

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
Faculdade de Engenharia e Ciências - Câmpus de Guaratinguetá

CARLOS MANUEL ANDRADE DE SOUSA

**AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO DE ELEMENTOS DE CONCRETO COM
PROTEÇÃO SUPERFICIAL**

Guaratinguetá-SP

2026

CARLOS MANUEL ANDRADE DE SOUSA

**AVALIAÇÃO DA CARBONATAÇÃO DE ELEMENTOS DE CONCRETO COM
PROTEÇÃO SUPERFICIAL**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências, Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Emerson Felipe Félix

Coorientadora: Prof^a. Dra. Mariana Ferreira Benessiuti Motta

Guaratinguetá - SP

2026

S725a	Sousa, Carlos Manuel Andrade de Avaliação da carbonatação de elementos de concreto com proteção superficial / Carlos Manuel Andrade de Sousa - Guaratinguetá, 2026. 116 f : il. Bibliografia: f. 104-114 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2026. Orientador(a): Prof. Dr. Emerson Felipe Félix Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Mariana F. Benessiuti Motta 1. Concreto armado. 2. Argamassa. 3. Carbonato de cálcio. 4. Construção civil. I. Título. CDU 691.32(043)
-------	--

Luciana Máximo
Bibliotecária/CRB-8 3595

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A pesquisa apresenta potencial científico e tecnológico ao demonstrar que revestimentos acrílicos de sistemas multicamadas atuam como barreira eficaz ao avanço da carbonatação em estruturas de concreto armado, contribuindo para maior durabilidade, vida útil e sustentabilidade das edificações urbanas, com impactos técnicos, econômicos, sociais e educacionais relevantes.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The research presents scientific and technological potential by demonstrating that acrylic coatings in multilayer systems act as an effective barrier against carbonation progress in reinforced concrete structures, contributing to greater durability, service life and sustainability of urban buildings, with relevant technical, economic, social and educational impacts.

CARLOS MANUEL ANDRADE DE SOUSA

Avaliação da carbonatação de elementos de concretos com proteção superficial.

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Data da defesa: 16/03/2026

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **EMERSON FELIPE FELIX**
Data: 24/03/2026 09:18:42-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. EMERSON FELIPE FELIX
Orientador - UNESP

Documento assinado digitalmente
 **ROGERIO CARRAZEDO**
Data: 17/03/2026 07:42:42-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. ROGÉRIO CARRAZEDO
EESC

Documento assinado digitalmente
 **CAIO GORLA NOGUEIRA**
Data: 17/03/2026 10:53:00-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. CAIO GORLA NOGUEIRA
UNESP

Dedico este trabalho à minha esposa
Hellen, à minha filha Aurora, aos meus
pais, Manuel e Elisete, e à minha irmã,
Luciana, que são minha base, minha força
e minha inspiração diária.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, fonte de força, sabedoria e perseverança, por ter guiado meus passos e sustentado minha fé ao longo desta jornada. Sem Sua graça, os desafios seriam maiores e as conquistas, menos significativas.

Ao longo desta jornada acadêmica, muitas pessoas contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, e a todas elas expresso minha mais profunda gratidão.

Ao meu orientador, Professor Dr. Emerson Felipe Félix, expresso minha sincera gratidão pela dedicação, paciência e valiosas orientações ao longo desta pesquisa. Seu apoio e seu conhecimento foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

À minha coorientadora, Professora Dra. Mariana Ferreira Benessiuti Motta, agradeço profundamente pela atenção, pelo apoio técnico e pelas contribuições essenciais, que enriqueceram significativamente esta pesquisa.

À minha esposa, Hellen, minha companheira de todas as horas, pelo amor, pela compreensão e pelo incentivo incondicionais durante toda essa jornada. Sua presença ao meu lado tornou cada desafio mais leve e cada conquista mais especial.

Aos meus pais, Manuel e Elisete, e à minha irmã, Luciana, pelo amor, pelo apoio e pelos ensinamentos que carregou comigo a cada passo. A base que construíram para mim foi essencial para que eu chegasse até aqui.

Aos amigos e familiares que compartilharam essa caminhada, seja com palavras de incentivo, momentos de descontração ou apoio nos momentos mais difíceis. A todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista, deixo meu sincero obrigado.

Aos professores e colegas que, com suas contribuições e discussões, enriqueceram minha formação acadêmica e científica. Aos técnicos dos Laboratórios de Materiais de Construção Civil e de Estruturas, Flávio e Robson.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – por meio do oferecimento de bolsa pelo Programa de Demanda Social (DS). À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro concedido ao projeto de pesquisa do orientador, sob o Processo nº 2023/04364-9.

“O verdadeiro progresso acontece quando os homens se unem para um objetivo comum.” (Henry Ford).

RESUMO

No presente estudo, foi desenvolvida uma investigação experimental sobre a influência de sistemas de proteção superficial na carbonatação de elementos de concreto e argamassa, com e sem camadas de proteção, expostos a condições naturais. Foram analisados cinco sistemas: sem proteção (SP) e sistemas multicamadas compostos por argamassa (20 mm), selador, massa corrida e pintura final à base de látex PVA (TPVA) ou de tinta acrílica (acetinada – TAA, fosca – TAF e semibrilho – TASB). Os elementos foram submetidos a três condições de exposição: ambiente externo desprotegido da chuva, ambiente externo protegido da chuva e ambiente interno. Os resultados indicam diferenças significativas entre os sistemas de proteção. Aos 180 dias, os elementos de argamassa sem proteção apresentaram profundidades médias superiores a 30 mm em todos os ambientes, enquanto a tinta acrílica acetinada limitou a carbonatação a valores próximos ou inferiores a 10 mm, o que corresponde a reduções de até 71% no ambiente externo protegido e de 82% no ambiente interno, em relação ao grupo SP. As tintas acrílicas semibrilho e fosca também apresentaram reduções relevantes, de 58% a 66%. Já a tinta látex PVA apresentou desempenho semelhante ao da ausência de proteção, com reduções inferiores a 10%. Correlações estatísticas indicaram que, no sistema sem proteção, a carbonatação apresenta correlação positiva moderada com a temperatura. No sistema com tinta PVA, a correlação também foi moderada, enquanto na tinta acrílica acetinada, foi fraca, evidenciando que revestimentos acrílicos eficientes reduzem a sensibilidade às variações térmicas. A umidade relativa mostrou-se variável crítica, com maiores profundidades em faixas intermediárias (75–80%), que equilibram a difusão de CO_2 e a disponibilidade de água para reação. A precipitação apresentou comportamento dual: embora a chuva reduza a carbonatação por saturação dos poros, observou-se correlação positiva moderada em períodos com eventos intensos seguidos de secagem, indicando a influência de ciclos de molhagem e secagem. Esses resultados reforçam a importância de integrar temperatura, umidade e precipitação à modelagem da carbonatação e de considerar a existência de sistemas de proteção dos elementos de concreto nas análises de vida útil e de durabilidade.

Palavras-chave: Durabilidade; Vida útil; Carbonatação; Concreto; Proteção superficial.

ABSTRACT

In this study, an experimental investigation was conducted to evaluate the influence of surface protection systems on the carbonation of concrete and mortar elements, with and without protective layers, under natural exposure conditions. Five systems were analyzed: unprotected (SP) and multilayer systems composed of mortar (20 mm), sealer, skim coat, and final paint finish based on PVA latex (TPVA) or acrylic paint (satin – TAA, matte – TAF, and semi-gloss – TASB). The specimens were subjected to three exposure conditions: outdoor, unprotected from rain; outdoor, protected from rain; and indoors. The results indicate significant differences among the protection systems. At 180 days, unprotected mortar elements exhibited average carbonation depths exceeding 30 mm in all environments, whereas the satin acrylic paint limited carbonation to values close to or below 10 mm, corresponding to reductions of up to 71% in the outdoor protected environment and 82% indoors, compared with the SP group. The semi-gloss and matte acrylic paints also showed reductions of 58%-66%. In contrast, PVA latex paint performed similarly to the unprotected condition, with reductions of less than 10%. Statistical correlations indicated that, in the unprotected system, carbonation was moderately positively correlated with temperature. A moderate correlation was also observed for the PVA paint system, whereas for the satin acrylic paint, the correlation was weak, demonstrating that efficient acrylic coatings reduce sensitivity to thermal variations. Relative humidity proved to be a critical variable, with greater carbonation depths observed at intermediate levels (75–80%), where CO₂ diffusion and water availability for the reaction are balanced. Precipitation exhibited dual behavior: although rainfall reduces carbonation due to pore saturation, a moderate positive correlation was observed during periods of intense rainfall followed by drying, suggesting the influence of wetting–drying cycles. These findings highlight the importance of integrating temperature, humidity, and precipitation into carbonation modeling and of accounting for the presence of surface protection systems in service-life and durability analyses of concrete structures.

Keywords: Durability; Service life; Carbonation; Concrete; Surface protection.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Condições de exposição ao CO ₂ em sistemas de argamassa.	16
Figura 2 - Modelo simplificado da vida útil de elementos de concreto sujeitos à corrosão das armaduras.	23
Figura 3 - Avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto ao longo do tempo.	26
Figura 4 - Fatores que influenciam a ocorrência da carbonatação.	28
Figura 5 - Influência da umidade relativa do ambiente.	30
Figura 6 - Influência da umidade relativa do ambiente.	31
Figura 7 - Profundidade de carbonatação em concretos com diferentes cimentos.	33
Figura 8 - Profundidade de carbonatação nos sistemas argamassados.	39
Figura 9 - Fluxo de processos da metodologia empregada no presente estudo.	57
Figura 10 - (a) ambiente externo desprotegido, (b) ambiente externo protegido e (c) ambiente interno	58
Figura 11 - Cenários de investigação da campanha experimental.	59
Figura 12 - Fluxo de processos de produção e de avaliação dos elementos expostos ao CO ₂ .	60
Figura 13 - Linha do tempo da campanha experimental.	61
Figura 14 - Granulometria do agregado miúdo.	63
Figura 15 - Curva granulométrica do agregado graúdo.	63
Figura 16 - Processos adotados para a proteção com argamassa.	66
Figura 17 - Características e propriedades dos materiais de proteção.	68
Figura 18 - Ensaio para determinação do índice de vazios.	70
Figura 19 - (a) Máquina utilizada nos ensaios e (b) corpo de prova após ruptura por compressão.	71
Figura 20 - Coloração do indicador fenolftaleína em função do pH.	72
Figura 21 - Cronograma dos ensaios de mensuração da profundidade de carbonatação.	72
Figura 22 - Exemplo de calibração da taxa de difusão do CO ₂ .	73
Figura 23 - Exemplo de elementos avaliados quanto à carbonatação aos 60, 120 e 180 dias.	76
Figura 24 - Evolução da carbonatação no ambiente externo, desprotegido da chuva, em elementos de argamassa.	77

