	0,740	0,765
2,8	0,545	0,670	0,695	0,720	0,745
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685
3,6	0,465	0,590	0,615	0,640	0,665

Fonte: Rodrigues (1998)

Considerando o diâmetro máximo do agregado graúdo e o módulo de finura da areia, o volume compactado a seco do agregado graúdo por metro cúbico de concreto resultante da Tabela 07 é de 0,76. A partir disso, foi estimado o consumo de agregado graúdo por metro cúbico de concreto conforme a Equação 3 abaixo, que resultou em um valor de 1117,20 Kg/m.:

$$Cb = Vbc \times MUc \quad (3)$$

Sendo:

Cb: Consumo de agregado graúdo (kg/m³);

Vbc: Volume compactado seco do agregado graúdo por metro cúbico de concreto;

MUc: Massa unitária do agregado graúdo (kg/m³).

Por fim, após determinados todos os parâmetros acima e, como última etapa do processo de dosagem do concreto foi feita a estimativa do consumo de agregado miúdo (Ca),

que é obtido por meio de uma relação de subtração dos volumes de cimento, água e agregado graúdo de um metro cúbico de concreto, conforme Equação 4 abaixo.

$$Vm = 1 - \left(\frac{C}{\rho_c} + \frac{Cb}{\rho_b} + \frac{Ca}{\rho_a} \right) \quad (4)$$

Sendo:

V_m: Volume do agregado miúdo (m³);

C: Consumo de Cimento (kg);

ρ_c: Massa específica do cimento (kg/m³);

C_b: Consumo de agregado graúdo (kg);

ρ_b: Massa específica do agregado graúdo (kg/m³);

C_a: Consumo de água (kg);

ρ_a: Massa específica da água (kg/m³).

Esse volume resultou em um valor de 0,306, aplicado posteriormente na Equação 5 abaixo, para obter o consumo de agregado miúdo por metro cúbico de concreto, que é de 798,66 kg/m³.

$$Cm = \rho_m \times V_m \quad (5)$$

Sendo:

C_m: Consumo de agregado miúdo (kg);

ρ_m: Massa específica do agregado miúdo (kg/m³);

V_m: Volume do agregado miúdo (m³).

Uma vez realizados todos estes procedimentos, foi determinado o traço final dos materiais da mistura do concreto, quantificados com base em uma unidade de cimento, sendo

representado na seguinte ordem: cimento; agregado miúdo; agregado graúdo; fator água/aglomerante, conforme Equação 6 a seguir.

$$1, 0: \frac{C_m}{C}: \frac{C_b}{C}: \frac{C_a}{C} \quad (6)$$

Assim, o traço final da mistura é 1,0 : 2,53 : 3,54 : 0,65, sendo este traço o padrão para o concreto referência, servindo como base para a dosagem dos traços com a substituição de 10% do teor de cimento pelas adições pozolânicas listadas, sendo esse traço modificado para 0,90 : 0,10 : 2,53 : 3,54 : 0,65, na ordem de cimento, pozolana, agregado miúdo, agregado graúdo e fator água/aglomerante. O balanceamento das quantidades foram calculadas conforme a Equação 7 a seguir:

$$C = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_c} + \frac{a}{\rho_a} + \frac{b}{\rho_b} + x} \quad (7)$$

Sendo:

C: Consumo de cimento (kg/m³);

ρ_c : Massa específica do cimento (g/cm³);

a: Valor do Traço referente ao agregado miúdo;

ρ_a : Massa específica do agregado miúdo (g/cm³);

b: Valor do Traço referente ao agregado graúdo;

ρ_b : Massa específica do agregado graúdo (g/cm³);

x: Relação água/aglomerante

Em adição a essa equação, para cada material pozolânico adicionado em forma de substituição de 10% do teor de cimento, deve ser adicionada na divisão a relação entre o valor do traço e sua respectiva massa específica (g/cm³). Após a aplicação da equação 7 foram calculados os consumos específicos de cada material, mantendo sempre o mesmo traço e

relação a/agl, alterando apenas a substituição de 10% do teor de cimento por sílica ativa, metacaulim e cinza volante. Estes valores estão representados na tabela 08 a seguir:

Tabela 08 - Consumo de materiais por metro cúbico de concreto para os diferentes traços

Denominação do Traço	Consumo de Cimento (kg/m³)	Consumo de areia (kg/m³)	Consumo de brita 1 (kg/m³)	Consumo de Água (L/m³)	Adição Pozolânica (kg/m³)
Traço Ref	315,40	798,66	1117,20	205,00	0,00
Traço SA	314,52	795,74	1113,40	224,88	31,45
Traço Meta	315,18	797,39	1115,72	225,35	31,52
Traço CV	313,94	794,27	1111,35	224,47	31,39

Fonte: Autor (2021).

3.4 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

A moldagem e cura dos corpos de prova foi realizada de acordo com os critérios estabelecidos pela NBR 5738 (ABNT, 2016), utilizando moldes cilíndricos, com dimensões 10 cm x 20 cm. Foram moldados três corpos de prova para cada traço, para cada idade de cura e para cada ensaio realizado, sendo para a determinação da resistência à compressão, absorção por capilaridade e profundidade de carbonatação, com a cura realizada em câmara úmida, nas idades de 7, 14 e 56 dias. A quantidade de CP fabricados está indicado na Tabela 09 a seguir, devidamente especificados para cada ensaio e traço, sendo no total fabricados 60 corpos de prova, que totalizam um volume de 100 L de concreto.

Tabela 09 - Quantidade de corpos de prova por traço e por ensaio

Denominação do Traço e Ensaio	Traço Ref	Traço SA	Traço Meta	Traço CV
Ensaio Resistência Compressão 7 dias	3	3	3	3
Ensaio Resistência Compressão 14 dias	3	3	3	3
Ensaio Resistência Compressão 56 dias	3	3	3	3
Ensaio de Absorção por Capilaridade 28 dias	3	3	3	3
Ensaio de Absorção por Capilaridade e Penetração de Carbonatação 63 dias	3	3	3	3
Total de Corpos de Prova por Traço	15	15	15	15
Total de Corpos de Prova Fabricados	60			

Fonte: Autor (2021).

A fabricação do concreto ocorreu no Laboratório de Tecnologias da Construção (LATEC) da Univates, utilizando a aparelhagem fornecida pela instituição. Primeiramente, foram separados os materiais para cada traço, sendo as quantidades especificadas na Tabela 10, considerando uma majoração de 10% no volume total de corpos de prova e, uma majoração final de 10% para cada material, para garantir a realização da concretagem de cada traço em uma mesma betonada.

Tabela 10 - Quantidade de materiais para a fabricação do concreto por traço

Denominação do Traço Materiais	Traço Ref	Traço SA	Traço Meta	Traço CV
Cimento (kg)	8,72	8,70	8,71	8,70
Brita (kg)	22,10	22,00	22,04	22,00
Areia (kg)	30,90	30,80	30,85	30,72
Água (kg)	5,67	5,65	5,66	5,65
Sílica Ativa (kg)	-	0,87	-	-
Metacaulim (kg)	-	-	0,87	-
Cinza Volante (kg)	-	-	-	0,87

Fonte: Autor (2021).

A partir da quantificação dos materiais necessários para a concretagem dos corpos de prova para cada traço, os materiais foram separados em baldes e pesados em balanças de precisão, para após iniciar o processo de fabricação do concreto, utilizando betoneira de 120 litros, suficiente para a concretagem de cada traço, sendo que, a cada nova betonada, a betoneira passava por um processo de lavagem, para que não ocorressem interferências nos traços.

Para o manuseio do concreto foram utilizadas a colher e a concha de pedreiro e, para a realização do *Slump Test*, foram utilizados o tronco de cone metálico e seu complemento, a haste metálica de compactação, a placa de apoio para o cone e a trena metálica. Além disso, é importante ressaltar que os materiais foram devidamente e pesados em balanças de precisão de capacidade de 60 kg e 3 kg, de acordo com as quantidades estabelecidas na Tabela 10. Após a pesagem, estes materiais foram separados e organizados em baldes para facilitar a fabricação do concreto. Estes procedimentos foram realizados separadamente para cada traço.

Para a produção do concreto, foi inicialmente colocado na betoneira toda a quantidade de brita, seguido por metade da quantidade de água, misturando esses dois materiais por 2 minutos. Após, foi adicionado todo o cimento e toda a areia, seguido pelo restante da água, realizando a mistura na betoneira até a completa homogeneização dos materiais. Para os traços com as pozolanas, estes materiais foram adicionados na produção do concreto depois de incluído todo o cimento, bem como a mistura já estando homogênea.

Após concluído, foi realizado o teste de teor de argamassa da mistura, utilizando uma colher de pedreiro para o alisamento do concreto dentro da betoneira, verificando que esse teor se encontrava adequado para o traço do concreto, conforme indicado na Figura 05 a seguir, uma vez que não ocorreu a separação dos materiais, nem exsudação da água.

Figura 05 - Concreto finalizado e verificação do teor de argamassa



Fonte: Autor (2021).

Finalizado esse processo e tendo em vista que o teor de argamassa estava adequado, foi realizado o *Slump Test* para verificar o abatimento do tronco de cone do concreto, seguindo as especificações da NBR 16889 (ABNT, 2020) e NBR 8953 (ABNT, 2013). O teste resultou em um valor de 100 mm para todos os traços, atingindo os resultados esperados, uma vez que os traços foram dimensionados para um abatimento de 80 mm a 100 mm. Além disso, foi observado que o concreto fabricado apresentou boa aderência e nenhuma exsudação. O ensaio de abatimento do tronco de cone está indicado na Figura 06.

Figura 06 - Ensaio de abatimento do tronco de cone do concreto



Fonte: Autor (2021).

Uma vez realizados estes ensaios e atendidos os parâmetros estabelecidos nesta pesquisa, foi executada a moldagem dos corpos de prova conforme a NBR 5738 (ABNT, 2016), sendo que as formas foram previamente separadas, recebendo a aplicação de desmoldante. Após, o concreto foi adicionado em duas camadas, sendo feito o adensamento de cada camada com haste metálica.

A seguir, na Figura 07, estão representados os corpos de prova concretados conforme as quantidades indicadas na Tabela 09. Após 24 horas da concretagem, os CP foram retirados

dos moldes e colocados em câmara úmida para iniciar o processo de cura, conforme estabelecido pela NBR 5738 (ABNT, 2016).

Figura 07 - Corpos de prova concretados.



Fonte: Autor (2021).

3.5 Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova cilíndricos de concreto serão realizados no Laboratório de Tecnologia da Construção (LATEC) da Univates, com o equipamento prensa hidráulica da marca Solotest, de acordo com todos os procedimentos exigidos pela NBR 5739 (ABNT, 2018), conforme as misturas indicadas no item 3.1.1.

Para a realização dos ensaios de compressão, primeiramente os corpos de prova foram retificados, para que pequenas deformações não comprometessem os resultados. Após a retificação dos CP, estes foram então rompidos na prensa, conforme Figura 08, sendo esse processo realizado para 3 corpos de prova de cada traço, para as idades de 7, 14 e 56 dias de cura úmida, resultando no rompimento de 36 CP.

Figura 08 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: Autor (2021).

Após a realização destes ensaios, foi possível obter os valores da resistência à compressão para cada um dos traços estudados em suas respectivas idades de cura, realizando uma média aritmética entre as três resistências dos corpos de prova de cada traço. Os resultados deste ensaio estão representados no capítulo 4 desta pesquisa.

3.6 Absorção de Água por Capilaridade

Os corpos de prova de concreto também foram submetidos ao ensaio de absorção de água por capilaridade, conforme procedimentos da NBR 9779 (ABNT, 2015), sendo realizados para todas as misturas indicadas no item 3.1.1. Após a cura em câmara úmida por

28 dias, os corpos de prova foram retirados e colocados em estufa a 105 °C para secagem durante um dia.

Após a secagem e com os corpos de prova em temperatura ambiente, o ensaio de absorção foi iniciado, realizando primeiramente a pesagem dos CP secos. Posteriormente, foi feita a marcação dos corpos de prova em 5 mm acima da sua face inferior, posicionando em contato com a água até a altura desta marcação, permanecendo nessas condições por 72 horas. Foram utilizados três corpos de cada traço fabricado. O desenvolvimento deste ensaio está representado na Figura 09 a seguir.

Figura 09 - Ensaio de absorção por capilaridade

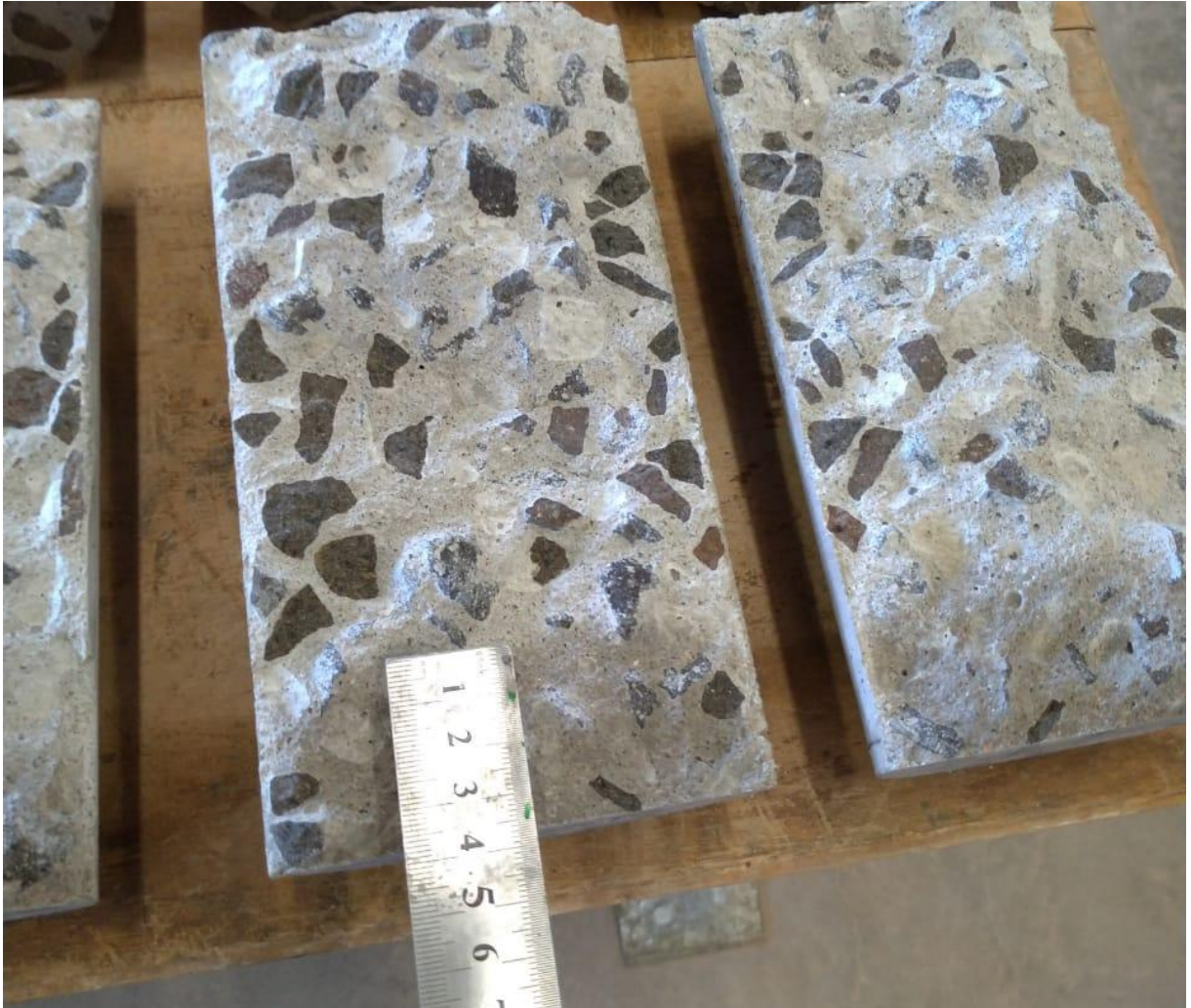


Fonte: Autor (2021).

As medições para coleta de dados foram realizadas com 3, 6, 24, 48 e 72 horas, sendo feita a pesagem dos corpos de prova, para realizar a comparação da massa seca e massa úmida

em cada horário determinado. Após as 72 horas, os CP foram rompidos de forma diametral, na prensa hidráulica, para obter a altura de absorção da água, conforme indicado na Figura 10.

Figura 10 - Medição da altura de absorção de água



Fonte: Autor (2021).

Esse ensaio foi realizado em 24 corpos de prova, 12 destes ficaram 28 dias em câmara úmida, e os outros 12 ficaram 7 dias em câmara úmida e 56 dias câmara de carbonatação, totalizando a idade de 63 dias, sendo possível verificar quais os níveis de porosidade do concreto, uma vez que com a adição de diferentes materiais, a distribuição dos poros e vazios da estrutura pode variar, comparando esses parâmetros e relacionando com a resistência à compressão e profundidade de carbonatação. Os resultados deste ensaio também estão apresentados no capítulo 4.

3.7 Carbonatação Acelerada

3.7.1 Câmara de Carbonatação Acelerada

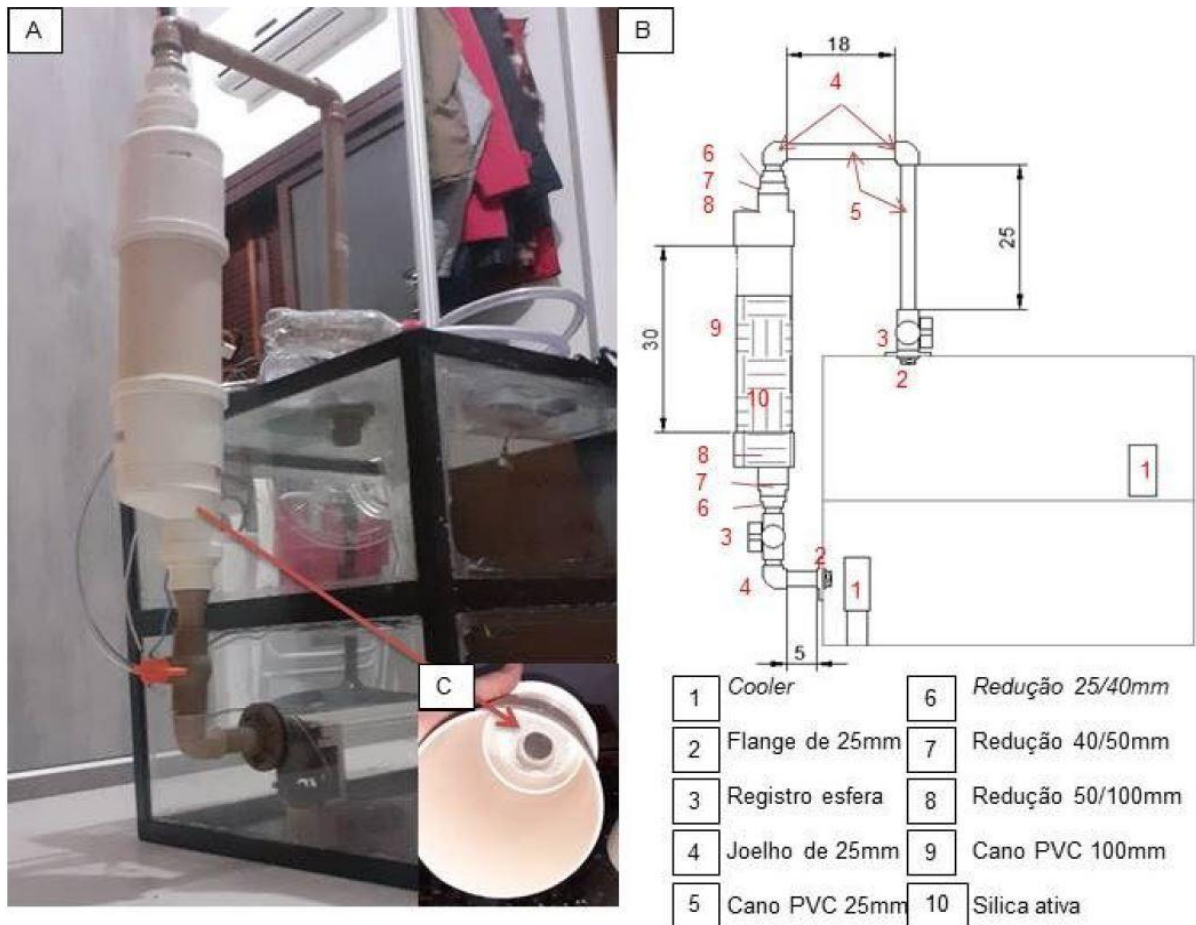
O ensaio de carbonatação acelerada dos corpos de prova de concreto foi realizado por meio da utilização de uma câmara de carbonatação, que utiliza reagentes químicos como fonte para a geração de CO_2 , com a utilização de um sistema de controle dos níveis deste elemento, bem como de temperatura e umidade, simulando uma situação real.

Para a realização do ensaio de carbonatação acelerada, foi utilizada a câmara de carbonatação construída por Scheeren (2020), que consiste em uma câmara de dimensões 50cm x 62cm x 50cm (largura x comprimento x altura). A câmara é constituída de chapas de aço em perfil cantoneira para a estrutura de sustentação, vidros recozidos para os fechamentos e vidro temperado para o suporte dos equipamentos que controlam os parâmetros necessários, utilizando silicone como material de fixação e vedação dos vidros e, uma borracha de látex para vedação da porta. Além disso, existe uma divisão interna permitindo o armazenamento dos corpos de provas em duas alturas, sendo que essa divisória foi confeccionada com aço laminado vazado, suportando o peso dos CP e permitindo a passagem do CO_2 .

Como equipamentos de controle dos parâmetros na câmara, Scheeren (2020) instalou um manômetro para verificação da pressão interna, *coolers* para a ventilação conectados a uma fonte de computador de 12 Volts, um termo higrômetro com sensor externo para verificação da umidade e temperatura, além de um sistema de secagem com sílica ativa seca, necessário para manter a concentração de CO_2 abaixo de 75%, sendo o valor definido para controle. Ainda, para verificar a estanqueidade do conjunto, foi realizada a pressurização da câmara com uma bomba pneumática até atingir 3 psi, obtendo-se uma variação mínima no manômetro instalado, confirmando que a câmara é estanque.

É possível visualizar a estrutura da câmara de carbonatação acelerada de Scheeren (2020) na Figura 11 a seguir, em que (A) refere-se a estrutura da câmara com o mecanismo de desumidificação acoplado, (B) é o projeto detalhado do mecanismo de desumidificação e, (C) detalha o cano de PVC 100mm com tela de nylon para controle da sílica ativa.

Figura 11 - Câmara de carbonatação acelerada



Fonte: Scheeren (2020)

Por fim, é importante ressaltar que a câmara de carbonatação construída por Scheeren (2020) atende aos parâmetros presentes nas pesquisas dos autores citados e, além disso, as suas dimensões são suficientes para acomodar todos os corpos de prova necessários para realizar o ensaio em uma só vez, buscando reduzir ao máximo a influência de interferências externas.

3.7.2 Ensaio de Carbonatação Acelerado

Para a realização do ensaio de carbonatação acelerado, foram utilizados 12 corpos de prova, 3 de cada traço, que ficaram 7 dias em câmara úmida curando. Após a cura, foram retificados nas seções circulares inferior e superior e, depois, secos em estufa a 105 °C por 24 horas, para garantir que a água interna remanescente não gerasse interferência nos resultados. Após retificados e secos, antes de iniciar o ensaio de carbonatação, foi necessário aguardar

que a temperatura dos CP entrasse em equilíbrio com a temperatura ambiente, processo que durou 24 horas e foi realizado no mesmo ambiente que a câmara de carbonatação estava localizada, um cômodo interno da residência.

Após os corpos de prova atingirem a temperatura ambiente de 24 ± 2 °C, sendo possível com a utilização de climatizador, estes foram posicionados na parte inferior da câmara, conforme Figura 12, proporcionando espaço suficiente para os 12 CP com uma distância mínima de 2cm entre eles, permitindo o fluxo livre do gás carbônico em todas as faces dos corpos de prova. Foi optado por posicionar todos na parte inferior, pois conforme já explicado no item 2.3.2, o CO_2 tende a se manter na parte mais inferior da câmara, mesmo com a ventilação constante.

Figura 12 - Corpos de prova posicionados na câmara de carbonatação



Fonte: Autor (2021).

Uma vez finalizados esses processos, foi realizado o condicionamento da câmara de carbonatação, elevando a umidade relativa para $70 \pm 5\%$ e a mantendo a temperatura em $24 \pm$

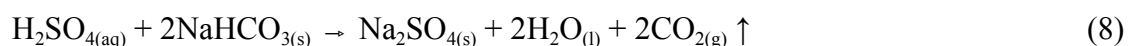
2 °C, registro indicado na Figura 13 conforme leitura do termo higrômetro. Somente após atingidos esses parâmetros foi dado início ao ensaio com a geração do gás carbônico.

Figura 13 - Leitura do termo higrômetro.



Fonte: Autor (2021).

A forma de obtenção do CO₂ teve como base a pesquisa de Coelho (2016), utilizando o processo de reação de dupla troca em meio aquoso entre o ácido sulfúrico e o bicarbonato de sódio, gerando sulfato de sódio e ácido carbônico, sendo que este ácido é altamente instável no ambiente, entrando rapidamente em decomposição e produzindo água e gás carbônico, conforme Equação 8 a seguir.



Por meio dessa reação, analisando as massas molares dos compostos, sabe-se que 98 gramas de ácido sulfúrico e 168 gramas de bicarbonato de sódio geram 2 moles de gás carbônico. Além disso, considerando que 1 mol de um gás nas condições de ambiente ideais,

temperatura em 25°C e pressão de 1 atm, esse gás ocupa um volume de 22,40 litros. Ainda, é importante considerar que foi utilizado como reagente uma solução aquosa de ácido sulfúrico com concentração de 30%. Os materiais utilizados para essa reação estão indicados na Figura 14 a seguir.

Figura 14 - Solução de ácido sulfúrico e bicarbonato de sódio



Fonte: Autor (2021).

A concentração de CO₂ determinada para o ensaio foi de 6%, que de acordo com a pesquisa de Pauletti (2009), foi a concentração que apresentou os melhores resultados, ficando o mais próximo possível de uma situação real. Dessa forma, foi calculada a quantidade necessária de cada um dos reagentes para proporcionar um ambiente interno na câmara de carbonatação com 6% de gás carbônico. Assim, sabendo que o volume útil da câmara, descontando a volume ocupado pelos corpos de prova é de 135,80 litros, sendo 6% desse valor o volume de 8,15 litros que devem ser ocupados por CO₂. Assim, por meio de uma simples regra de três, foi possível determinar as quantidades dos reagentes, que resultou em 30,58 gramas de bicarbonato de sódio e 59,43 gramas da solução ácido sulfúrico,

considerando que essa solução contém apenas 30% de concentração em massa deste ácido. Os materiais foram pesados em balança de precisão de capacidade de 500 gramas.