Figura 25 - Evolução da carbonatação no ambiente externo, protegido da chuva, em elementos de argamassa.	78
Figura 26 - Evolução da carbonatação no ambiente interno de elementos de argamassa.	79
Figura 27 - Profundidade de carbonatação em função do ambiente de exposição aos 60 dias.	81
Figura 28 - Profundidade de carbonatação em função do ambiente de exposição aos 120 dias.	82
Figura 29 - Profundidade de carbonatação em função do ambiente de exposição aos 180 dias.	82
Figura 30 - Carbonatação nos elementos de concreto com e sem proteção.	84
Figura 31 - Indicação, por satélite, da posição da estação meteorológica em relação aos CPs.	87
Figura 32 - (a) Umidade Relativa; (b) Temperatura; (c) Chuva Acumulada; (d) Carbonatação acumulada, no período de 1-30 dias após a aplicação da proteção superficial (31-60 dias).	89
Figura 33 - (a) Umidade Relativa; (b) Temperatura; (c) Chuva Acumulada; (d) Carbonatação acumulada, no período de 31-60 dias após a aplicação da proteção superficial (61-90 dias).	90
Figura 34 - (a) Umidade Relativa; (b) Temperatura; (c) Chuva Acumulada; (d) Carbonatação acumulada, no período de 91-120 dias após a aplicação da proteção superficial (121-150 dias).	91
Figura 35 - Correlação entre os parâmetros climáticos do ambiente de exposição e a carbonatação.	94
Figura 36 - Ajuste de curva da velocidade de difusão de CO_2 nos elementos SP e TAA.	97
Figura 37 - Ajuste de curva da velocidade de difusão de CO_2 nos elementos TAF, TASB e TPVA.	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Indicação das concentrações de CO ₂ conforme o ambiente.	32
Tabela 2 - Coeficientes do modelo de Bob e Affana.	45
Tabela 3 - Coeficientes do modelo da norma EHE.	46
Tabela 4 - Coeficientes do modelo em função (a) das características do concreto e das condições ambientais (b) das condições de exposição (POSSAN, 2010).	47
Tabela 5 - Fatores de correção da carbonatação natural.	50
Tabela 6 - Fatores do cimento para condutância da carbonatação.	51
Tabela 7 - Propriedades dos agregados.	64
Tabela 8 - Composição química do cimento.	65
Tabela 9 - Traço de concreto em massa para 1 m ³ de material.	65
Tabela 10 - Traço da argamassa de revestimento.	66
Tabela 11 - Índice de vazios.	74
Tabela 12 - Resistência à compressão dos materiais.	74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO	14
1.2	OBJETIVO	17
1.3	CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA.....	18
1.4	CONTEÚDO DO TRABALHO.....	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	20
2.2	CARBONATAÇÃO EM MATERIAIS DE BASE CÍMENTICA.....	24
2.3	FATORES DE INFLUÊNCIA NA CARBONATAÇÃO.....	28
2.3.1	Umidade relativa do ar.....	29
2.3.2	Incidência e exposição à chuva	30
2.3.3	Concentração de CO ₂ no ambiente	31
2.3.4	Composição do material	32
2.3.5	Condições de execução e cura.....	35
2.3.6	Relação água-cimento e resistência à compressão do material.....	36
2.3.7	Proteção superficial	37
2.4	MODELOS DE PREDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	40
2.4.1	Modelos analíticos	41
2.4.1.1	<i>Modelo de TUUTTI</i>	42
2.4.1.2	<i>Modelo de SMOLCZYK.....</i>	42
2.4.1.3	<i>Modelo de VESIKARI.....</i>	43
2.4.1.4	<i>Modelo de PAPADAKIS, VAYENAS E FARDIS.....</i>	44
2.4.1.5	<i>Modelo de BOB E AFFANA.....</i>	45
2.4.1.6	<i>Modelo de EHE</i>	46
2.4.1.7	<i>Modelo de POSSAN.....</i>	47
2.4.1.8	<i>Modelo de LIU, YU e CHEN</i>	48
2.4.1.9	<i>Modelo de EKOLU</i>	49
2.4.2	MEF e MEC	51
2.4.3	Aprendizado de máquina.....	52
2.5	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	54
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	57

3.1	CAMPANHA EXPERIMENTAL.....	62
3.1.1	Materiais – produção e caracterização	62
3.1.2	Ensaio de índice de vazios e absorção de água.....	69
3.1.3	Ensaio de resistência à compressão	70
3.1.4	Profundidade de carbonatação e taxa de carbonatação (Ycarb e Kcarb)	71
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
4.1	ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS	74
4.2	ANÁLISE DA CARBONATAÇÃO.....	75
4.2.1	Avanço da carbonatação na argamassa	75
4.2.2	Avanço da carbonatação no concreto	83
4.2.3	Influência do ambiente de exposição.....	86
4.2.4	Análise da velocidade de difusão do CO ₂	96
4.3	CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO	101
5	CONCLUSÕES	102
	REFERÊNCIAS.....	105
	DADOS CURRICULARES	113

1 INTRODUÇÃO

O crescente processo de urbanização, associado à intensificação das atividades industriais e ao aumento das concentrações de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera, tem imposto condições ambientais cada vez mais agressivas às estruturas de concreto armado. Entre os mecanismos de degradação decorrentes dessa exposição, a carbonatação assume particular relevância, pois promove a redução gradual da alcalinidade da matriz cimentícia e a consequente despassivação das armaduras, com implicações diretas no desempenho estrutural e na vida útil das edificações.

Neste capítulo, aborda-se a contextualização do tema, delimitando a problemática associada à carbonatação de estruturas de concreto armado e identificando a lacuna existente na literatura quanto à avaliação abrangente do efeito de sistemas de proteção superficial multicamadas sobre a durabilidade e a vida útil de estruturas de concreto armado submetidas ao processo de carbonatação.

1.1 MOTIVAÇÃO E CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

Desde sua consolidação no final do século XIX, o concreto armado assumiu posição de destaque como um dos principais materiais da construção civil, resultado de sua combinação de resistência mecânica, versatilidade estrutural e viabilidade econômica. A introdução desse material possibilitou o avanço de soluções arquitetônicas e de engenharia de maior porte e complexidade, a exemplo de edifícios, pontes de grandes vãos e barragens. Dessa forma, o concreto armado consolidou-se como elemento essencial para o desenvolvimento das cidades modernas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Com a ampla difusão do concreto armado, emergiu também uma crescente preocupação com sua durabilidade, aspecto que se tornou relevante tanto em pesquisas acadêmicas quanto na prática da engenharia civil. Entre os fatores que mais desafiam a preservação desse material, destacam-se a intensificação da agressividade dos ambientes urbanos, marcada por maiores concentrações de dióxido de carbono (CO_2), as alterações climáticas globais e as mudanças na composição química dos aglomerantes. A exposição prolongada ao CO_2 atmosférico desencadeia o processo de carbonatação do concreto, uma reação química que

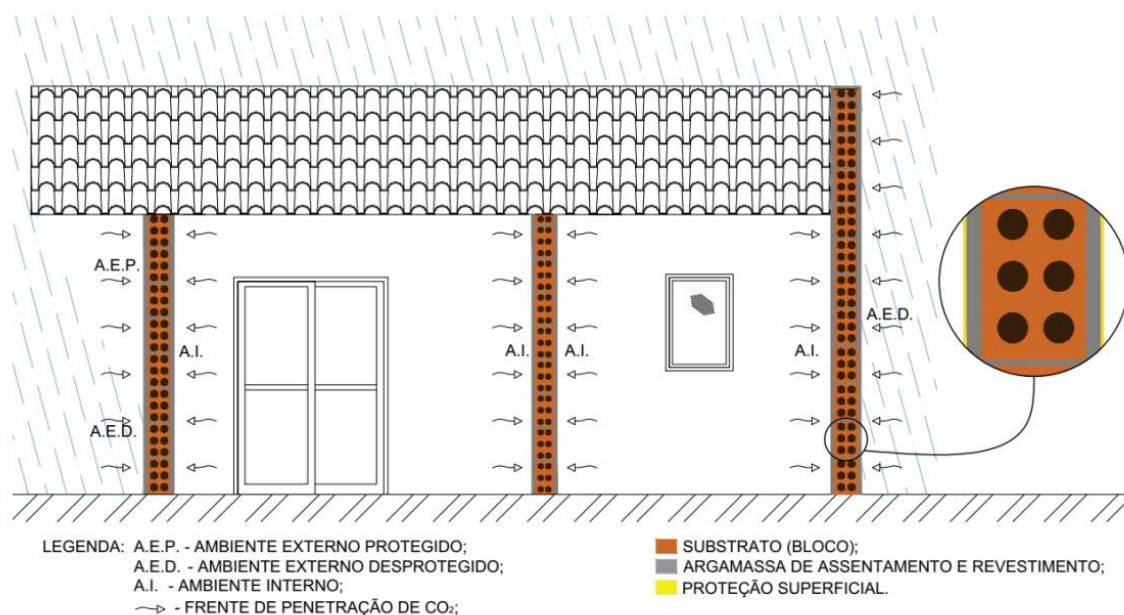
provoca a redução gradual da alcalinidade da matriz cimentícia, responsável pela manutenção da passivação das armaduras de aço. A perda dessa condição protetiva leva à despassivação e ao início da corrosão das armaduras, fenômeno que compromete o desempenho estrutural ao gerar fissuração, perda de aderência aço-concreto e, em estágios mais avançados, o destacamento das camadas superficiais do concreto (SITTER, 1984 apud HELENE, 1993; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Garcia Alonso et al. (2007) destacam que nas estruturas de concreto armado, uma parcela do esforço produtivo do setor da construção civil é direcionada a intervenções destinadas a preservar ou recuperar o desempenho estrutural. Estima-se que aproximadamente 35% de toda a atividade do setor seja dedicada a procedimentos de manutenção, reparo ou restauração de elementos estruturais, proporção que vem registrando um aumento consistente ao longo dos últimos anos.

Nesse contexto, torna-se imprescindível o avanço de estratégias e estudos capazes de prevenir ou retardar a progressão da carbonatação, assegurando maior vida útil às estruturas de concreto armado. Entre as alternativas disponíveis, destaca-se a aplicação de sistemas superficiais de proteção multicamadas, prática recorrente em edificações residenciais e comerciais. Kazmierczak (1995) investigou o uso de sistemas de proteção superficial, como tintas e vernizes, para reforçar a durabilidade das estruturas de concreto. Embora a escolha do produto mais adequado ainda seja predominantemente empírica, devido à limitada disponibilidade de métodos de ensaio, o estudo demonstrou que esses sistemas são eficazes para reduzir a permeabilidade ao dióxido de carbono.