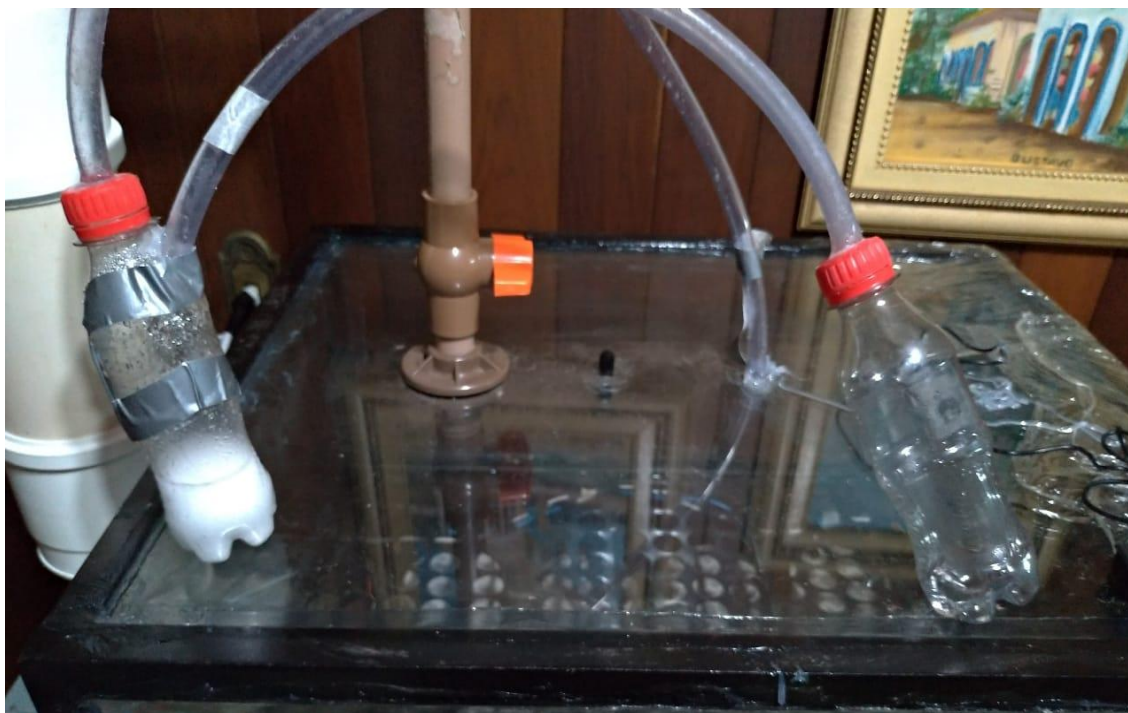
Após separadas as quantidades dos reagentes, para realizar as reações para obtenção do gás carbônico, foi aplicado o sistema proposto por Guimarães e Dorn (2015), que utiliza duas garrafas Politereftalato de Etileno (PET), derramando lentamente o ácido sobre o carbonato, fazendo com que a reação estabelecida na equação 8 ocorra, fazendo com que o ar dentro da câmara de carbonatação fique com 6% de concentração de CO₂. esse esquema e a reação podem ser visualizados na Figura 15 e 16, conforme segue.

Figura 15 - Preparação da solução de ácido sulfúrico e bicarbonato de sódio.



Fonte: Autor (2021).

Figura 16 - Reação entre a solução de ácido sulfúrico e bicarbonato de sódio.



Fonte: Autor (2021).

Por fim, após realizada a reação entre os reagentes e considerando a estanqueidade da câmara, os corpos de prova ficaram submetidos a esse ensaio por 56 dias, para posteriormente verificar a profundidade de carbonatação utilizando uma solução de Fenolftaleína. Destaca-se que todos os procedimentos adotados para estes ensaios seguem as recomendações da CPC 18 (RILEM, 1988).

3.7.3 Medição da Profundidade de Carbonatação

Após finalizado o ensaio em câmara de carbonatação acelerada por 56 dias, totalizando a idade de 63 dias do concreto, os 12 corpos de prova foram rompidos em sentido diametral em prensa hidráulica, o que permite que a profundidade de carbonatação seja mensurada em cada um dos CP dos diferentes traços estudados, verificando como cada adição pozolânica se comportou frente a este ensaio e na alteração do pH do concreto. Estes corpos de prova são os mesmos utilizados para a realização do ensaio de absorção por capilaridade aos 63 dias.

Após rompidas, as amostras foram imediatamente separadas e colocadas lado a lado para a aplicação da solução de fenolftaleína, que é composta por 1% de fenolftaleína e 99% de

uma solução contendo 70% de álcool etílico e 30% de água destilada. Essa solução foi aspergida com borrifador sobre as amostras a uma distância aproximada de 20 cm dos corpos de prova, seguindo as instruções da CPC 18 (RILEM, 1988). Além disso, no dia deste ensaio a temperatura ambiente era de 20 °C e a umidade relativa do ar apresentava valores de $70 \pm 5\%$, condições essas consideradas adequadas para a realização do ensaio.

Ainda em relação à solução de fenolftaleína, é possível realizar a medição da profundidade de carbonatação uma vez que, quando borrifada essa solução nas amostras, as áreas que apresentam pH acima de 9,5 ficam com a coloração rosada, indicando que não ocorreu carbonatação nessa área. Já nas áreas carbonatadas, a coloração apresentada é bem fraca, ficando praticamente da cor do concreto, indicando que o pH é inferior a 9,5, ou seja, a carbonatação está presente.

Para a medição da profundidade de carbonatação foi utilizado um paquímetro de precisão, sendo desconsideradas as áreas que apresentaram maiores deformações devido ao rompimento diametral foram desconsideradas e a região inferior desconsiderada, por não apresentar carbonatação, uma vez que ficou em contato direto com o fundo da câmara de carbonatação. Considerou-se as regiões laterais e superiores e mais lineares e homogêneas das amostras. É possível visualizar os corpos de prova carbonatados após a aplicação da fenolftaleína na Figura 17 a seguir.

Figura 17 - Corpos de prova carbonatados



Fonte: Autor (2021).

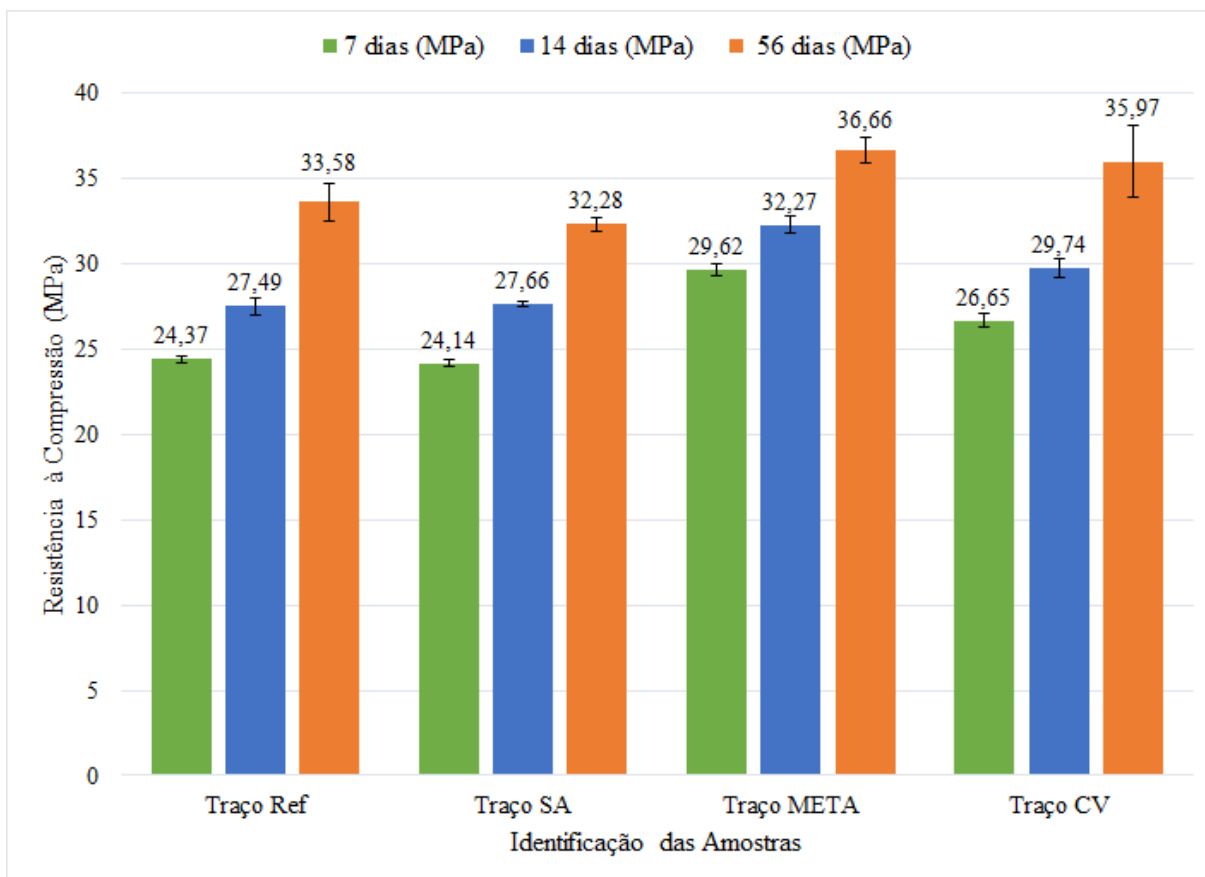
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados conforme a metodologia proposta no programa experimental, bem como a análise e discussão. Os resultados foram dispostos da seguinte forma: ensaios de resistência à compressão, absorção de água por capilaridade, e profundidade de carbonatação.

4.1 Resistência à Compressão do Concreto

No gráfico 06, a seguir, estão apresentados os resultados do ensaio de resistência mecânica à compressão simples dos concretos fabricados para cada traço, os quais foram obtidos nas idades de 7, 14 e 56 dias, além de estarem representados também os desvios encontrados. Destaca-se que os dados obtidos foram analisados por meio de tratamento de espúrio para a verificação da consistência destes resultados. Além disso, os resultados informados no gráfico são resultantes da média aritmética realizada entre as resistências encontradas.

Gráfico 06 - Resistência à compressão dos corpos de prova de concreto



Fonte: Autor (2021).

A partir dos 7 dias de idade já é possível perceber o aumento de resistência à compressão gerado pelas adições pozolânicas, sendo que nos traços com substituição do cimento por metacaulim e cinza volante, a resistência foi, respectivamente, 22% e 9% maior que o concreto referência. O concreto com a substituição do cimento por sílica ativa se manteve muito próximo ao de referência, porém com uma leve redução. Aos 14 dias de idade percebe-se o mesmo comportamento, em que os traços com metacaulim e cinza volante apresentaram um aumento de resistência de 17% e 8% em relação ao traço de referência, respectivamente. Já o traço com sílica continuou na mesma faixa de resistência que o de referência, porém com um leve aumento nesta idade.

Já aos 56 dias de idade é possível observar que em comparação com o traço referência, os concretos com substituição de cimento por metacaulim e por cinza volante apresentaram

um aumento no valor da resistência à compressão, aumentando em 9% e 7%, respectivamente. Já o traço com a substituição por sílica ativa apresentou uma diminuição da resistência em comparação com o concreto referência, reduzindo em 4%, o que pode ter sido ocasionado pela maior quantidade de água adicionada na mistura, uma vez que o fator a/agl foi fixado em 0,65.

Em suas pesquisas, Raisdorfer (2015) encontrou resultados similares para os traços com substituição de cimento por metacaulim e por sílica ativa, sendo que o primeiro apresentou um leve aumento na resistência à compressão em relação ao concreto referência, na faixa de 2%, enquanto o segundo reduziu essa resistência em 10%. Entretanto, em relação ao traço com substituição de 10% de cinza volante, o autor encontrou resultados muito negativos, em que a resistência à compressão foi reduzida em 35%, os quais contrastam com os resultados obtidos neste estudo. Essas diferenças podem ter relação com os traços utilizados, uma vez que apresentam teores diferentes, principalmente na relação a/agl , o que pode fazer com que este material se comporte de maneiras diferentes, evidenciando a necessidade de maiores estudos em relação a cinza volante.

Além disso, Neville e Brooks (2013) salientam que, para avaliar resultados de resistência à compressão em concretos com adições pozolânicas, é necessário que as leituras sejam realizadas em idades mais avançadas, uma vez que alguns destes materiais fazem com que a velocidade de hidratação do concreto seja reduzida, porém, gerando maiores resistências em idades maiores. Este aspecto pode ser considerado para os resultados obtidos para o traço de substituição por sílica ativa neste estudo, pois, pelo fato do concreto ter sido analisado em uma idade pouco avançada, é possível que a hidratação não tenha sido completa.

Possan (2004) confirma esta teoria, uma vez que em seus estudos com adição de porcentagens de sílica ativa que variam de 5% a 20%, foram observados aumentos nos valores na resistência à compressão na idade de 180 dias, quando comparados com os ensaios na idade de 28 dias.

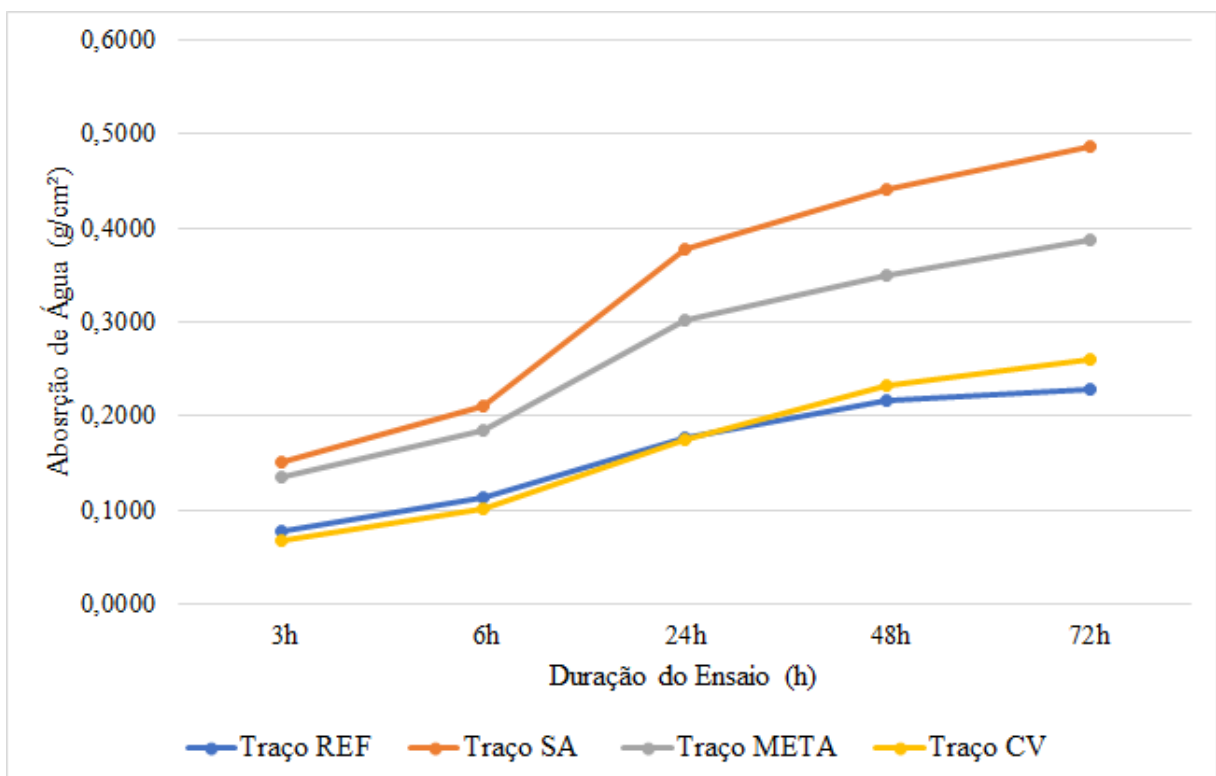
4.2 Absorção de Água por Capilaridade do Concreto

Os resultados da absorção de água por capilaridade foram apresentados em função do fator de sorvidade dos concretos e, como já mencionado na metodologia desta pesquisa, o ensaio foi realizado para os corpos de prova que ficaram 28 dias curando em câmara úmida e, para os concretos com 63 dias de idade, que ficaram 7 dias curando em câmara úmida e 56 dias carbonatando.

4.2.1 Absorção de Água por Capilaridade aos 28 dias de idade

No gráfico 7, a seguir, estão representados os valores da absorção de água por capilaridade dos concretos com idade de 28 dias. Neste caso, as adições minerais aumentaram a absorção do concreto, sendo que o traço referência apresentou o menor índice de sorvidade e o traço com sílica ativa o maior.

Gráfico 07 - Absorção de água por capilaridade aos 28 dias



Fonte: Autor (2021).

O aumento da absorção de água nos traços com as adições pozolânicas pode ter ocorrido pela maior quantidade de água utilizada para a fabricação destes concretos, uma vez que a relação a/agl foi fixada em 0,65, o que possivelmente gerou um aumento nas ligações dos poros capilares da estrutura. Em relação ao traço referência, os traços com substituição parcial do cimento por sílica ativa, metacaulim e cinza volante, aumentaram a absorção em 113%, 69% e 14%, respectivamente.

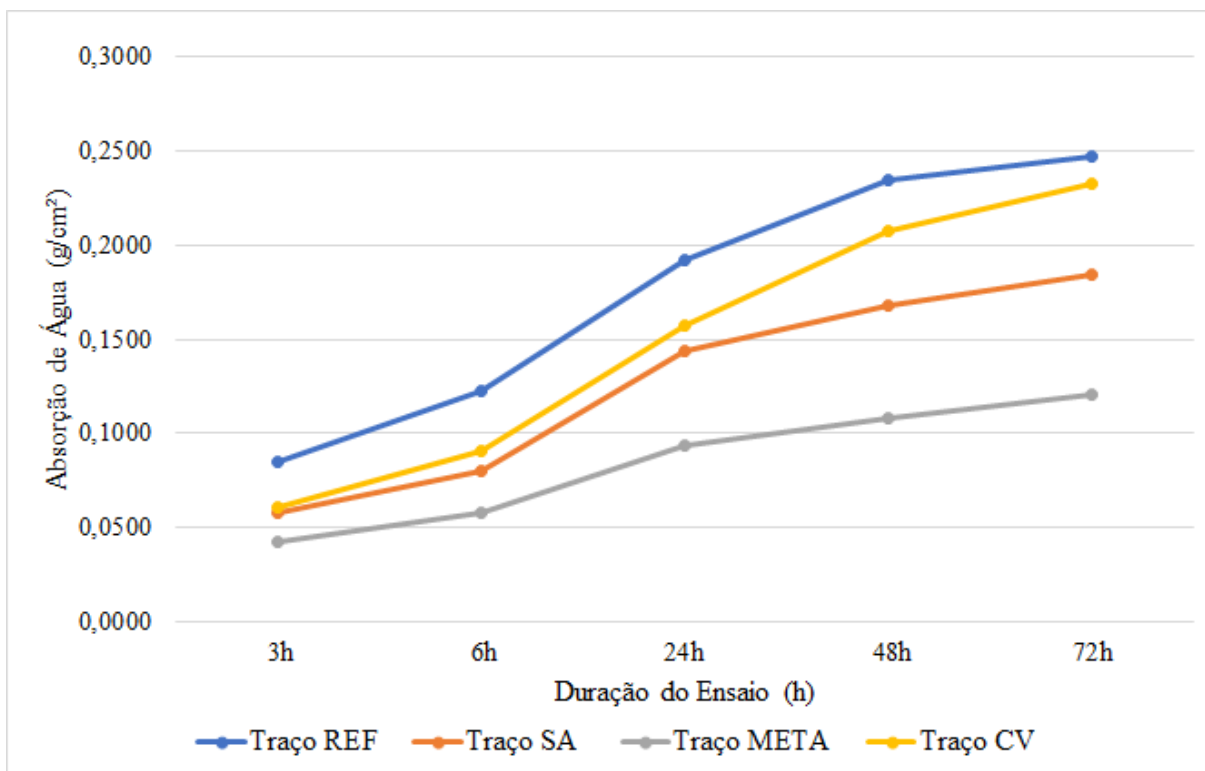
No Apêndice deste trabalho estão representados os gráficos referentes a absorção de água por capilaridade aos 28 dias, considerando cada corpo de prova de cada traço, bem como a média destes parâmetros.

Além disso, como mencionado anteriormente, de modo que o ensaio foi realizado em um idade não muito avançada do concreto, as pozolanas podem não ter hidratado completamente, visto que a situação se inverte nos resultados obtidos para os concretos que apresentam idade total de 63 dias, conforme representado no item 4.2.2 a seguir.

4.2.2 Absorção de Água por capilaridade aos 63 dias de idade

O ensaio de absorção de água por capilaridade também foi realizado nos corpos de prova que ficaram 7 dias curando em câmara úmida e, após, submetidos à carbonatação por 56 dias, totalizando 63 dias de idade. Os resultados deste ensaio estão indicados no gráfico 08 a seguir, sendo que todos os traços com adições pozolânicas apresentaram menores índices de absorção em comparação com o traço referência.

Gráfico 08 - Absorção de água por capilaridade aos 63 dias



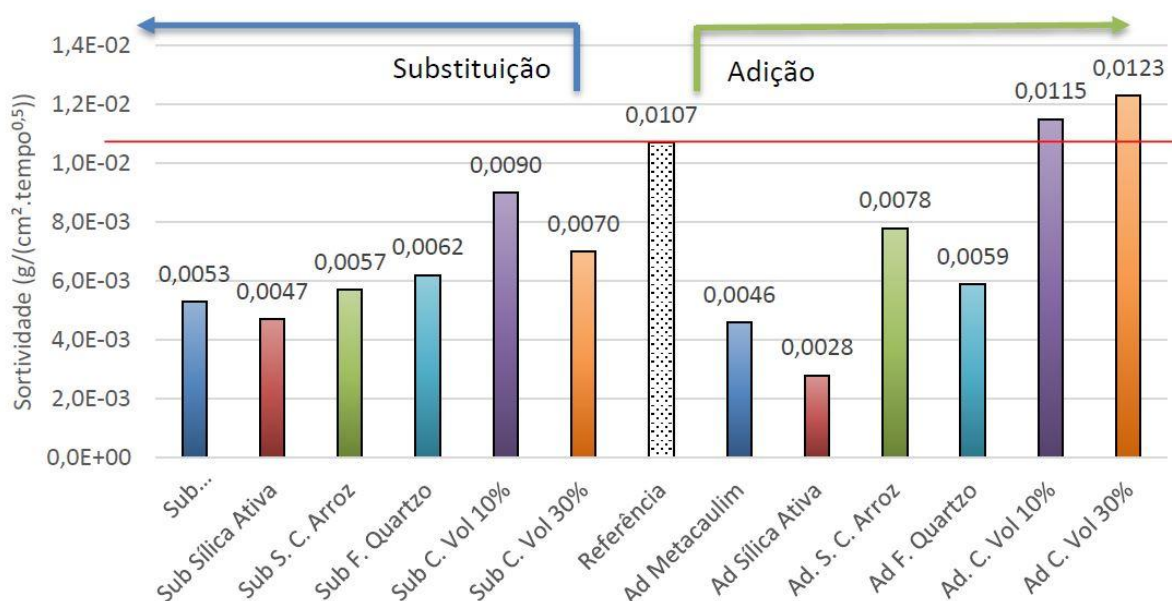
Fonte: Autor (2021).

Com base nos resultados obtidos, é possível observar que em relação ao concreto referência, o traço com a substituição parcial do cimento por metacaulim apresentou o menor fator de sorvidade, com uma redução de 51%. Para o traço com sílica ativa a redução deste índice foi de 25% e, para o traço com cinza volante, ocorreu uma redução de 6%. Desse modo, percebe-se a importância de analisar concretos com adições pozolânicas em idades mais avançadas, devido ao grande contraste entre os resultados encontrados para os ensaios de absorção realizados com 28 e 63 dias de idade.

No Apêndice deste trabalho estão representados os gráficos referentes a absorção de água por capilaridade aos 63 dias, considerando cada corpo de prova de cada traço, bem como a média destes parâmetros.

Raisdorfer (2015) encontrou resultados similares de absorção de água por capilaridade em sua pesquisa, sendo que os concretos com substituição parcial do cimento por metacaulim, sílica ativa e cinza volante apresentaram índices de absorção inferiores ao concreto referência. Os resultados obtidos por este autor podem ser visualizados no gráfico 09 a seguir.

Gráfico 09 - Coeficiente de sorvidade dos concretos estudados



Fonte: Raisdorfer (2015).

Dessa forma, analisando os resultados obtidos para as absorções por capilaridade dos concretos estudados, segundo Neville (2016), a redução dos índices de absorção é uma característica muito importante para aumentar a resistência do concreto frente a esse fenômeno, reduzindo as profundidades carbonatadas. Assim, seguindo essa teoria, seria possível considerar que todos os concretos fabricados com as adições pozolânicas, por apresentarem índices de sorvidade reduzidos, deveriam apresentar profundidades de carbonatação menores, quando comparados com o traço de referência.

4.2.3 Altura de Absorção de Água

Na tabela 11 a seguir é possível observar os dados obtidos na medição da altura interna da água absorvida pelo concreto durante o ensaio de absorção por capilaridade, após as 72 horas, realizando a média dos valores obtidos entre os três corpos de prova de cada traço, para cada idade do concreto ensaiado. Nota-se que existe uma grande diferença entre as alturas de água obtidas neste ensaio, sendo que os concretos que ficaram 28 dias curando em câmara úmida apresentaram uma altura bem inferior aos concretos que ficaram 7 dias na câmara úmida e 56 dias carbonatando.

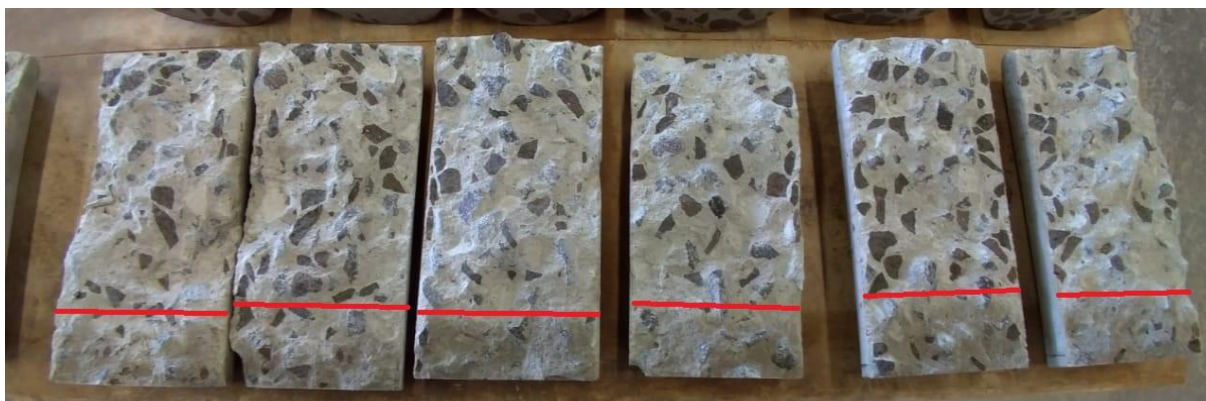
Tabela 11 - Altura interna de absorção de água

Denominação do Traço	Altura Água 28 dias (cm)	Altura Água 63 dias (cm)
Traço Ref	0,43	3,42
Traço SA	0,53	2,35
Traço META	0,37	1,40
Traço CV	0,47	3,05

Fonte: Autor (2021).

Os resultados obtidos para as alturas de água foram derivadas de uma média realizada entre as medições de cada corpo de prova de cada traço. Nas figuras 18, 19, 20 e 21 é possível visualizar os corpos de prova com idade de 63 dias rompidos de forma diametral para a medição da altura, a qual está demarcada na linha vermelha. A altura interna de água dos corpos de prova de 28 dias, por ser muito pequena, não é possível representar nas imagens.