Os sistemas multicamadas são formados por sucessivas camadas de revestimento, como argamassa, massa corrida, selador e diferentes tipos de tintas imobiliárias, incluindo acrílicas (fosca, acetinada, semibrilho) e PVA-Látex, que, em teoria, atuam como barreiras adicionais ao ingresso de dióxido de carbono (Figura 1). Apesar da difusão de seu uso, a literatura ainda carece de investigações que comprovem, de forma sistemática, a efetividade e o impacto real desses sistemas multicamada na mitigação da carbonatação. Além disso, observa-se a ausência da consideração desses revestimentos nos estudos de previsão e nas metodologias de estimativa da vida útil das estruturas de concreto armado.

Figura 1 - Condições de exposição ao CO₂ em sistemas de argamassa.



Fonte: Pedry (2020).

Considerando essa lacuna de conhecimento, o grupo de pesquisa CO₂ Construction, no qual se insere o presente projeto, tem desenvolvido estudos sobre a função protetiva dos revestimentos superficiais. Embora os trabalhos de Pedry (2020) e Barbosa (2021) tenham inicialmente se concentrado no potencial de captura de CO₂ de materiais cimentícios, seus resultados forneceram evidências consistentes de que tais revestimentos podem atuar de forma significativa na redução da velocidade de carbonatação. No estudo conduzido por Pedry (2020), por exemplo, argamassas recobertas com tintas imobiliárias premium apresentaram reduções expressivas na profundidade de carbonatação quando comparadas a argamassas expostas sem proteção superficial. Entre os materiais avaliados, as tintas acrílicas destacaram-se, registrando uma diminuição de até 273,89% na profundidade carbonatada após 190 dias de exposição natural ao CO₂, em comparação às amostras de referência.

Por sua vez, o estudo desenvolvido por Barbosa (2021) ampliou a investigação ao analisar diferentes tipos de acabamentos superficiais e confirmou o destaque das tintas acrílicas, em especial as com acabamento semibrilho, na mitigação da carbonatação. Os resultados demonstraram que esse tipo de revestimento pode reduzir a velocidade de difusão do CO₂ em até 3,6 vezes em comparação à condição de referência, sem qualquer camada protetiva. Esses achados, somados às evidências de Pedry (2020), abriram novas perspectivas de

pesquisa, ao reconhecer a proteção superficial não apenas como meio de captura de carbono, mas também como ferramenta estratégica para prolongar a durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto armado.

Apesar de pesquisas anteriores indicarem grande potencial de contribuição dos revestimentos superficiais, ainda não foram identificados estudos que avaliem, de maneira abrangente, o desempenho completo de sistemas multicamadas, compostos por argamassa, massa corrida, selador e tintas imobiliárias, quanto à durabilidade e à vida útil de estruturas de concreto armado submetidas ao processo de carbonatação. Diante dessa lacuna, o presente trabalho investigou experimentalmente os efeitos desses sistemas de proteção multifuncionais no retardamento da despassivação das armaduras incorporadas ao concreto, fornecendo subsídios para o avanço do conhecimento científico e para o aprimoramento das práticas de projeto e manutenção.

Dessa forma, a presente pesquisa teve como propósito não apenas quantificar a eficácia de sistemas de proteção superficial frente ao processo de carbonatação, mas também aprofundar a compreensão das interações entre variáveis ambientais, propriedades intrínsecas do concreto e características específicas dos revestimentos aplicados, configurando uma contribuição inovadora para o campo da construção civil, com destaque para os estudos de durabilidade das estruturas de concreto armado.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho consiste em avaliar experimentalmente a influência da utilização de sistemas de proteção superficial, como revestimentos em argamassa, com ou sem a aplicação de massa corrida e pintura, sobre a carbonatação do concreto. Busca-se investigar como esses sistemas influenciam a velocidade de avanço da carbonatação e, conseqüentemente, a vida útil dos elementos de concreto e sistemas de edificações do ambiente urbano.

Como objetivos específicos, citam-se:

- Investigar experimentalmente a influência de diferentes tipos de tintas e acabamentos superficiais (sistemas de proteção) na frente de carbonatação de elementos de argamassa e concreto;

- Correlacionar a frente de carbonatação em elementos de argamassa e concreto com os sistemas de proteção superficial;
- Correlacionar a frente de carbonatação em elementos de argamassa e de concreto com os parâmetros do ambiente de exposição.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

O estudo experimental proposto permitiu avaliar o impacto de diferentes sistemas de proteção superficial, tais como camadas de argamassa, com ou sem massa corrida, selador e pintura, sobre o processo de carbonatação do concreto. Por meio dessa investigação, foi possível determinar como essas camadas protetivas influenciam a taxa de avanço da carbonatação, contribuindo diretamente para estimativas mais precisas da vida útil de estruturas no ambiente construído. Esses resultados permitirão aos profissionais envolvidos no projeto estrutural tomar decisões sobre a adoção de medidas preventivas contra a degradação das estruturas das edificações do ambiente urbano.

1.4 CONTEÚDO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado em cinco capítulos, cada qual abordando uma parte fundamental da pesquisa. No Capítulo 1, apresentam-se a introdução e a contextualização do tema, destacando a relevância da pesquisa.

O Capítulo 2 aborda a fundamentação teórica necessária para compreender os processos envolvidos no estudo da durabilidade do concreto e da carbonatação dos materiais de matriz cimentícia, destacando a influência de diferentes parâmetros (internos ou externos ao material) na velocidade de difusão do CO_2 . Além disso, são apresentadas as principais formulações disponíveis na literatura para estimar a profundidade de carbonatação do concreto e, conseqüentemente, o tempo de despassivação das armaduras imersas no compósito.

O Capítulo 3 descreve a metodologia empregada na pesquisa, que envolve uma campanha experimental para avaliar a difusão de CO_2 em amostras de concreto com e sem sistemas de proteção superficial, seguida da coleta e da análise dos dados e resultados da campanha, para quantificar a contribuição individual dos diferentes

parâmetros que podem afetar a difusão de CO₂ nos sistemas de concreto e argamassa.

No Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados da campanha experimental, enquanto no Capítulo 5, apresentam-se as conclusões, destacando as principais contribuições do estudo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são discutidos os processos de difusão de CO₂ em concretos e argamassas, com ênfase na análise dos principais fatores que afetam esse fenômeno, como a porosidade dos materiais, a umidade relativa do ambiente, a temperatura e as características dos materiais empregados na mistura. O texto detalha os mecanismos físicos e químicos envolvidos na difusão do CO₂ e apresenta as principais equações matemáticas empregadas para estimar a profundidade de carbonatação ao longo do tempo.

2.1 VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

A preocupação com a durabilidade e a extensão da vida útil das estruturas de concreto armado tem ganhado cada vez mais relevância na engenharia civil, refletindo não apenas a necessidade de atender às demandas de sustentabilidade, mas também de mitigar os efeitos da degradação precoce dos materiais. Dentre os processos que mais comprometem a longevidade dessas estruturas, destaca-se a carbonatação, fenômeno responsável pela despassivação das armaduras e pela aceleração da corrosão, tornando-o um fator crítico para o desempenho estrutural ao longo do tempo.

Para Müller, Haist e Vogel (2014), a consolidação de uma engenharia sustentável exige a redução substancial do consumo de recursos e de energia ao longo das fases de construção e de operação das estruturas de concreto armado. Entre as estratégias apontadas pelos autores, destacam-se o aumento do desempenho dos sistemas estruturais e a adoção de premissas de projeto que prolonguem a vida útil. Tais medidas, além de repercutirem diretamente na sustentabilidade, impactam diretamente no fator “custo”, uma vez que mitigam a extração de recursos naturais, reduzem a emissão de poluentes e diminuem as despesas associadas à manutenção das estruturas.

No contexto normativo brasileiro, diferentes documentos tratam, direta ou indiretamente, dos aspectos relacionados à durabilidade e vida útil do concreto armado. A NBR 6118 (ABNT, 2023), "Projeto de Estruturas de Concreto", constitui a principal referência para o projeto estrutural, estabelecendo parâmetros essenciais para assegurar o desempenho e a durabilidade previstos no projeto. Nessa norma, a

definição da vida útil de projeto envolve a manutenção das características originais da estrutura durante o período estipulado, desde que as condições de uso, inspeção e manutenção sejam rigorosamente cumpridas. Como consequência, a exigência de cobrimento adequado das armaduras é uma das estratégias normativas para retardar o avanço da carbonatação e proteger o aço embutido.

A NBR 12655 (ABNT, 2022), " Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento", complementa esse arcabouço ao estabelecer critérios rigorosos para a seleção de materiais, a dosagem e o controle de qualidade do concreto, incluindo ensaios como a resistência à compressão e a trabalhabilidade. Embora seu escopo não seja diretamente a vida útil, o atendimento a esses requisitos é fundamental para garantir uma matriz cimentícia menos suscetível a agentes agressivos, como o CO₂ atmosférico, o que resulta em maior resistência à carbonatação.

Já a NBR 15575 (ABNT, 2013), "Edificações habitacionais - Desempenho", aprofunda o debate ao explicitar o conceito de Vida Útil de Projeto (VUP), que corresponde ao intervalo no qual se espera que as edificações mantenham desempenho satisfatório, considerando ações de manutenção preventiva, requisitos de sustentabilidade e níveis mínimos de segurança. Essa norma reforça que a adoção de práticas de manutenção é indispensável para impedir a progressão de patologias como a carbonatação e a corrosão das armaduras, garantindo o desempenho estrutural ao longo do ciclo de vida.

O cenário internacional também oferece importantes contribuições normativas, a exemplo da CEB 238 (1997), que destaca a necessidade de considerar fatores ambientais e as propriedades dos materiais para garantir a durabilidade, por meio de projetos adequados e de manutenção contínua. Documentos como a EN 206 (2001) e o Model Code for Service Life Design – fib 34 (2006) aprofundam o entendimento dos mecanismos de deterioração, incluindo a carbonatação, e apresentam critérios específicos para diversas condições de exposição, ampliando o embasamento técnico disponível para projetistas e pesquisadores.

Pesquisas como as de Possan e Demoliner (2013) reforçam que a expectativa de vida útil das estruturas depende diretamente da efetividade das ações de manutenção e de decisões adequadas tomadas nas etapas de projeto, execução, seleção de materiais e definição do ambiente de exposição, podendo ser limitada por fatores técnicos, funcionais ou econômicos relacionados ao desempenho estrutural e

aos custos de manutenção. Helene (1995), por sua vez, enfatiza a importância do cumprimento rigoroso das especificações técnicas relativas ao ambiente, ao projeto e à manutenção preventiva para retardar a deterioração, especialmente a decorrente da carbonatação. O autor destaca ainda o papel de sistemas complementares, como drenos, juntas e impermeabilizações, cuja durabilidade tende a ser inferior à do concreto, mas que são essenciais para a proteção global da estrutura.