Figura 18 - Altura interna de água traço referência



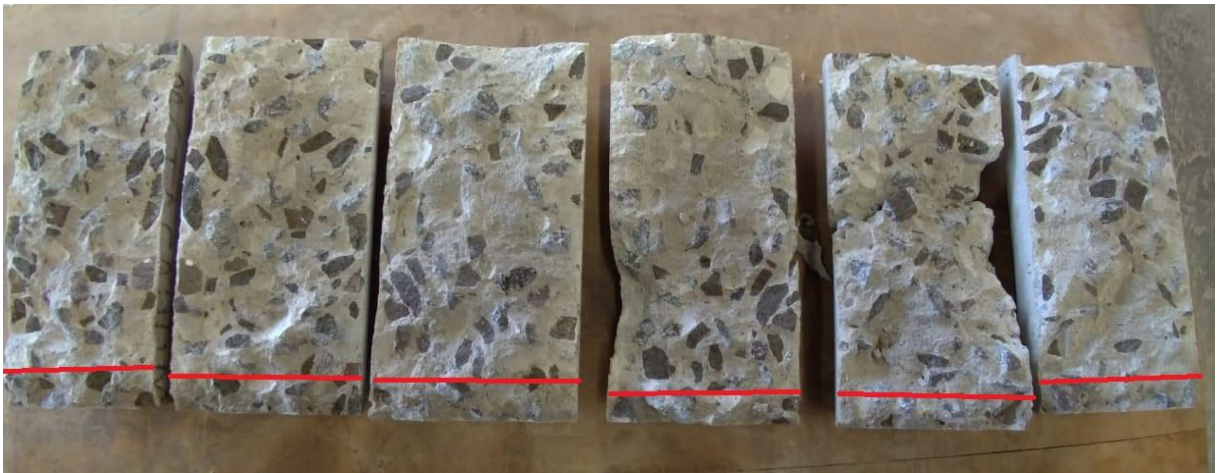
Fonte: Autor (2021).

Figura 19 - Altura interna de água traço sílica ativa



Fonte: Autor (2021).

Figura 20 - Altura interna de água traço metacaulim



Fonte: Autor (2021).

Figura 21 - Altura interna de água traço cinza volante



Fonte: Autor (2021).

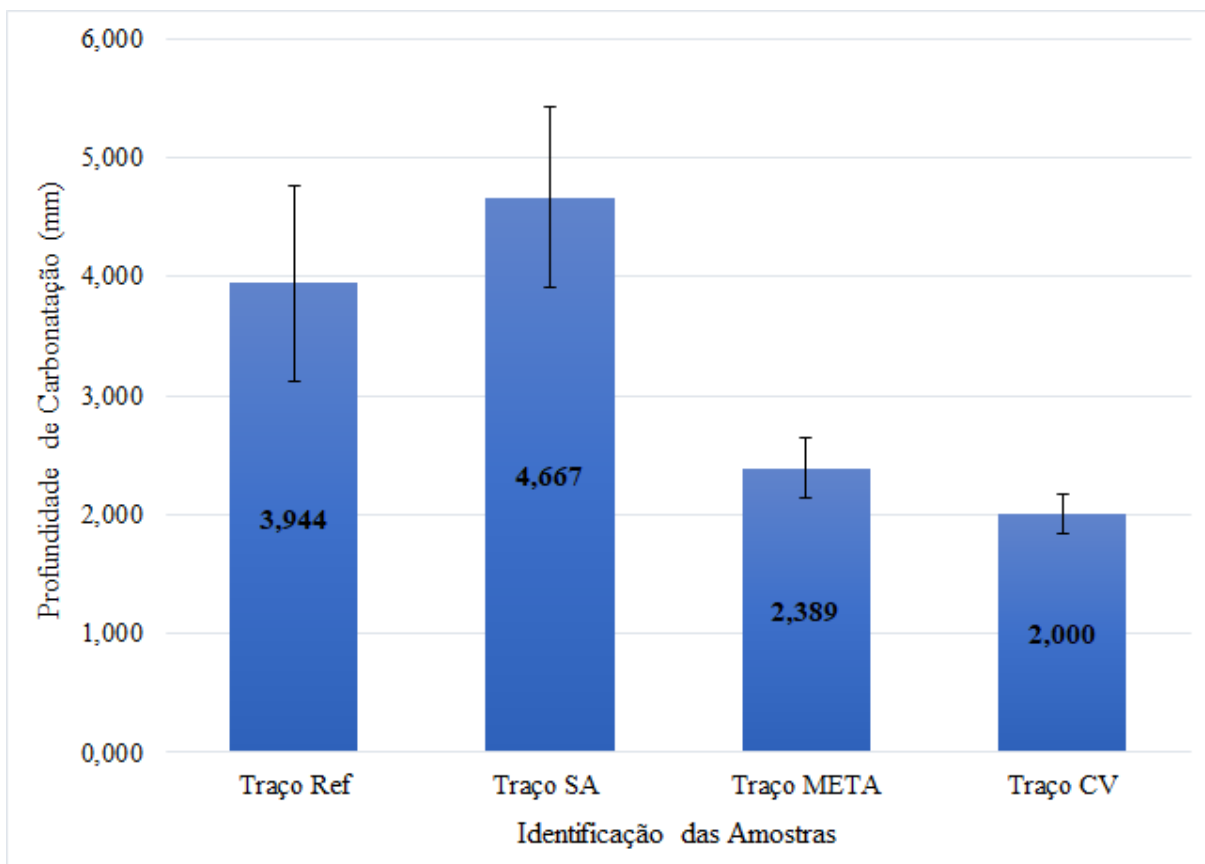
A diferença de altura encontrada nos resultados pode estar relacionada diretamente com o processo de cura desses concretos, uma vez que os concretos que foram retirados da cura úmida com 7 dias e, secos em estufa a 105 °C por 1 dia para serem colocados na câmara de carbonatação por 56 dias, tiveram a água de hidratação completamente removida, interrompendo o processo de cura, o que gerou um concreto mais poroso, mais permeável e com uma estrutura capilar mais conectada, permitindo uma maior absorção interna de água, porém com um menor índice de absorção, por apresentar uma estrutura mais densa e com menos vazios.

Já em relação aos concretos que foram curados por 28 dias em câmara úmida, percebe-se que sua estrutura é menos porosa, menos permeável e, além disso, apresenta menor quantidade de ligação de poros capilares, o que auxilia para a redução de absorção de água por esse meio.. Ainda, de acordo com Neville (2016), os concretos que apresentam baixa permeabilidade e porosidade são mais resistentes contra ataques de agentes agressivos, como a carbonatação, uma vez que o processo de difusão dos gases no interior da estrutura é reduzido, diminuindo as profundidades carbonatadas.

4.3 Resistência à Carbonatação

No gráfico 10, a seguir, estão representadas as profundidades de carbonatação medidas nos concretos após os 56 dias de ensaio de carbonatação acelerado, bem como os desvios encontrados. Para a análise dos resultados foi realizada a média entre as medidas de carbonatação das faces laterais e superiores de cada metade dos corpos de prova, os quais foram rompidos de forma diametral. Sendo assim, para cada corpo de prova de cada traço foram feitas 2 medições na lateral direita, 2 na lateral esquerda e 2 na parte superior do CP.

Gráfico 10 - Profundidade de carbonatação dos concretos



Fonte: Autor (2021).

Analizando os resultados, o concreto com a substituição parcial do cimento por sílica ativa foi o que apresentou a maior profundidade carbonatada, seguido pelo concreto referência, substituição por metacaulim e substituição por cinza volante, sendo este último o que teve a menor carbonatação entre os concretos estudados.

Com base nestes resultados, é possível afirmar que a substituição parcial do cimento por adições pozolânicas como o metacaulim e a cinza volante, na porcentagem de 10%, aumentam a resistência do concreto frente à carbonatação, sendo que, em relação ao traço referência, a profundidade carbonatada foi reduzida em 39% e 49%, respectivamente.

Em relação a estas mesmas características de substituição com os mesmos materiais, Raisdorfer (2015) encontrou resultados diferentes, conforme indicado no gráfico 02, em que os traços de substituição apresentaram um coeficiente de carbonatação maior que o concreto referência, sendo que para o traço com metacaulim e cinza volante, com índices de

substituição de 10% sobre o cimento, o autor percebeu aumentos da profundidade de carbonatação nos índices de 32% e 51%, respectivamente. Estas divergências entre os resultados podem ter relação direta com as diferenças dos traços e da relação a/agl utilizados nos estudos, bem como o tempo de cura em câmara úmida, o que gera grandes diferenças na estrutura interna do concreto.

Pires (2016) reforça essa tese, uma vez que percebeu em sua pesquisa que as variáveis que mais influenciam a resistência do concreto frente à carbonatação são a relação a/agl, o tipo e o tempo de cura e os tipos de adição utilizados, sendo que a característica com maior relevância é o fator a/agl. Silva (2011) ressalta que quanto menor for a relação a/agl do concreto, menor serão as profundidades de carbonatação, sendo que para fatores abaixo de 0,60 a redução é mais significativa, devido a uma estrutura capilar pouco conectada.

Para o traço com substituição parcial do cimento por sílica ativa, ocorreu um aumento de 18% na profundidade de carbonatação em relação ao concreto referência, similar ao resultado encontrado por Raisdorfer (2015), representado no gráfico 02, em que o traço com a substituição por sílica ativa teve a seu coeficiente de carbonatação 32% maior que o traço referência. Esta situação para o concreto com sílica ativa pode ter ocorrido devido aos ensaios serem realizados de forma acelerada, uma vez que essa pozolana é um mineral de alta reatividade com atividade de longa duração, sendo que ensaios mais longos e com cura úmida por mais tempo antes da carbonatação, poderiam favorecer a atuação da sílica ativa no concreto.

Essa teoria é confirmada por Pires (2016), que em sua pesquisa percebeu que as variações do tipo de adição pozolânica, bem como o tempo de reação deste mineral, influenciam diretamente no desempenho do concreto frente à carbonatação. Além disso, outro aspecto importante a ser citado é o fator a/agl, sendo que, como este fator foi fixado em 0,65 para todos os traços, os concretos com as pozolanas receberam mais água para sua fabricação, o que pode ter causado um comportamento diferente para a sílica ativa, uma vez que, de acordo com Possan (2004) e Pires (2016), o desempenho da pozolana adicionada no concreto tem ligação direta com a relação a/agl utilizada, sendo que para fatores inferiores a 0,45 as pozolanas não apresentam influência na profundidade carbonatada. Porém, ao aumentar essa

relação para fatores próximos de 0,70 a 0,80, para concretos com adição de 20% de sílica ativa, as profundidades de carbonatação podem ser aumentadas em até 35%.

Ainda em relação à sílica ativa, por se tratar de uma pozolana de alta reatividade, grande parte do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ é consumido para a sua hidratação, diminuindo a alcalinidade do concreto, acelerando e aumentando a carbonatação. As literaturas indicam que o teor limite para a substituição de cimento por sílica ativa nos concretos é de 15%, acima desta porcentagem essa pozolana passa a prejudicar as características do concreto. Porém, conforme ressalta Possan (2004), as porcentagens aceitáveis de substituição estão diretamente ligadas com a relação a/agl , ou seja, mesmo para índices inferiores a 15% de substituição do cimento por sílica ativa, podem ocorrer resultados negativos na resistência à carbonatação, pois sabe-se que a sílica ativa não apresenta bom desempenho em concretos com alta relação a/agl .

Porém, considerando que todos os concretos fabricados apresentam a mesma proporção de traço, foram expostos às mesmas condições de ensaios e acondicionamento, é possível estabelecer uma relação de comparação entre os resultados obtidos. Nas figuras 22, 23, 24 e 25 é possível observar as profundidades de carbonatação encontradas após a aplicação da fenolftaleína nos concretos do traço referência, sílica ativa, metacaulim e cinza volante, respectivamente.

Figura 22 - Profundidade de carbonatação traço referência



Fonte: Autor (2021).

Figura 23 - Profundidade de carbonatação traço sílica ativa



Fonte: Autor (2021).

Figura 24 - Profundidade de carbonatação traço metacaulim



Fonte: Autor (2021).