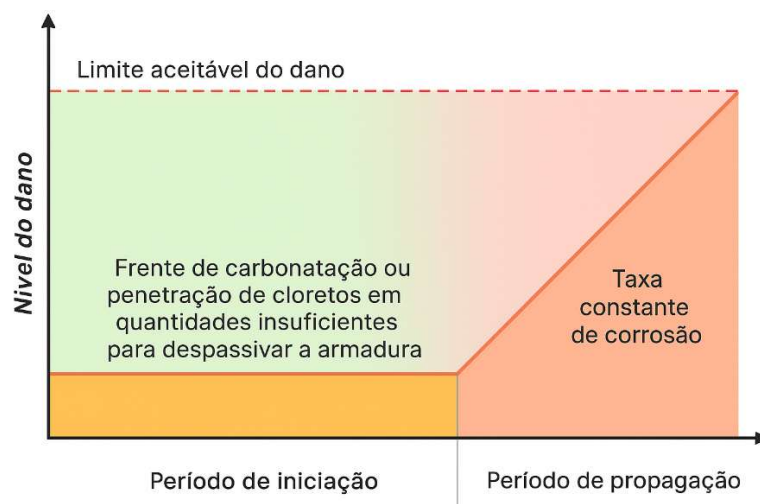
A compreensão dos estágios de deterioração também tem evoluído, especialmente a partir do modelo proposto por Tuutti (1982), que segmenta o processo de corrosão das armaduras em dois períodos: o de iniciação, no qual a carbonatação progride até alcançar o aço, e o de propagação, em que a corrosão se desenvolve até provocar danos estruturais significativos (Figura 2).

Helene (1993) amplia esse modelo ao propor a divisão da vida útil em três fases:

- a) Vida útil de projeto: Corresponde ao período de iniciação da estrutura, definido no projeto com base na segurança, que se estende até a despassivação das armaduras, sem necessariamente indicar o início efetivo da corrosão.
- b) Vida útil de serviço ou de utilização (até a manifestação de danos visíveis): É o período que se estende até o surgimento de manchas, fissuras ou o destacamento do cobrimento do concreto, variando conforme o nível de aceitabilidade da deterioração. Em alguns casos, pequenas falhas já indicam o fim da vida útil, enquanto, em outros, isso ocorre apenas quando há risco à segurança.
- c) Vida útil total (até o colapso estrutural): Corresponde à fase em que ocorre redução acentuada da seção das armaduras ou perda significativa de aderência, estendendo-se até a ruptura ou colapso parcial ou total da estrutura.

Mehta (1994) acrescenta que esse processo não é linear, devido à complexidade das interações entre variáveis ambientais, materiais e operacionais que influenciam o desempenho estrutural ao longo do tempo.

Figura 2 - Modelo simplificado da vida útil de elementos de concreto sujeitos à corrosão das armaduras.



Fonte: Adaptado de Tuutti (1982).

Helene (1997) classifica os métodos utilizados para estimar a vida útil de estruturas em diferentes categorias, destacando-se: a experiência acumulada em obras anteriores; os ensaios acelerados em laboratório; os modelos determinísticos baseados em leis físicas, como a Lei de Fick, aplicada à carbonatação; e os modelos probabilísticos, que incorporam as incertezas associadas aos materiais e às condições ambientais. A complementaridade entre essas abordagens é fundamental para o aprimoramento das estimativas de durabilidade, permitindo uma previsão mais precisa dos efeitos da carbonatação ao longo do tempo.

Nesse mesmo contexto, Possan (2010) indica a necessidade de uma perspectiva interdisciplinar ao se abordar a previsão da vida útil e a avaliação do Custo do Ciclo de Vida das estruturas. Tal abordagem deve integrar considerações econômicas, ambientais e estruturais, reforçando a importância de que estratégias preventivas contra a carbonatação sejam incorporadas desde a fase de projeto. Essa antecipação de medidas protetivas visa assegurar o desempenho desejado e a longevidade das estruturas de concreto armado diante dos agentes de degradação.

Dessa forma, torna-se essencial que a comunidade técnico-científica desempenhe um papel ativo na orientação de projetistas e demais profissionais da construção civil, especialmente quanto à importância da fase de projeto na definição de estratégias voltadas à durabilidade das estruturas. A tomada de decisões nessa etapa inicial é determinante para garantir que as estruturas de concreto armado

atendam, ao longo do tempo, aos requisitos mínimos de desempenho previstos em norma.

De acordo com a NBR 15575-1 (ABNT, 2013), a Vida Útil de Projeto (VUP) das edificações deve ser, como regra geral, de, no mínimo, 50 anos, conforme estabelecido no Quadro 1 da Tabela 25, salvo quando o projeto especifique prazos distintos. Essa estimativa normativa, contudo, está diretamente condicionada à realização das ações de manutenção preventiva previstas na NBR 5674 (ABNT, 2024), as quais devem estar claramente descritas no manual de uso, operação e manutenção da edificação, conforme os parâmetros definidos na NBR 14037 (ABNT, 2024).

Quadro 1: Vida útil de projeto.

Sistema	VUP mínima (em anos)*
Estrutura	≥ 50
Pisos internos	≥ 13
Vedação vertical externa	≥ 40
Vedação vertical interna	≥ 20
Cobertura	≥ 20
Hidrossanitário	≥ 20
*Considerando periodicidade e processos de manutenção segundo a NBR 5674 (ABNT, 2024) e especificações no respectivo manual de uso, operação e manutenção entregue ao usuário elaborado em atendimento à NBR 14037 (ABNT, 2024).	

Fonte: NBR 15575-1 (ABNT, 2013).

2.2 CARBONATAÇÃO EM MATERIAIS DE BASE CÍMENTICA

Os principais gases presentes na atmosfera que reagem com os álcalis do concreto, promovendo a redução do pH e favorecendo a despassivação das armaduras, são o dióxido de enxofre (SO_2), o gás sulfídrico (H_2S) e o dióxido de carbono (CO_2). Como o CO_2 é o gás de maior incidência no ambiente e o principal agente responsável pelo avanço desse mecanismo, é ele que dá origem à denominação do processo, caracterizando o fenômeno conhecido como carbonatação (FIGUEIREDO, 2005; KULAKOWSKI, 2002).

Diante da predominância do CO₂ como agente reativo, a carbonatação é um dos processos físico-químicos mais relevantes no estudo da durabilidade de materiais cimentícios, sendo investigada ao longo das últimas décadas. Esse fenômeno caracteriza-se pela penetração do dióxido de carbono (CO₂) presente na atmosfera na matriz porosa do concreto, desencadeando reações químicas que afetam diretamente a alcalinidade do concreto.

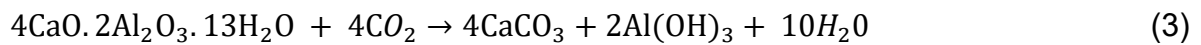
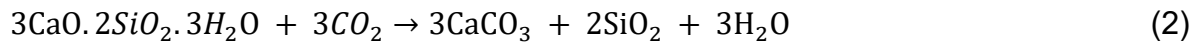
Nas últimas décadas, as emissões antrópicas de CO₂ cresceram de forma contínua, alcançando valores quatro vezes superiores aos registrados há cinquenta anos e mantendo-se em tendência de aumento entre 2000 e 2010, mesmo com ações de mitigação (IPCC, 2014). A intensificação industrial, o elevado consumo de combustíveis e a redução da vegetação aumentam a agressividade ambiental, tornando as estruturas de concreto mais expostas a condições favoráveis à carbonatação. Esse efeito é influenciado pela concentração atmosférica de CO₂, que varia de cerca de 0,03% em ambientes rurais a mais de 0,3% em grandes centros urbanos (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Considerando a crescente concentração de CO₂ na atmosfera, o mecanismo químico da carbonatação torna-se ainda mais relevante. Segundo Possan (2010), a carbonatação ocorre quando gases ácidos, como o CO₂, reagem com compostos alcalinos presentes na matriz cimentícia, em especial com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), formado durante o processo de hidratação do cimento Portland. Essa reação resulta na formação de carbonato de cálcio (CaCO₃), iniciando-se nas regiões mais externas do elemento estrutural e avançando progressivamente para o interior, formando uma zona carbonatada.

O processo começa com a difusão do CO₂ na rede de poros do concreto. Na presença de umidade, esse gás se converte em ácido carbônico (H₂CO₃), que reage com o hidróxido de cálcio da pasta de cimento, promovendo a neutralização da alcalinidade e, conseqüentemente, a perda do ambiente passivador da armadura, conforme apresentado na Equação 1.



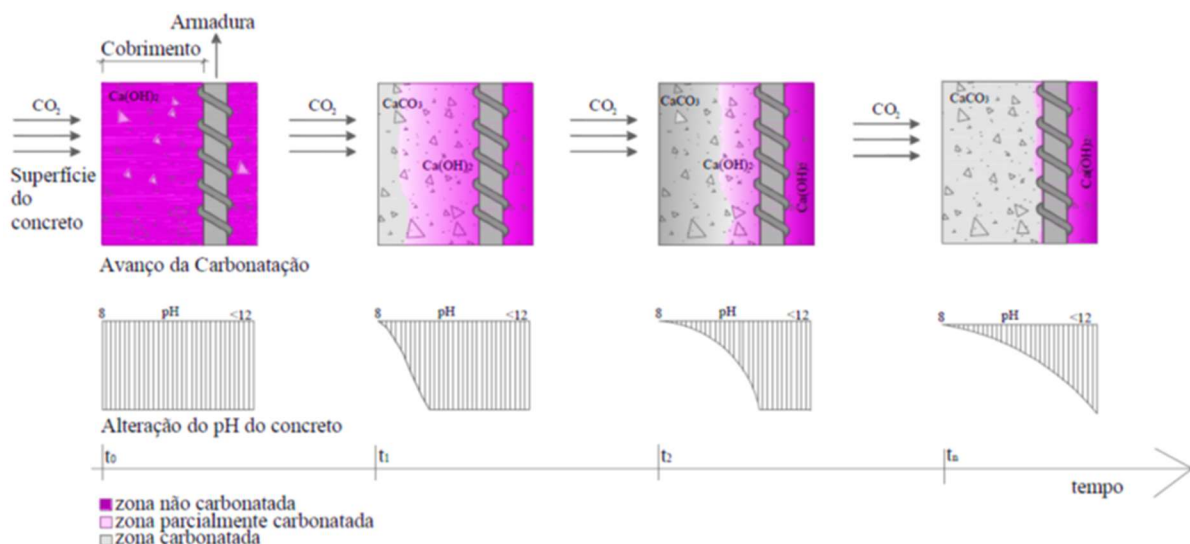
Na sequência ocorrem as reações com os silicatos e os aluminatos, conforme as equações 2 e 3.