Figura 25 - Profundidade de carbonatação traço cinza volante

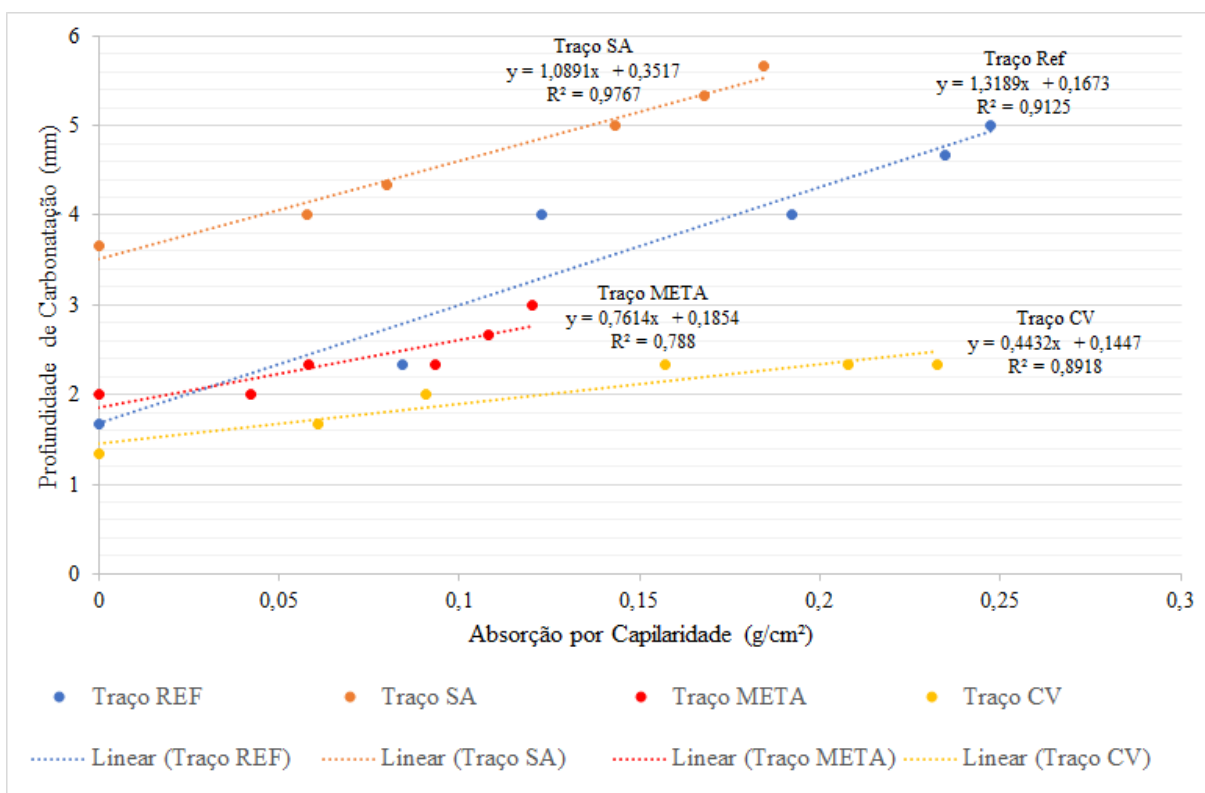


Fonte: Autor (2021).

4.4 Absorção por Capilaridade x Carbonatação

A partir da análise dos resultados obtidos, foi possível realizar uma comparação entre a absorção de água por capilaridade e a profundidade de carbonatação, verificando a relação entre o aumento da absorção para o aumento da carbonatação. Esta relação está indicada no gráfico 11 a seguir, sendo considerados para essa análise apenas os dados de absorção na idade de 63 dias, os quais representam mais corretamente as características de concretos com adições pozolânicas.

Gráfico 11 - Absorção por capilaridade x Profundidade de carbonatação



Fonte: Autor (2021).

Com base nos resultados, nota-se que os concretos do traço referência, traço com substituição parcial do cimento por sílica ativa e por cinza volante, por apresentarem um coeficiente de (R^2) maior que 0,89, indicam que essas relações têm alta assertividade. Isso confirma a tese de que concretos com maior absorção de água por capilaridade apresentam maiores profundidades de carbonatação, uma vez que a resistência a esse fenômeno tem ligação direta com a relação a/agl do concreto.

Em relação ao traço de substituição parcial do cimento por metacaulim, percebe-se que o valor do coeficiente (R^2) é menor que 0,80, o que pode indicar alguma inconsistência na relação absorção x carbonatação deste concreto. Esse índice de assertividade reduzido para esse traço pode ter relação direta com o comportamento do metacaulim, uma vez que foi o concreto que apresentou o menor índice de absorção por capilaridade, porém, não foi o concreto com a menor profundidade carbonatada. Isso pode ter ocorrido pelo fato de que este traço teve a maior resistência à compressão, o que demonstra uma maior atuação dessa pozolana, ou seja, o consumo de hidróxido de cálcio para a geração de resistência foi mais elevado neste caso, resultando em um concreto com alcalinidade reduzida, o que gerou um aumento na profundidade de carbonatação, mesmo o índice de sorvidade sendo o menor entre os traços estudados.

Raisdorfer (2015) encontrou uma relação similar para o traço com substituição parcial do cimento por metacaulim, percebendo que, mesmo que os índices de absorção por capilaridade sejam reduzidos com a adição dessa pozolana, o que indica uma estrutura capilar pouco conectada, o alto consumo da reserva alcalina nesse caso faz com a resistência à carbonatação do concreto seja reduzida, apresentando velocidades de carbonatação mais aceleradas, o que resulta em maiores profundidades de carbonatação.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do desenvolvimento desta pesquisa foi possível analisar o comportamento dos concretos com substituição parcial de cimento por pozolanas, sendo elas a sílica ativa, o metacaulim e a cinza volante, verificando as alterações nas características do material em relação à resistência à compressão, absorção de água por capilaridade e resistência à carbonatação, estabelecendo uma conexão entre elas, além de analisar se estas adições são benéficas ao concreto nas condições ensaiadas.

Em relação à resistência à compressão dos concretos, é possível afirmar que a utilização do metacaulim e da cinza volante em substituição a 10% do cimento geram um aumento na resistência aos 56 dias de idade. Porém, a sílica ativa quando adicionada desta forma, causa uma pequena redução na resistência característica para esta idade, o que demonstra que a retirada de parte do cimento faz com que a reserva de hidróxido de cálcio seja reduzida, não sendo a adição de sílica eficaz o suficiente neste caso para gerar aumento de resistência.

No que diz respeito à absorção de água por capilaridade, para os concretos ensaiados com 28 dias de idade, todos os traços com as adições pozolânicas apresentaram índices de absorção maiores que o concreto referência. Porém, ao realizar esse ensaio para os concretos com 63 dias de idade, essa situação se inverte, sendo o concreto referência àquele com maior absorção, quando comparado com os concretos pozolânicos, com ênfase para o traço de metacaulim, que apresentou o menor índice. Dessa forma, percebe-se que a análise de concretos com adições de pozolana devem ser realizados em idades mais avançadas, pois esses minerais são de alta reatividade, ou seja, necessitam de um tempo maior para as reações

ocorrerem. Dito isso, reforço a questão analisada sobre a sílica ativa ter reduzido a resistência à compressão do concreto, ou seja, caso os ensaios fossem realizados em idades maiores, a reação seria mais efetiva, podendo gerar assim um acréscimo nessa resistência.

Os resultados obtidos para a resistência do concreto frente à carbonatação foram promissores para os traços com substituição parcial do cimento por metacaulim e cinza volante, apresentando uma redução na profundidade carbonatada, em torno de 39% e 49% em relação ao traço referência, respectivamente. Considerando em uma situação real, com efeitos de carbonatação natural, essa redução impacta diretamente a vida útil do concreto armado, aumentando consideravelmente o tempo de exposição da estrutura em ambientes agressivos, sem que a carbonatação atinja a armadura e inicie o processo de corrosão.

Ainda em relação a carbonatação, o traço com substituição parcial do cimento por sílica ativa apresentou as maiores profundidades de carbonatação, superando o concreto referência, indicando que mesmo que a absorção tenha sido reduzida, bem como a porosidade e permeabilidade também, a diminuição da reserva alcalina foi determinante para acelerar o processo de carbonatação.

Dessa forma, ao analisar o comparativo entre as características de absorção por capilaridade e profundidade de carbonatação, por apresentarem um coeficiente de (R^2) consideravelmente alto, é possível afirmar que quanto menor for a absorção, menor serão as profundidades carbonatadas. Porém, a relação de (R^2) encontrado para o traço de metacaulim demonstra que a absorção sozinha não é um parâmetro definitivo para a análise da carbonatação, uma vez que fatores como a relação a/agl, tipo de adição, idade e tipo de cura e quantidade de reserva alcalina são fatores que influenciam diretamente na profundidade carbonatada.

Por fim, verificando a combinação dos resultados encontrados, é possível afirmar que os traços com substituição de 10% do teor de cimento por metacaulim e cinza volante se comportaram de forma positiva no concreto, em relação às características ensaiadas nesta pesquisa, especialmente no aumento da resistência à carbonatação. Contudo, fica evidente a necessidade de estudos mais aprofundados com a utilização destes materiais pozolânicos em substituição parcial ao cimento Portland, buscando encontrar um equilíbrio nos teores de

substituição, bem como na relação a/agl e tempo de cura, para encontrar uma faixa ótima de teores de substituição, uma vez que a resistência à carbonatação é influenciada diretamente por essas características, encontrando assim uma combinação final que seja possível de ser aplicada em situações cotidianas.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras**. Tradução e adaptação: Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo: Pini 1992. 104p.

ANDRADE, T.; SILVA, A. J. C. **Patologia das Estruturas**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, 2005.

ANN, K. Y. et. al. Service life prediction of a concrete bridge structure subjected to carbonation. **Construction and building materials**. v. 24, p. 1494-1501, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇO DE CONCRETAGEM – ABESC. **Concretos especiais maximizando o desempenho**. Disponível em: <<https://docplayer.com.br/2015061-Concretos-especiais-maximizando-o-desempenho.html>> Acesso em 15 ago. 2020

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211**: Agregados para Concreto - Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7217**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9779**: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Desempenho de edificações habitacionais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900-1**: Água para amassamento do concreto. Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16605**: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16889**: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

BAUER, L.A.F. **Materiais de Construção**. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 471 p.

BOGGIO, Aldo J. **Estudo Comparativo de Métodos de Dosagem de Concreto**. Dez, 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Porto Alegre.

BORGES, F. M, CARREIRA, T. T. **Métodos de Dosagem Usuais dos Principais Tipos de Concreto**: Uma Revisão Teórica. 2017. 63p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil). Curso de Engenharia Civil. Universidade do Sul de Santa Catarina. Palhoça.

CABRERA, J.; ROJAS, M. F. *Mechanism of hydration of the metakaolin-lime-water system – Cement Concrete Research*, v. 31, n. 2, p. 177-182, February, 2001.

CAMARGO, R. G. **Estudo de patologia em concreto armado e proposta de soluções: análise de caixa de areia no sistema de tratamento de efluentes em uma cooperativa de laticínios**. 2017. 113p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil). Curso de Engenharia Civil. Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. **Ação da carbonatação no concreto**. In: ISAIA, G. E. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. 1. Ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2011. V. 2. 1984p.

COELHO, V. A. **Desenvolvimento de uma câmara de carbonatação acelerada com obtenção de CO₂ através de reação de dupla troca e controle de umidade**. 2016. 71f. Dissertação (Bacharel) – Centro de Ciências exatas e Tecnológicas da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. Cruz das Almas, 2016.

DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais. In: ISAIA, G. C. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. v. 1, cap. 08 pg. 233-260, São Paulo, 2011.

DUAN, P.; SHUI, Z.; CHEN, W.; SHEN, C. *Influence of metakaolion pore structure-related properties and thermodynamic stability of hydrate phases of concrete in seawater environment*. **Construction and Building Materials**. v. 36, p. 947-953, 2012.

FERREIRA, A.; FRÉZ, J. C.; MEDEIROS, M. H. F. Reposição da Reserva Alcalina de concreto com adição pozolânica usando cal hidratada: um estudo sobre carbonatação acelerada. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 55, 2013, Gramado, RS. **Anais...** Rio de Janeiro. Instituto Brasileiro do Concreto, 2013.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013. 197 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás – UFG. Goiânia, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Setor de Tecnologia. Universidade Federal do Paraná – UFPR. Curitiba, 2003.

FERREIRA, R. M. **Otimização da Vida Útil das Estruturas de Betão Armado**. In: JORNADAS PORTUGUESAS DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS, 4., 2006, Lisboa. Jornada... Portugal, 2006. Disponível em: <<https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/7314/1/139.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2020.

FIGUEIREDO, C. R. **Estudo da carbonatação em estruturas de concreto armado em Brasília – Avaliação de pilares**. 2004. Tese de Doutorado, Publicação E.TD-003A/2004, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 218 p.

GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: Uma análise crítica a partir de métodos complementares** – Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, PPGECC, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GUIMARÃES, C. C.; DORN, R. C.. Efeito Estufa Usando Material Alternativo. **Química Nova na Escola**, São Paulo, v. 37, n. 2, p.153-157, maio 2015. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.5935/0104-8899.20150033>. Acesso em: 03 de abril de 2021.

HOPPE FILHO, J.; **Sistemas cimento, cinza volante e cal hidratada: mecanismos de hidratação, microestrutura e carbonatação do concreto** – (Tese de doutorado) – Escola politécnica da universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

KULAKOWSKI, M.P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 199 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2002.

LEEMANN, A. et al. *Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete*. **Cement & concrete composites**. v. 62, p. 33-43, 2015.

LIMA, Maryangela Geimba de. **Ação do Meio Ambiente sobre as Estruturas de Concreto**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.

LUCENA, C. M. **Avaliação da eficiência de uma câmara de carbonatação acelerada projetada e montada em laboratório**. 2016. 155f. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MEDEIROS, Marcelo; ANDRADE, Jairo; HELENE, Paulo. **Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto**. São Paulo: IBRACON, 2011.

MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloreto** – (Tese de Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

MEHTA, K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Microestruturas, Propriedades e Materiais**. 1. Ed. São Paulo: Ibracon, 2014. 669p.

MORAES, R. C. **Efeitos físicos e pozolânico das adições minerais sobre a resistência mecânica do concreto** – Dissertação de mestrado – Universidade de Santa Maria – Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2001.

NEPOMUCENO, Antonio Alberto. **Mecanismo de Transporte de Fluidos no Concreto**. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005.

NEVILLE, A. M.; BROOKS J. J. **Tecnologia do concreto** . Porto Alegre: Bookman, 2013. 448p.

NEVILLE, A M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p. Tradução: Ruy Alberto Cremonini.

PAPADAKIS, V. G. *Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation chloride ingress*. **Cement Concrete Research**. v. 33, p. 291-299, 2000.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. et al . *Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation*. **ACI Materials Journal**, Great Britain, v. XLVI, n.88, p. 363-373, 1991.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. *Hydration and carbonation of pozzolanic cements*. **ACI Materials Journal**. n. 89. p. 119-130. Mar-Apr 1992.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. *Reaction Engineering approach to the problem of concrete carbonation*. **AIChE Journal**. V. 35, n. 10, p. 1639-1650. Oct 1989.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. 2004. 178f. Dissertação (Mestrado para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C. **Estimativa de carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição** . 2009. 285f. Dissertação (Doutorado para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

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

PIRES, P. F. **Estudo da carbonatação avançada em concretos contendo adições minerais**. 2016. 144p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil para obtenção do título de Mestre em Engenharia da Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil. Universidade Federal de Goiás – UFG. Goiânia, 2016.