Os efeitos decorrentes das reações de carbonatação nos materiais cimentícios podem ser analisados sob diferentes perspectivas. Do ponto de vista das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado, a interação entre o dióxido de carbono (CO_2) e os produtos hidratados da pasta de cimento acarreta uma redução progressiva do pH dos poros do concreto, comprometendo o ambiente alcalino necessário à passivação das armaduras.

Mehta e Monteiro (2008) apontam que, em condições normais, o pH do concreto permanece igual ou superior a 12,5, garantindo a proteção das armaduras contra a corrosão. No entanto, com o avanço da frente de carbonatação, esse valor pode ser reduzido para valores inferiores a 8,5, favorecendo a despassivação da armadura e, conseqüentemente, o início do processo corrosivo (Figura 3).

Figura 3 - Avanço da frente de carbonatação e alteração do pH do concreto ao longo do tempo.



Fonte: Possan (2010).

Diante dessa perda progressiva de alcalinidade, as implicações estruturais tornam-se particularmente relevantes, uma vez que a corrosão das armaduras constitui um dos principais mecanismos de degradação do concreto armado,

comprometendo a capacidade resistente da estrutura e elevando significativamente os custos de reparo. Esse fenômeno ocorre, sobretudo, pela carbonatação em ambientes urbanos e industriais com elevada concentração de CO_2 , condição que favorece a despassivação do aço. A evolução da corrosão envolve uma fase inicial de incubação, marcada pela perda da proteção alcalina por carbonatação ou pela ação de íons cloreto, seguida da fase de propagação, na qual a formação de produtos de corrosão de maior volume provoca fissuras, destacamentos do cobrimento e redução da aderência (BAROGHEL-BUNNY; CAPRA; LAURENS, 2014).

Andrade (1992) descreve o processo de corrosão da armadura, decorrente da carbonatação do concreto, quando o meio já não sustenta a alcalinidade do concreto (pH entre 12,6 e 14), permitindo o estabelecimento de um sistema eletroquímico no qual se formam regiões anódicas e catódicas na superfície metálica, promovendo a migração iônica através do eletrólito e desencadeando as reações de oxidação e redução características do processo corrosivo.

Embora a carbonatação seja amplamente reconhecida pelo seu papel na fragilização das armaduras de estruturas de concreto armado, esse fenômeno pode adquirir uma perspectiva distinta quando analisado sob a ótica da sustentabilidade. Sob essa abordagem, a carbonatação do concreto adquire uma conotação positiva, ao atuar como um processo potencial de sequestro de carbono. Conforme apontado por Younsi, Turcry e Aït-Mokhtar (2022), esse mecanismo permite que o concreto capture CO_2 atmosférico ao longo do tempo, contribuindo para mitigar as emissões de gases de efeito estufa associadas ao setor da construção civil. Em aplicações em que o concreto armado não contém aço, como em argamassas, elementos não armados ou estruturas com reforços não metálicos, a carbonatação pode ser explorada como estratégia complementar de sustentabilidade. No entanto, quando se trata de estruturas de concreto armado com armaduras metálicas, é imprescindível que o material apresente resistência adequada à carbonatação, a fim de preservar sua vida útil de projeto.

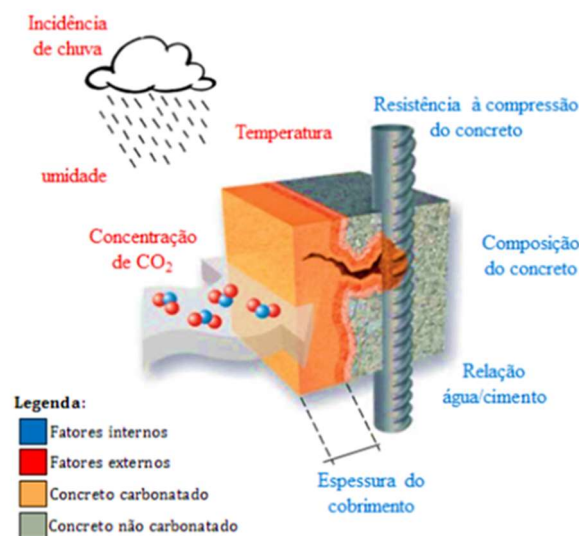
A profundidade alcançada pela frente de carbonatação em elementos cimentícios está diretamente relacionada a uma série de variáveis, tanto do ambiente quanto do próprio concreto. Entre os fatores mais relevantes, destacam-se: o tempo de exposição, a concentração de CO_2 no ambiente, a porosidade do material e a quantidade de hidróxido de cálcio disponível para reagir com o gás carbônico (VESIKARI, 1988; HAMADA, 1968). Assim, torna-se evidente que o fenômeno da

carbonatação resulta da interação entre as propriedades intrínsecas do concreto e as condições externas, exigindo avaliação criteriosa para cada aplicação.

2.3 FATORES DE INFLUÊNCIA NA CARBONATAÇÃO

A ocorrência da carbonatação, bem como a velocidade de propagação do dióxido de carbono (CO_2) no interior do concreto, está diretamente condicionada a uma série de variáveis. Parrott (1987) e Houst e Wittmann (2002) propõem uma classificação didática desses fatores em dois grupos principais: os fatores internos, relacionados às propriedades do próprio concreto, e os fatores externos, associados às condições ambientais a que a estrutura está exposta. Essa organização conceitual é ilustrada esquematicamente na Figura 4, o que permite uma melhor compreensão das múltiplas interações que influenciam o avanço da frente de carbonatação.

Figura 4 - Fatores que influenciam a ocorrência da carbonatação.



Fonte: Felix (2018).

De acordo com Ferreira (2013), os fatores externos que mais influenciam o processo de carbonatação incluem a umidade relativa do ar, a frequência de exposição à chuva e a concentração atmosférica de dióxido de carbono (CO_2), entre outros fatores ambientais. No que se refere aos fatores internos, destacam-se a composição do concreto, especialmente quanto ao uso de adições minerais, a resistência à compressão, a relação água/aglomerante e as condições de execução e de cura do material no momento da aplicação.

Entre os fatores externos, alguns se mostram particularmente determinantes para o avanço da carbonatação, conforme evidenciado por estudos experimentais. A partir das análises realizadas por Chen, Liu e Yu (2018), observa-se que a temperatura, a concentração de CO_2 e a umidade relativa estão diretamente associadas à profundidade de carbonatação. A temperatura apresenta relação proporcional com o avanço da frente carbonatada e com a resistência à compressão, enquanto a concentração de CO_2 exerce influência de caráter exponencial e a umidade relativa apresenta comportamento polinomial em sua interação com esse processo.

Com base nessas variáveis, os próximos tópicos apresentam e discutem os principais fatores que condicionam o avanço da carbonatação em materiais cimentícios, com ênfase nas interações entre as propriedades do concreto e as características do ambiente de exposição.

2.3.1 Umidade relativa do ar

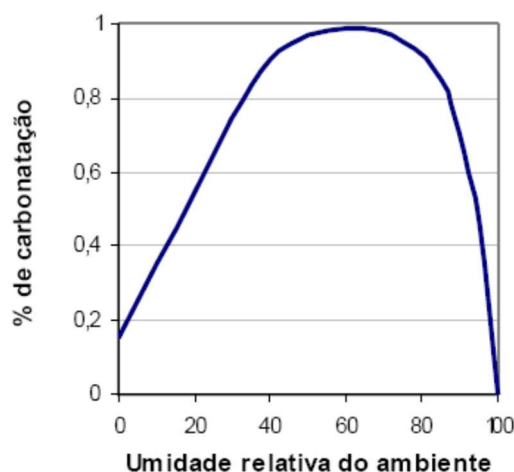
A umidade relativa do ar configura-se como uma variável ambiental de significativa influência sobre o comportamento da carbonatação em estruturas de concreto. Esse parâmetro atua diretamente na velocidade de penetração e na profundidade alcançada pelo dióxido de carbono (CO_2) na matriz cimentícia, uma vez que o transporte do gás pela rede porosa do concreto depende da presença de umidade em equilíbrio.

Para Chen, Liu e Yu (2018) a umidade relativa apresenta influência significativa sobre a carbonatação do concreto, cuja profundidade aumenta até aproximadamente 70% de umidade e diminui em valores superiores a esse limite, caracterizando um comportamento polinomial. Em baixas umidades, a película líquida formada nos poros foi insuficiente para sustentar o processo, enquanto, em umidades elevadas, a presença de água reduziu a transmissão de CO_2 .

Felix (2018) destaca que, durante o processo de difusão, a água presente nos poros do concreto funciona como meio condutor do CO_2 , facilitando sua migração até os produtos hidratados do cimento. No entanto, a efetividade desse mecanismo está condicionada ao grau de saturação dos poros: ambientes com poros totalmente secos ou completamente saturados tendem a dificultar ou até impedir o avanço do gás. Segundo Verbeck (1958), o intervalo ótimo para a ocorrência da carbonatação

situa-se entre 50% e 70% de umidade relativa do ar, faixa em que há um equilíbrio favorável entre a difusão gasosa e a presença de umidade. Esse comportamento é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Influência da umidade relativa do ambiente.



Fonte: Verbeek (1958).

No estudo desenvolvido por Felix, Carrazedo e Possan (2017), realizou-se a modelagem do processo de carbonatação em função da umidade relativa do ambiente. Os resultados obtidos indicaram que a taxa de carbonatação atinge seu valor máximo quando a umidade do ar se aproxima de 60%, evidenciando uma condição ideal para a difusão do dióxido de carbono na matriz cimentícia.

2.3.2 Incidência e exposição à chuva

A exposição do elemento estrutural à ação das chuvas está diretamente associada ao grau de umidade do concreto, influenciando significativamente o comportamento do material frente à carbonatação. Em termos de exposição, os elementos podem estar situados em ambientes internos, com pouca ou nenhuma incidência de chuvas; em áreas externas parcialmente protegidas, com exposição intermediária; ou em ambientes externos totalmente desprotegidos, sujeitos a altos níveis de precipitação.

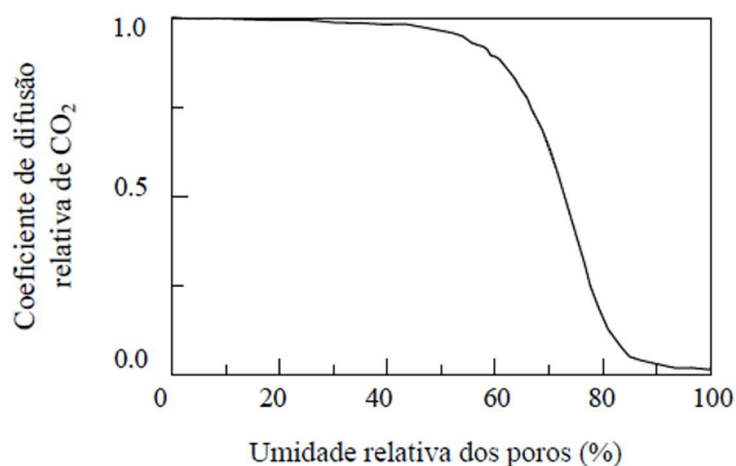
De acordo com Steffens, Dinkler e Ahrens (2002), elementos estruturais frequentemente expostos à chuva tendem a apresentar menor profundidade de carbonatação, pois os poros do concreto permanecem saturados de água por longos períodos do ano, o que dificulta a difusão do dióxido de carbono. Em contraste,

superfícies protegidas da ação direta das chuvas, como áreas sob marquises ou coberturas, geralmente mantêm os poros parcialmente secos, favorecendo a penetração do CO_2 e, assim, o avanço da frente de carbonatação ao longo do tempo. Essa condição de “sombra hídrica” pode acelerar expressivamente o processo de despassivação das armaduras nessas regiões.

Neville e Brooks (2013) reforçam essa narrativa ao afirmarem, em seus estudos, que a ação da chuva produz efeitos muito semelhantes aos observados em ambientes com umidade relativa excessivamente elevada. Em ambas as situações, a abundância de água promove a saturação dos poros do concreto, reduzindo expressivamente a capacidade de difusão do dióxido de carbono pela matriz cimentícia. Como consequência, o avanço da carbonatação torna-se substancialmente mais lento nas superfícies expostas à precipitação, uma vez que a migração do CO_2 é fortemente limitada pelo preenchimento contínuo dos poros com água.

A Figura 6 ilustra a correlação entre o grau de saturação dos poros e a facilidade de difusão do dióxido de carbono na matriz cimentícia, reforçando o papel da umidade como variável crítica no mecanismo de carbonatação.

Figura 6 - Influência da umidade relativa do ambiente.



Fonte: Traduzido de Steffens, Dinkler e Ahrens (2002).

2.3.3 Concentração de CO_2 no ambiente

A carbonatação do concreto, por constituir um fenômeno da própria natureza, manifesta-se de forma lenta e progressiva, exigindo longos períodos para

que a frente carbonatada avance alguns milímetros na massa cimentícia. Tal comportamento deve-se, principalmente, à baixa concentração de dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera (PAPADAKIS; VAYENAS; FARDIS, 1991; HELENE, 1993).

Nesse contexto, o ambiente em que a estrutura se encontra torna-se um fator crucial nas análises de carbonatação, uma vez que influencia diretamente a disponibilidade de CO_2 para reação com os compostos da matriz cimentícia. Ambientes urbanos com elevado tráfego de veículos, espaços confinados com pouca ventilação e áreas industriais com emissões contínuas decorrentes da queima de combustíveis fósseis constituem exemplos típicos de locais com maior concentração de CO_2 . Essas condições favorecem a difusão do gás no interior do concreto, acelerando o avanço da frente de carbonatação (MARTINS, 2011).

Na Tabela 1, constam as concentrações médias de CO_2 às quais as estruturas estão expostas, de acordo com o ambiente em que estão inseridas.

Tabela 1 - Indicação das concentrações de CO_2 conforme o ambiente.

Ambiente	Concentração de CO_2 (% em volume)	
	(NEVILLE 1997)	(SAETTA; VITTALINA 2004)
Ambiente rural	0,03	0,015
Cidade	0,3 a 1	0,036
Ambiente de laboratório não ventilado	> 0,1	-
Ambiente industrial	-	0,045

Fonte: Compilado em Lavinicki (2024).

2.3.4 Composição do material

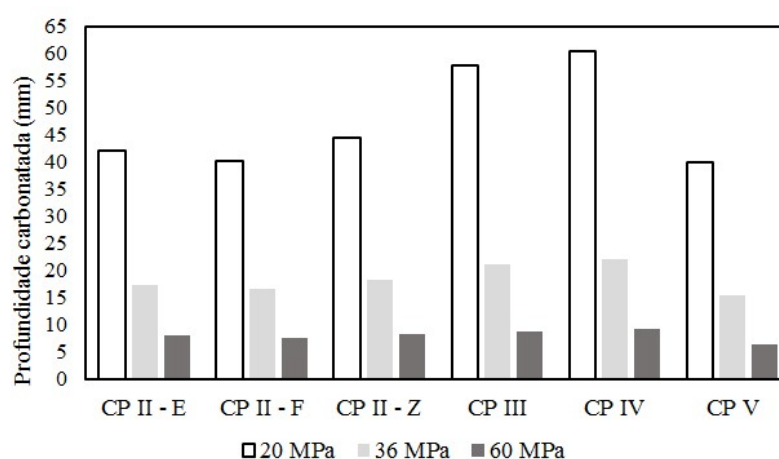
As adições utilizadas na composição do concreto podem ser incorporadas para complementar o cimento na formação da fração de materiais finos reativos ou, em determinadas situações, substituir parcialmente o aglomerante principal. Segundo Fonseca (2010), a adoção dessas adições no setor da construção civil é motivada por fatores tecnológicos, econômicos e ambientais.

Isaia (1999) ressalta que o uso de adições pozolânicas no concreto reduz o tamanho dos poros na matriz cimentícia, resultando em menor permeabilidade do material. No entanto, essas adições também reagem com o hidróxido de cálcio

(Ca(OH)_2) liberado durante a hidratação do cimento, reduzindo o pH da solução intersticial e criando condições favoráveis à difusão do dióxido de carbono (CO_2) no interior do concreto. Como consequência, a frente de carbonatação tende a avançar mais rapidamente em concretos que contêm esse tipo de adição. Esse efeito, embora possa ser compensado pelo ganho de densificação da microestrutura, deve ser considerado em projetos de estruturas de concreto armado, uma vez que a redução do pH está diretamente associada ao risco de despassivação das armaduras.

Diante desse cenário, verifica-se que a utilização de cimentos nacionais compostos, com diferentes tipos de adições, pode resultar em materiais menos resistentes à carbonatação quando comparados ao cimento Portland puro. No entanto, essa condição tende a ser compensada por fatores como a redução da permeabilidade decorrente das adições, a menor quantidade de água necessária para a mistura e o consequente refinamento da estrutura de poros do concreto (FERREIRA; JALALI, 2006). Esse equilíbrio entre menor alcalinidade e maior densificação da matriz cimentícia reforça a importância de avaliar a composição do cimento em função das condições de exposição previstas, sobretudo em estruturas sujeitas a ambientes agressivos.

Figura 7 - Profundidade de carbonatação em concretos com diferentes cimentos.



Fonte: Felix, Carrazedo e Possan (2017).

O estudo conduzido por Felix, Carrazedo e Possan (2017) analisou o impacto das adições na progressão da carbonatação em concretos produzidos com diferentes tipos de cimento Portland (Figura 7). Por meio de modelagem, os autores observaram que os cimentos CP III, que contêm escória de alto-forno, e CP IV,

formulados com adições pozolânicas, apresentaram as maiores profundidades de carbonatação. Em contrapartida, o cimento CP V, caracterizado pela ausência de adições em sua composição, apresentou as menores profundidades de carbonatação ao longo do tempo. Esses resultados reforçam a necessidade de considerar a escolha do tipo de cimento como fator determinante para a durabilidade de estruturas de concreto, especialmente em ambientes com alta propensão ao avanço da frente carbonatada.

No conjunto de componentes do concreto, o elemento mais vulnerável à carbonatação é o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). Apesar de também estarem presentes, suas proporções são bastante reduzidas, o hidróxido de potássio (KOH) e o hidróxido de sódio (NaOH) (CUNHA; HELENE, 2001). Quando se trata de argamassas, o emprego habitual de cal hidratada em sua formulação favorece a presença de dois compostos predominantes passíveis de carbonatação: o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e o hidróxido de magnésio (Mg(OH)_2). Essa característica pode contribuir para uma redução da velocidade do processo de carbonatação em comparação às argamassas exclusivamente à base de cimento (COSTA; PACHECO, 2018).

Em consonância com o exposto anteriormente, Mazurana (2019) confirma que argamassas com cal apresentam menor carbonatação, apesar de possuírem maior capacidade de fixar CO_2 a longo prazo, em razão da reserva alcalina adicional proporcionada pela matriz à base de cal.

No que diz respeito à proporção de agregados graúdos, a literatura aponta dois efeitos antagônicos sobre a carbonatação do concreto. O primeiro está relacionado ao fato de que, ao aumentar a fração de agregados graúdos, reduz-se proporcionalmente a quantidade de cimento na mistura, o que implica menor teor de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) disponível para reagir com o dióxido de carbono (CO_2). Essa condição tende a acelerar a carbonatação. O segundo efeito observado é a diminuição da difusão do CO_2 na matriz, já que os agregados graúdos, por apresentarem maior densidade em comparação à pasta de cimento endurecida, dificultam o transporte do gás no interior do concreto (MI; PAN; SHEN, 2019).

No que se refere às características dos agregados graúdos, Han et al. (2016) investigaram, por meio de modelagem com elementos finitos, a influência desses parâmetros na difusão do dióxido de carbono (CO_2) no concreto. Os autores concluíram que não há relação direta entre a profundidade da frente de carbonatação

e a dimensão máxima característica dos agregados. Por outro lado, verificaram que o aumento da proporção de agregados na mistura tende a reduzir os índices de carbonatação do concreto, resultado corroborado posteriormente por experimentos conduzidos por Mi, Pan e Shen (2019). Esse comportamento reforça a hipótese de que a maior presença de agregados cria barreiras físicas que dificultam a penetração do CO_2 , ainda que o tamanho individual dos agregados não exerça efeito significativo sobre o avanço da frente carbonatada.

2.3.5 Condições de execução e cura

As circunstâncias de execução do concreto no momento da concretagem influenciam diretamente a permeabilidade do concreto e, conseqüentemente, o processo de carbonatação. Entre os aspectos mais relevantes destacam-se a dosagem adequada dos materiais, o transporte, o lançamento, o adensamento e a cura, etapas que, quando bem executadas, contribuem para a obtenção de uma matriz cimentícia mais densa e menos suscetível à penetração de agentes agressivos.

Ferreira (2013) ressalta que a forma como a cura úmida é conduzida desempenha papel decisivo no desempenho do concreto ao longo de sua vida útil, especialmente no que se refere ao fenômeno da carbonatação. A realização de uma cura inicial prolongada reduz significativamente a taxa de avanço da frente carbonatada, pois favorece uma hidratação mais completa do cimento, diminui a porosidade e aumenta a compacidade da estrutura. Por outro lado, práticas inadequadas de execução ou de cura podem gerar defeitos, como vazios, fissuras e elevada conectividade dos poros, condições que aceleram a difusão do CO_2 no interior do concreto e comprometem a durabilidade da estrutura.