POGGIALI, Flávia. **Durabilidade de estruturas de concreto em usinas siderúrgicas**. Monografia (Especialização em Construção Civil), Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, 2009.

POSSAN, E. **Contribuição ao estudo da carbonatação do concreto com adição de sílica ativa em ambiente natural e acelerado**. 2004. 155p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil) – Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre, 2004.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão da vida útil das estruturas de concreto em ambiente urbano**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

PRUDÊNCIO JUNIOR, L. R; SANTOS, S.; DAFICO, D. A. **Utilização de Resíduos na Construção Habitacional: cinza de casca de arroz**. Santa Catarina: Finep, 2003. (Coletânea HABITARE).

RAISDORFER, J. W. **Influência Da Adição Ou Substituição De Adições Minerais Ao Cimento Portland: Efeitos Na Carbonatação, Absorção Capilar E Resistividade De Concretos**. 2015. 151p. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Civil para obtenção do título de Mestre em Engenharia da Construção Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Construção Civil – PPGECC. Universidade Federal do Paraná. Curitiba.

RECENA, F. A. P. **Dosagem e controle de qualidade de concretos convencionais de Cimento Portland**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2017. 260p.

RIBEIRO, D. V. et al. **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 272 p.

RILEM, *Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*. *CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. Materials and Structures, online*, v. XXI, n.4, p.453-455, 1988.

RODRIGUES, P. F. **Parâmetros de Dosagem de Concreto**. São Paulo. Associação Brasileira de Cimento Portland. 1998.

ROY S. K.; POH, K. B.; NORTHWOOD, D. O. *Durability of concrete – accelerated carbonation and weathering studies*. **Building and Environment**, v/n. 34, p. 507-606. 1999.

SALDANHA, F. J. M. **Desenvolvimento de um dispositivo de ensaio de carbonatação acelerada com controle de humidade relativa**. 2013. 91f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2013.

SANTOS, Maurício. **Deterioração das estruturas de concreto armado – estudo de caso**. Monografia (Especialização em Construção Civil), Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG. Belo Horizonte, 2012.

SCHEEREN, E. **Estudo Do Comportamento Da Carbonatação Em Concreto Com Adição De Fibras De Polipropileno**. 2020. 113p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil). Curso de Engenharia Civil. Universidade do Vale do Taquari. Lajeado.

SILVA, F. B. Patologia das construções: uma especialidade na Engenharia Civil. **Téchne**. v. 174, set. 2011. Disponível em: <<http://techne17.pini.com.br/engenhariacivil/174/artigo285892-3.aspx>>. Acesso em: 5 out. 2020.

SILVA, L. F. M.; ALVES, F. J. L.; MARQUES, A.T. **Materiais de construção**. Porto: Publindústria, 2013. 442p.

SOUZA, V. C. M; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. 1ª Edição. São Paulo: Editora Pini, 2009. 257 p.

TASCA, M. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas**: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura. 2012. 183p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria.

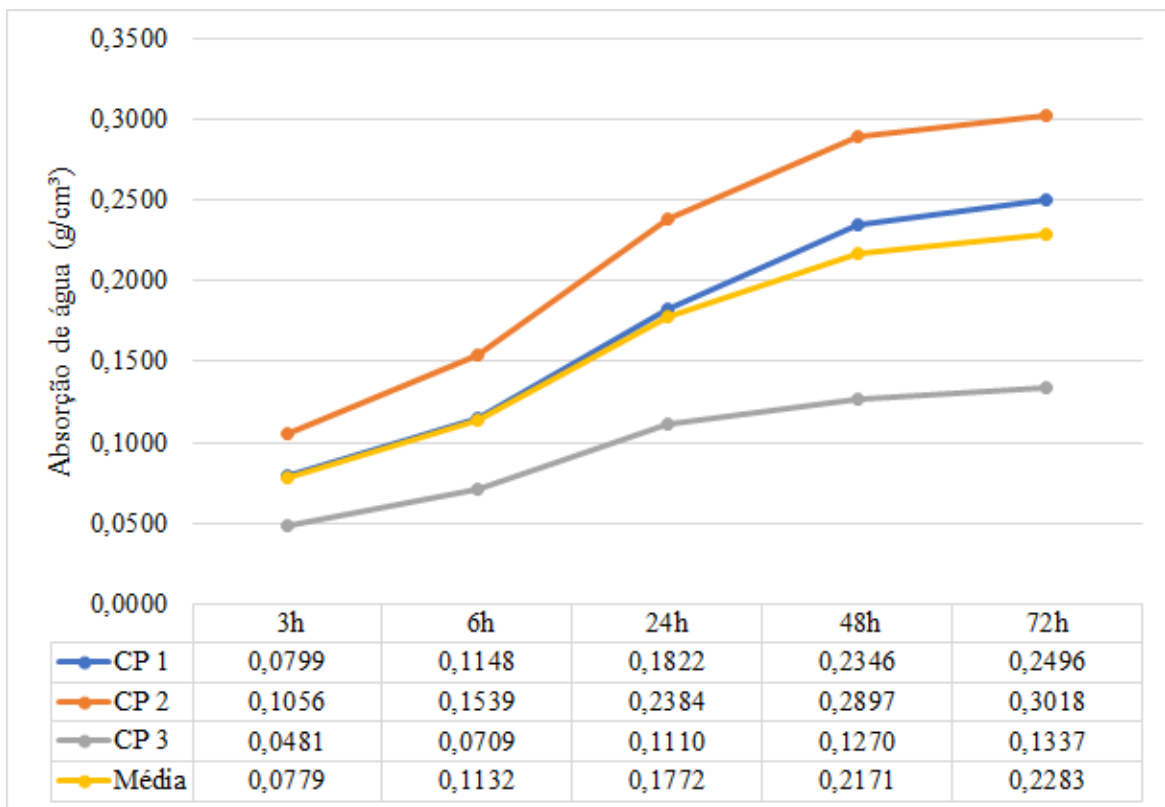
THIÉRY, M. *Modélisation de la carbonatation atmosphérique des bétons - Prise en compte des effets cinétiques et de l'état hydrique*. 2005. 347 f. (Thèse de doctorat), École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 2005.

VASCONCELOS, A.R.B; AKASAKI, J.L. Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz e borracha de pneu. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 10, p 77-90, jan./mar. 2010. Disponível em:<<https://www.scielo.br/pdf/ac/v10n1/v10n1a09.pdf>>. Acesso em: 21 set. 2020

ZHOU, Y. et al. *Carbonation-induced and chloride-induced corrosion in reinforced concrete structures*. **Journal of materials in civil engineering**, v. 27, p. 1-17, 2015.

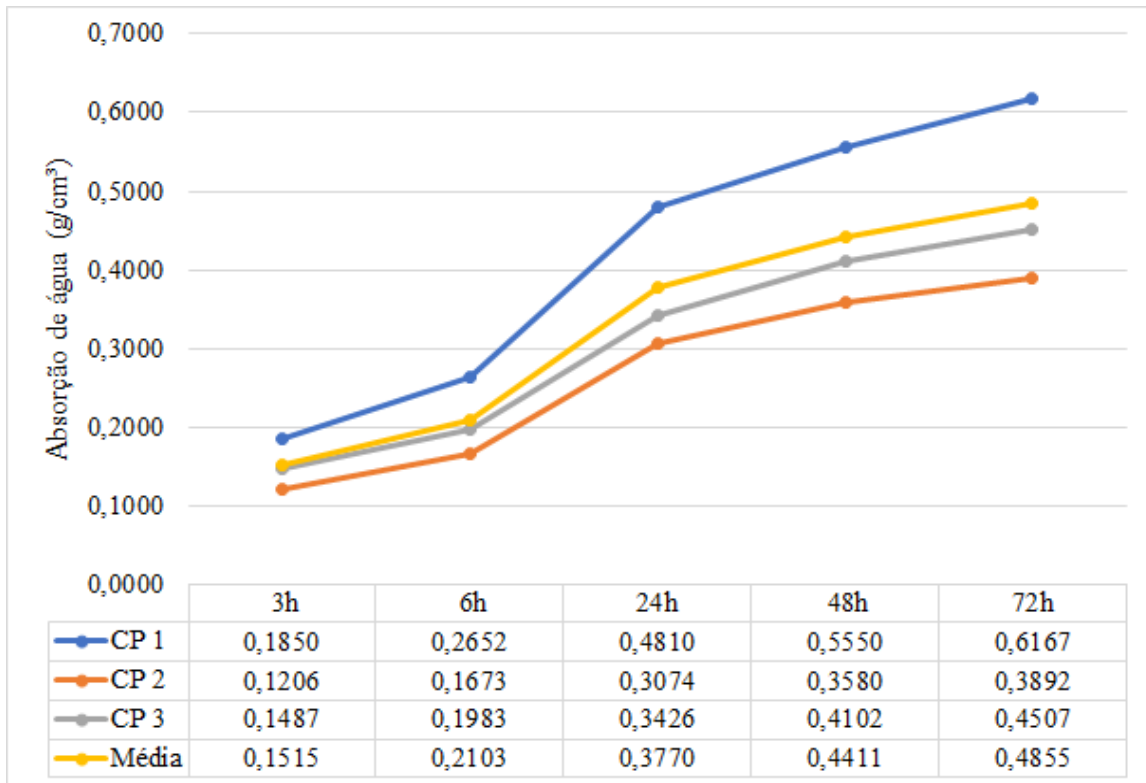
APÊNDICE

Absorção de água por capilaridade aos 28 dias traço referência



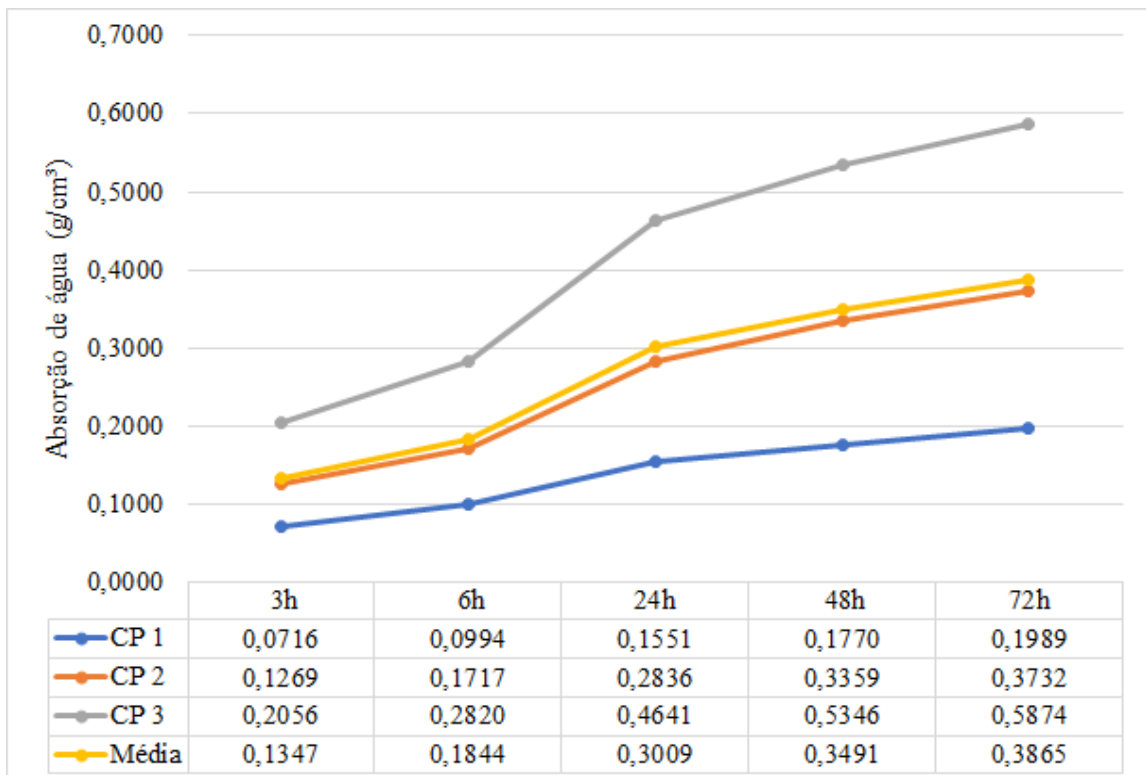
Fonte: Autor (2021).