Uma cura inadequada do concreto favorece a formação de uma rede de poros capilares interconectados na superfície do elemento estrutural, facilitando o acesso de agentes agressivos ao seu interior. Por essa razão, a execução correta desse procedimento tem como objetivo principal evitar a retração decorrente da evaporação precoce da água, garantindo um nível mais elevado de hidratação do cimento. Esse processo resulta em maior resistência mecânica e menor permeabilidade do material (MEHTA; MONTEIRO, 2008; AİTCIN, 2000).

Pauletti (2009) enfatiza que o processo de cura do concreto desempenha papel determinante no avanço da carbonatação, uma vez que influencia diretamente

a formação e o refinamento da microestrutura da matriz cimentícia. Essa microestrutura, por sua vez, controla a difusão do dióxido de carbono (CO_2) pelos poros do material. Dessa maneira, a profundidade alcançada pela frente carbonatada está diretamente relacionada ao tipo e à qualidade do processo de cura empregado, pois este interfere nas propriedades de hidratação do cimento e, conseqüentemente, na permeabilidade do concreto.

2.3.6 Relação água-cimento e resistência à compressão do material

A permeabilidade do concreto e a configuração de sua estrutura porosa estão entre os fatores mais relevantes no processo de carbonatação. Esses aspectos estão diretamente associados à relação água-cimento adotada na mistura e à resistência à compressão do material. A relação água-cimento exerce influência direta sobre a profundidade da frente de carbonatação, uma vez que está vinculada à porosidade total da pasta de cimento (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Estudos indicam que, à medida que a relação água-cimento é reduzida ou a resistência à compressão aumenta, diminui o volume total de poros, tornando a microestrutura mais densa e menos conectada (RABEHI; MEZGHICHE; GUETTALA, 2013). Além disso, a qualidade da pasta cimentícia está diretamente condicionada a esse parâmetro, que controla a velocidade de carbonatação em conjunto com a concentração de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente na solução intersticial (HELENE, 1993). Dessa forma, o controle adequado da relação água-cimento é uma medida essencial para aumentar a durabilidade das estruturas, pois contribui para a formação de uma matriz menos permeável e mais resistente à penetração do dióxido de carbono (CO_2).

A resistência à compressão e a relação água-cimento têm um grau de influência equivalente no comportamento do concreto frente ao processo de carbonatação. Essa correlação ocorre porque concretos de maior resistência são, em geral, produzidos com menores relações água-cimento, o que resulta em menor porosidade e, conseqüentemente, em taxas reduzidas de carbonatação. O inverso também se aplica: concretos de menor resistência tendem a apresentar relações água-cimento mais elevadas, o que aumenta a permeabilidade da matriz cimentícia e favorece a penetração do dióxido de carbono (CO_2) (FELIX, 2018). Portanto, esses

dois parâmetros devem ser analisados em conjunto na etapa de dosagem, visto que impactam diretamente a durabilidade da estrutura.

2.3.7 Proteção superficial

Lo et al. (2016) analisaram o efeito de diferentes tipos de revestimentos superficiais sobre o avanço da carbonatação em concretos, por meio de ensaios acelerados em elementos que receberam aplicação direta de tinta na superfície. O estudo avaliou oito tipos de tintas comumente utilizadas em edificações, sendo quatro à base de emulsões convencionais destinadas ao uso interno e quatro formulações sintéticas recomendadas para uso externo.

Os resultados obtidos mostraram que, aos 28 dias, concretos da classe C25 apresentaram redução de 56% na profundidade de carbonatação quando protegidos com tintas internas e de 71% quando revestidos com tintas externas. Para os concretos da classe C35, as reduções registradas foram de 57% e 63%, respectivamente. Esses resultados confirmam que a utilização de revestimentos superficiais com tintas atua como uma barreira física eficaz, reduzindo significativamente o avanço da frente carbonatada no concreto. Além disso, o desempenho superior das tintas externas em comparação às internas sugere que formulações mais resistentes às intempéries podem oferecer maior durabilidade da proteção ao longo do tempo.

No contexto da reação de carbonatação em argamassas, comumente aplicadas como camada protetora do concreto armado, reconhece-se, de forma geral, que a porosidade do material influencia diretamente a penetração do dióxido de carbono (CO_2), especialmente em condições de umidade semelhantes. A porosidade das argamassas simples está diretamente ligada ao excesso de água empregado na mistura, apresentando proporcionalidade com a relação água/aglomerante adotada. Já em argamassas mistas, a presença de cal, que apresenta maior massa específica do que o cimento, demanda maior volume de água para se alcançar a mesma consistência. A água não aproveitada nas reações de hidratação atua como agente de aumento da porosidade do material (QUARCIONI et al., 2009).

Pedry (2020), visando quantificar o potencial de captura de dióxido de carbono (CO_2) em argamassas de revestimento, analisou o efeito da aplicação de pinturas imobiliárias na redução do avanço da carbonatação. Para tal, foram moldados

corpos de prova prismáticos com traço 1:1:6 (cimento:cal:areia), diferenciados pelo tipo de tinta aplicada à sua superfície. Os resultados obtidos foram confrontados com os de corpos de prova de referência, isentos de qualquer revestimento.

Quatro tintas imobiliárias premium, em tonalidades neutras, látex PVA, acrílica fosca, acrílica acetinada e acrílica semibrilho, foram testadas. Os corpos de prova correspondentes foram submetidos tanto a três condições ambientais naturais (interno, externo protegido e externo desprotegido) quanto a ensaios de carbonatação acelerada conduzidos em ambiente controlado (23 °C, 60% de umidade relativa e concentração de 5% de CO₂). Essa metodologia experimental permitiu avaliar, de forma comparativa, a eficácia de cada tipo de tinta como barreira física à difusão do CO₂, fornecendo subsídios importantes para a escolha de sistemas de proteção superficial em argamassas de revestimento.

Conforme observado por Pedry (2020), a aplicação de proteção superficial promoveu uma diminuição expressiva na profundidade de carbonatação ao longo do tempo, com destaque para as amostras tratadas com tintas acrílicas. No ambiente externo protegido, após 190 dias de exposição, verificaram-se reduções médias de 71,24% e 273,89% na profundidade de carbonatação, quando comparadas, respectivamente, às amostras revestidas com látex PVA e às amostras sem proteção.

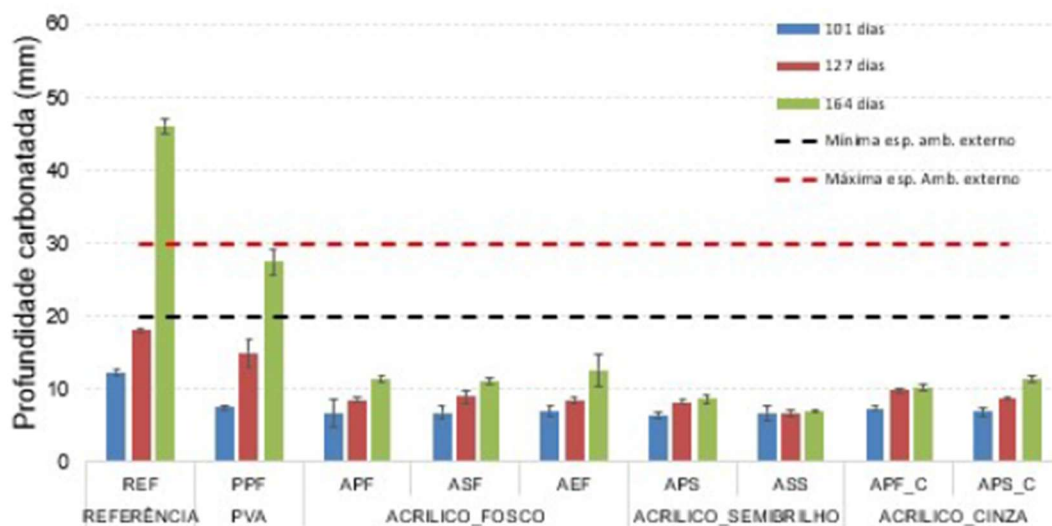
Verificou-se, ainda, que as variações de acabamento das tintas acrílicas (fosca, acetinada e semibrilho) resultaram em desempenhos muito próximos, o que reforça a alta eficiência desse tipo de revestimento como barreira física à difusão de dióxido de carbono (CO₂). Esses resultados demonstram que, independentemente do tipo de acabamento superficial adotado, as tintas acrílicas apresentam desempenho semelhante, o que constitui uma vantagem no processo de especificação de revestimentos, seja por aspectos econômicos ou estéticos. Os achados confirmam, portanto, a importância da proteção superficial na contenção do avanço da frente de carbonatação em argamassas de revestimento.

Convém destacar que, segundo a NBR 15079 (ABNT, 2019), tanto as tintas látex acrílicas quanto as látex PVA são permitidas para aplicações internas. Para utilização em áreas externas, contudo, a norma estabelece que devem ser empregados produtos enquadrados nas classes Standard, Premium ou Superpremium. A ideia difundida de que as tintas acrílicas seriam destinadas exclusivamente a ambientes externos e as PVA, apenas ao uso interno, mostra-se equivocada, conforme aponta Bonfim (2013). Há no mercado tintas acrílicas de linhas

mais simples ou de menor custo, cuja recomendação restringe-se a interiores, assim como tintas látex PVA classificadas como Standard e Premium que também são indicadas para uso em superfícies externas. Essa diferenciação normativa e técnica torna-se crucial para evitar especificações inadequadas, que podem comprometer tanto a durabilidade quanto o desempenho funcional dos sistemas de proteção superficial.

Com base nesse panorama, Barbosa (2021) analisou o desempenho de diferentes sistemas de pintura aplicados como proteção superficial na difusão de CO₂ em argamassas de revestimento. Para isso, foram moldadas amostras com dois traços distintos, 1:1:6 e 1:2:9 (cimento:cal:areia), que, após 28 dias de cura, receberam acabamentos com tintas imobiliárias variando quanto à base (acrílica ou PVA), ao tipo de acabamento (fosco ou semibrilho) e à cor (branca ou cinza). As argamassas foram submetidas a ensaios de carbonatação natural e acelerada, e a profundidade da frente carbonatada foi monitorada aos 28, 101, 127 e 164 dias de exposição. Os resultados referentes ao traço 1:1:6 estão apresentados na Figura 8.

Figura 8 - Profundidade de carbonatação nos sistemas argamassados.



Fonte: Barbosa (2021).