Absorção de água por capilaridade aos 28 dias traço sílica ativa



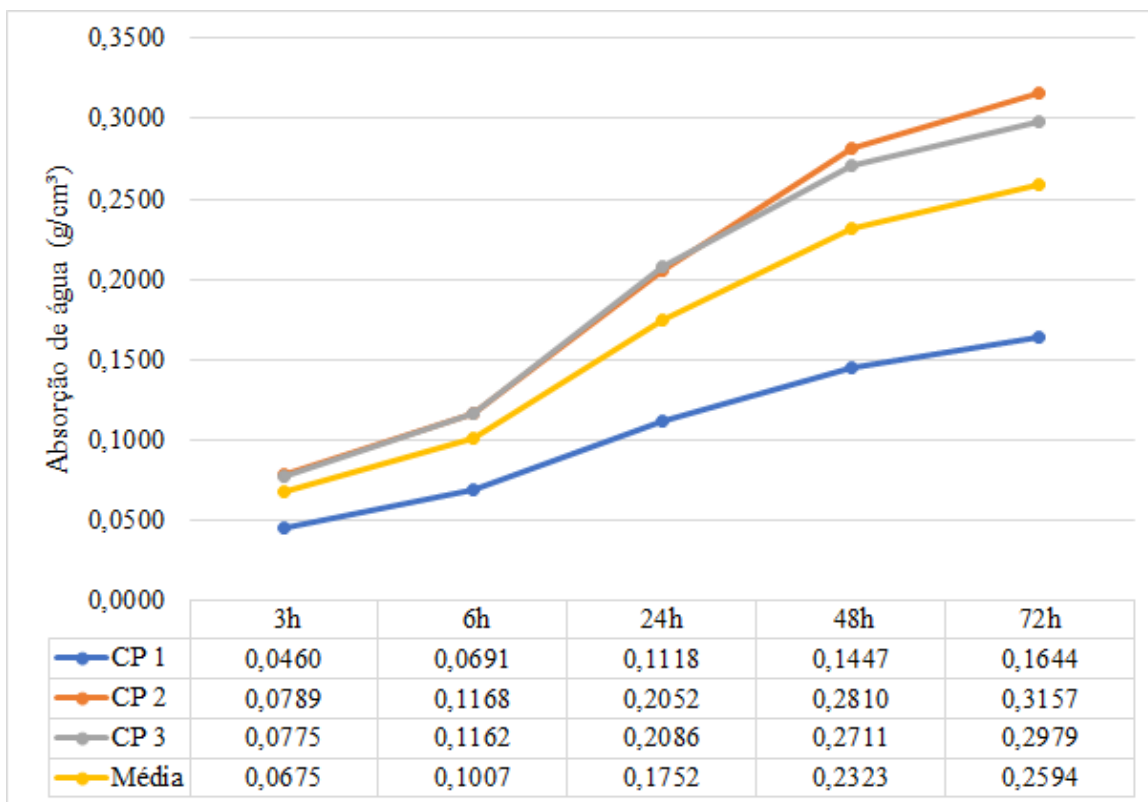
Fonte: Autor (2021).

Absorção de água por capilaridade aos 28 dias traço metacaulim



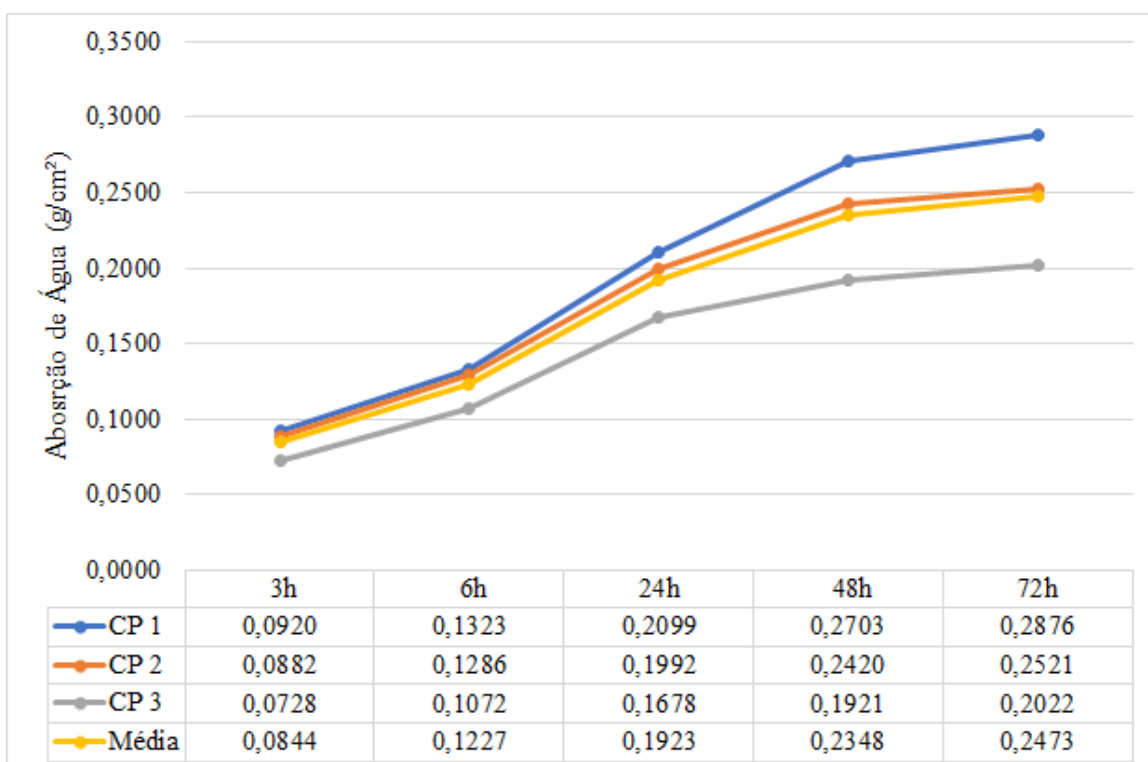
Fonte: Autor (2021).

Absorção de água por capilaridade aos 28 dias traço cinza volante



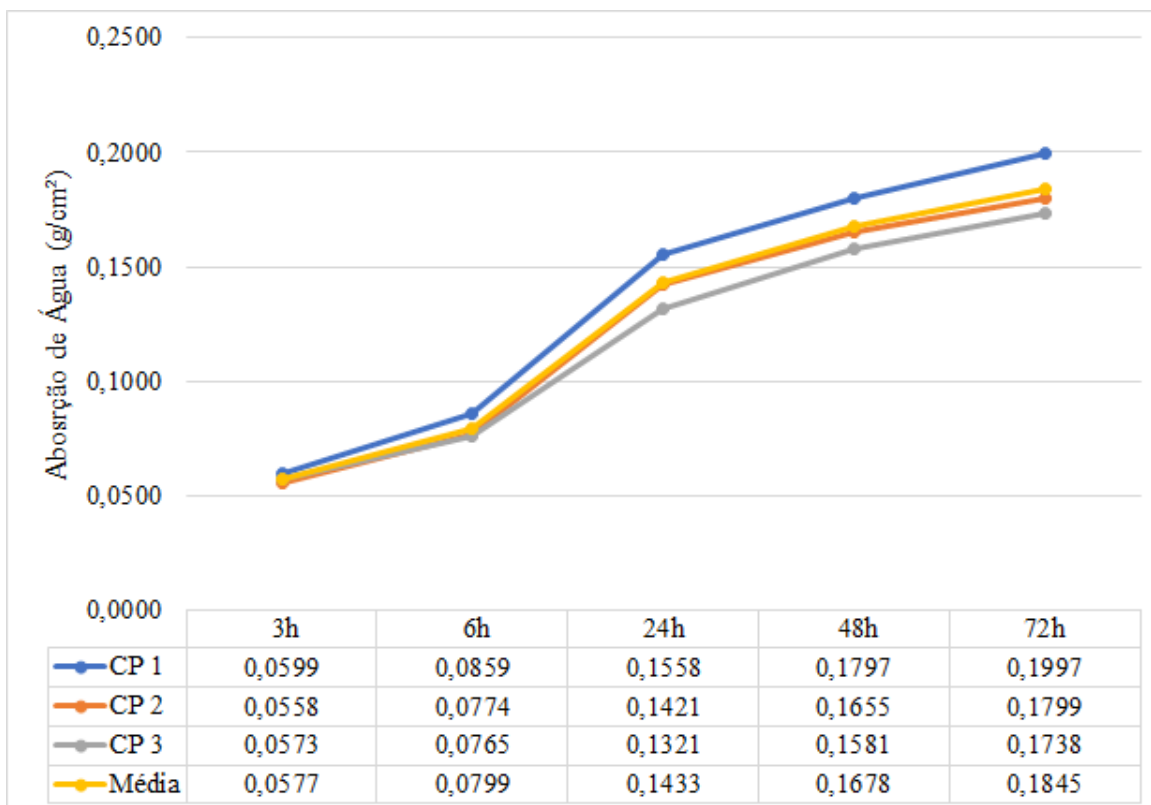
Fonte: Autor (2021).

Absorção de água por capilaridade aos 63 dias traço referência



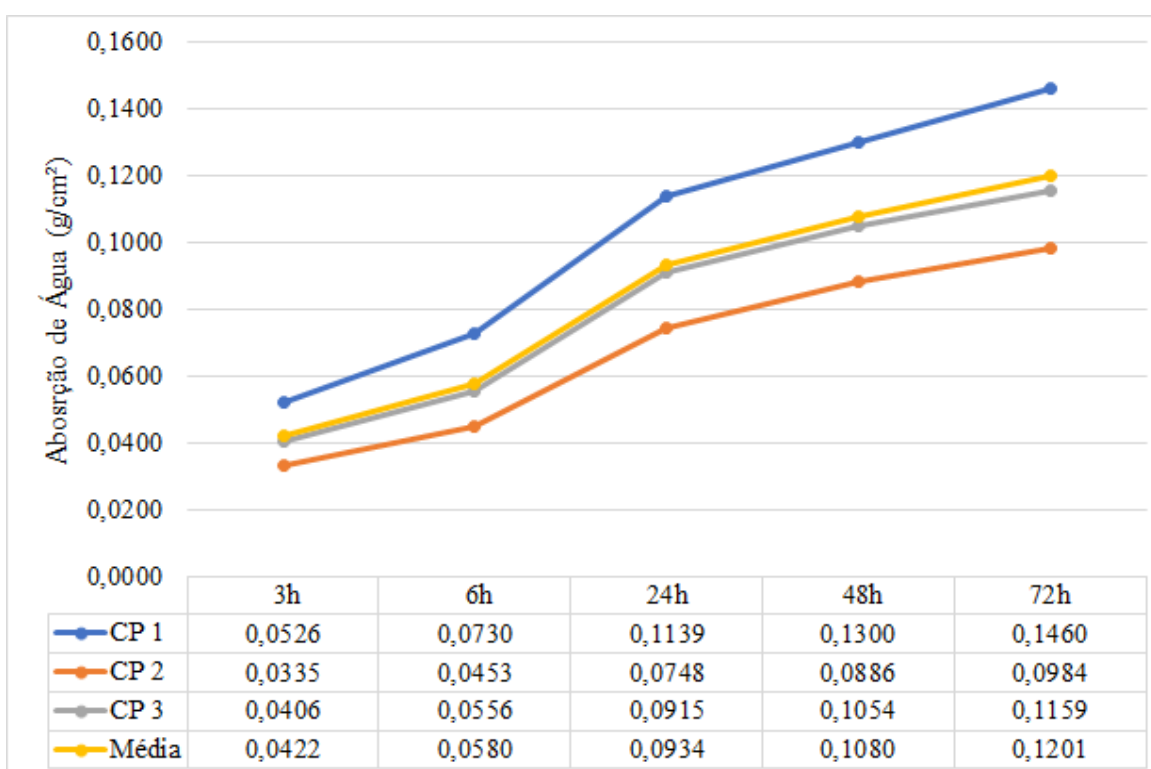
Fonte: Autor (2021).

Absorção de água por capilaridade aos 63 dias traço sílica ativa



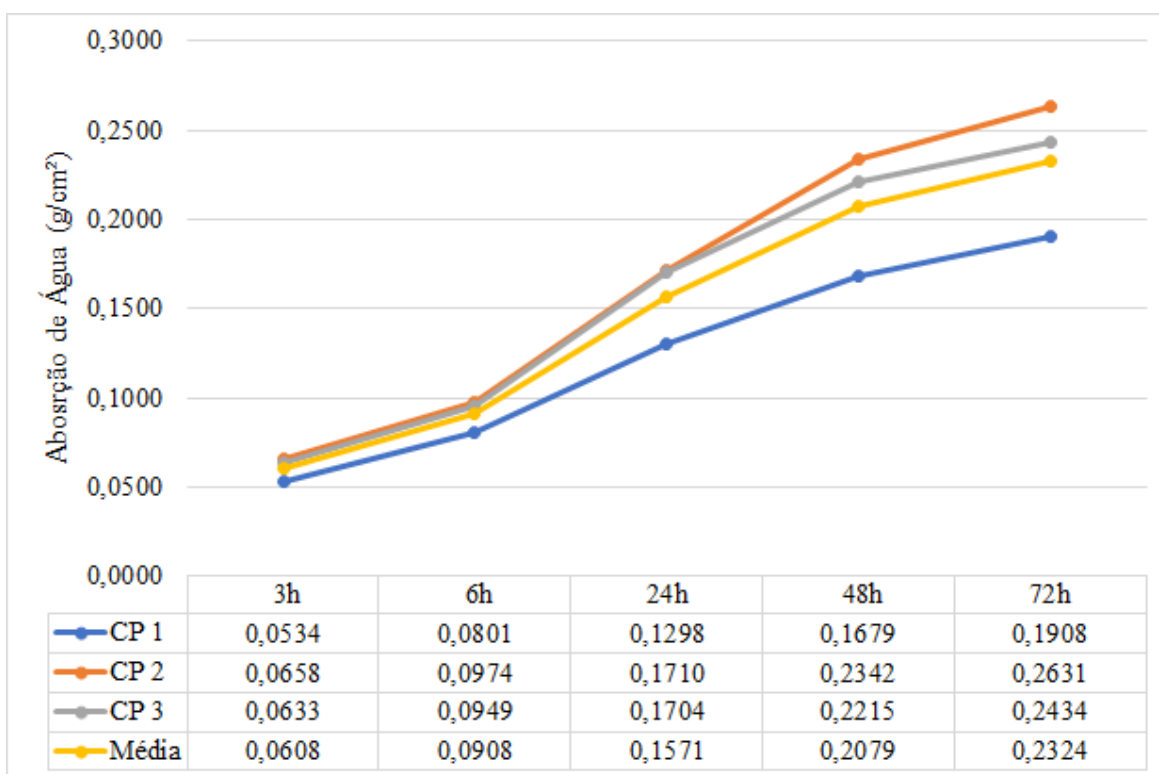
Fonte: Autor (2021).

Absorção de água por capilaridade aos 63 dias traço metacaulim



Fonte: Autor (2021).

Absorção de água por capilaridade aos 63 dias traço cinza volante



Fonte: Autor (2021).



UNIVATES

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000
www.univates.br | 0800 7 07 08 09