Os resultados obtidos por Barbosa (2021), analisados por meio de testes estatísticos, evidenciaram diferenças significativas entre os tratamentos avaliados. As amostras sem proteção superficial apresentaram as maiores profundidades de carbonatação, seguidas pelas recobertas com tintas à base de PVA e, posteriormente, pelas protegidas com tintas acrílicas nos acabamentos fosco e semibrilho, estas

últimas com desempenho mais eficiente como barreira à difusão de CO_2 . Considerando o tempo de exposição de 164 dias, verificou-se que a velocidade de carbonatação foi até 3,6 vezes menor nas argamassas tratadas com tinta acrílica standard semibrilho e entre 2,0 e 2,5 vezes inferior nas argamassas tratadas com tinta acrílica fosca, independentemente da coloração. Em contraste, os revestimentos à base de PVA apresentaram desempenho menos satisfatório, com redução de apenas 1,2 vezes em comparação à matriz de referência.

À luz desses resultados e considerando que os estudos disponíveis acerca do efeito protetivo das tintas concentram-se, em geral, na aplicação direta sobre o concreto ou a argamassa de revestimento, esta pesquisa propõe-se a avaliar a influência de sistemas de proteção superficial multicamadas, constituídos por argamassa, massa corrida, selador e tinta, sobre a vida útil de estruturas de concreto armado. Dessa forma, verifica-se a importância do desenvolvimento deste estudo.

2.4 MODELOS DE PREDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Nas últimas décadas, diversos pesquisadores têm direcionado esforços ao aprimoramento de modelos de previsão da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto. Segundo Possan (2010), tais formulações refletem a busca da comunidade técnico-científica por compreender e representar, de maneira sistemática, os fatores que condicionam a durabilidade do concreto armado.

Embora haja ampla disponibilidade de dados experimentais na literatura, o maior desafio associado ao desenvolvimento de modelos de predição reside na generalização dos fatores que influenciam os parâmetros da carbonatação. Essa dificuldade decorre da elevada variabilidade entre as condições experimentais e as diferentes composições de concreto analisadas em laboratório. Além disso, ainda não foi estabelecida uma correlação consistente entre as velocidades de carbonatação obtidas em ensaios acelerados e as verificadas em ambiente natural (TONGARIA; MANDAL; MOHAN, 2018).

Os estudos relacionados à carbonatação do concreto podem ser agrupados em duas vertentes principais: os modelos analíticos e os numéricos. Possan (2010) explica que os modelos analíticos são elaborados com base em princípios matemáticos e físicos que descrevem o fenômeno, buscando identificar e incorporar os parâmetros que mais influenciam o processo de carbonatação.

Em geral, essas formulações resultam na definição de equações ou modelos algébricos que relacionam variáveis de entrada, como a concentração de dióxido de carbono (CO_2), a umidade relativa, a temperatura e a idade do concreto, à taxa de avanço da frente carbonatada.

Os modelos numéricos distinguem-se dos analíticos por sua maior complexidade, pois consideram um conjunto mais amplo de variáveis de entrada e suas interações. No âmbito da engenharia de estruturas, esses métodos podem ser agrupados em métodos de domínio, como o Método dos Elementos Finitos (MEF), e métodos de contorno, como o Método dos Elementos de Contorno (MEC). Tais abordagens permitem considerar geometrias complexas, heterogeneidades da microestrutura do concreto e condições de contorno variáveis, conferindo maior generalidade às simulações em comparação aos modelos analíticos (SILVA, 2020).

Além dos métodos numéricos clássicos, têm se destacado, mais recentemente, os modelos baseados em aprendizado de máquina, que identificam padrões e relações não lineares a partir de dados experimentais, sem a necessidade de descrição explícita dos mecanismos físico-químicos envolvidos no processo de carbonatação. Sua estrutura é baseada em algoritmos de aprendizado de máquina, capazes de identificar padrões a partir de dados históricos ou de resultados experimentais. Dessa forma, tais modelos apresentam condições de representar relações não lineares e aspectos complexos do processo de carbonatação, os quais dificilmente são contemplados pelos modelos analíticos tradicionais. Além disso, destacam-se pela flexibilidade, que possibilita seu aprimoramento contínuo à medida que novos dados são incorporados, o que amplia a precisão preditiva e fortalece seu potencial de aplicação em cenários reais de projeto e manutenção.

2.4.1 Modelos analíticos

Grande parte dos modelos analíticos destinados à estimativa da profundidade de carbonatação baseia-se no modelo clássico de Tuutti (1982), descrito a seguir. Essa formulação consolidou-se como referência em estudos laboratoriais por permitir a determinação da taxa de difusão do dióxido de carbono (CO_2) no interior do material. Sua simplicidade e ampla aplicabilidade fizeram dela um marco na área da durabilidade, servindo de base para o desenvolvimento de formulações subsequentes voltadas à previsão da vida útil de estruturas de concreto armado.

2.4.1.1 Modelo de TUUTTI

A formulação proposta por Tuutti (1982) descreve a penetração do dióxido de carbono (CO_2) no concreto, com base no processo de difusão de um gás em um meio poroso, e é expressa pela Equação 4. Essa abordagem, fundamentada na Lei de Fick, considera que a carbonatação avança proporcionalmente à raiz quadrada do tempo, permitindo relacionar parâmetros de exposição e características do material à profundidade da frente carbonatada.

$$y = k\sqrt{t} \quad (4)$$

Onde:

k = coeficiente de carbonatação ($\text{mm/ano}^{0.5}$);

t = tempo (anos).

É importante destacar que a equação de Tuutti (1982) representa uma simplificação do fenômeno e pode não contemplar todas as particularidades do processo de carbonatação sob diferentes condições de exposição. Essa limitação decorre principalmente da dificuldade em determinar com precisão o coeficiente de carbonatação “ k ”. Essa complexidade levou a comunidade científica a buscar alternativas capazes de correlacionar o valor de “ k ” com parâmetros internos do material, viabilizando a proposição de modelos mais simples e práticos de aplicação.

2.4.1.2 Modelo de SMOLCZYK

Smolczyk (1976) propôs uma formulação para estimar a profundidade de carbonatação a que uma estrutura de concreto está submetida ao longo do tempo, expressa pela Equação 5. Esse modelo, assim como o de Tuutti (1982), baseia-se no princípio da difusão do dióxido de carbono (CO_2) no interior da matriz cimentícia e é amplamente utilizado como referência em estudos sobre a durabilidade das estruturas.

$$y = a \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{f_c}} - \frac{1}{\sqrt{f_{clim}}} \right) \cdot \sqrt{t} \quad (5)$$

Onde:

y = profundidade carbonatada (cm);

a = velocidade de carbonatação;

f_c = resistência à compressão do concreto (kgf/cm²);

f_{clim} = valor limite da resistência à compressão do concreto que pode ser carbonatado (kg/cm²);

t = tempo de exposição (semanas).

Nessa formulação, em contraste com a Equação 4, a resistência à compressão do concreto é considerada uma variável diretamente associada à profundidade de carbonatação. Entretanto, de modo semelhante à dificuldade de determinar o coeficiente de carbonatação (k), a Equação 5 também apresenta restrições à aplicação prática, pois requer a definição prévia da variável “ a ”, correspondente à velocidade de carbonatação.

2.4.1.3 Modelo de VESIKARI

O modelo proposto por Vesikari (1988) busca superar as limitações associadas ao uso do modelo de Tuutti (1982), ao apresentar uma forma de cálculo do coeficiente de carbonatação “ k ”, considerando a relação água-cimento da mistura. Essa abordagem é descrita pela Equação 6. Ao estabelecer uma correlação direta entre o parâmetro “ k ” e a relação água-cimento, o modelo de Vesikari proporciona maior praticidade para aplicações em estudos de previsão da durabilidade, reduzindo a dependência de medições experimentais complexas.

$$k = 26. (ac - 0,3)^2 + 1,6 \quad (6)$$

Onde:

k = coeficiente de carbonatação (mm/ano^{0.5});

ac = relação água-cimento, limites: $0,45 < ac < 0,75$.

De acordo com Vesikari (1988), as condições ambientais influenciam diretamente a aplicabilidade desse modelo. Assim, para estruturas expostas em ambientes externos e sem proteção, recomenda-se que o coeficiente k seja multiplicado por 4, a fim de representar o nível de agressividade mais elevado imposto por essas condições. Essa adaptação amplia a confiabilidade da equação, permitindo abordar, de forma simplificada, os efeitos de diferentes cenários de exposição.

2.4.1.4 Modelo de PAPADAKIS, VAYENAS E FARDIS

A formulação proposta por Papadakis, Vayenas e Fardis (1991) representou um avanço relevante na predição da carbonatação, quando comparada às equações anteriormente apresentadas, oferecendo nível de acurácia superior para a época. Essa equação, apresentada como Equação 7, foi concebida a partir da análise detalhada da microestrutura do concreto e de sua relação com o processo de difusão do dióxido de carbono (CO_2). Ao incorporar parâmetros microestruturais, o modelo possibilitou uma compreensão mais precisa das variáveis que condicionam o avanço da frente carbonatada, consolidando-se como referência nos estudos de durabilidade de estruturas de concreto armado.

$$e_c = \sqrt{\frac{2D_{CO_2}[CO_2]^0}{[Ca(OH)_2]^0 + 3[CSH]^0 + 3[C_3S]^0 + 2[C_2S]^0}t} \quad (7)$$

Onde:

e_c = profundidade de carbonatação (m);

CO_2 = concentração molar do CO_2 (mol/m³);

D_{CO_2} = coeficiente de difusão efetivo do CO_2 no material carbonatado (m²/s);

t = tempo (s);

$Ca(OH)_2$ e CSH = concentração molar dos hidratos (mol/m³);

C_3S e C_2S = concentração molar dos anidros (mol/m³);

O índice 0 corresponde às concentrações iniciais.

O modelo proposto por Papadakis, Vayenas e Fardis (1991) possibilitou, pela primeira vez, o estabelecimento de uma base teórica para o cálculo do coeficiente de carbonatação “k” utilizado no modelo de Tuutti (1982). Essa contribuição representou um marco importante na evolução dos estudos sobre carbonatação, pois viabilizou a determinação do parâmetro “k” de forma mais fundamentada e menos dependente de ajustes empíricos, aumentando a confiabilidade das previsões de durabilidade.

2.4.1.5 Modelo de BOB E AFFANA

O modelo desenvolvido por Bob e Affana (1993), apresentado na Equação 8, foi derivado de uma extensa campanha experimental que possibilitou identificar os fatores de maior influência na difusão do dióxido de carbono (CO₂) no concreto. A equação desenvolvida pelos autores estabelece a correlação entre a profundidade de carbonatação e variáveis como a concentração de CO₂, a umidade relativa do ambiente, a resistência à compressão do concreto e a composição do cimento, contemplando alguns tipos específicos de aglomerante. Essa proposta buscou integrar, em uma única expressão, variáveis ambientais e propriedades do material, conferindo maior robustez às estimativas do avanço da frente carbonatada.

$$y = 150. \left(\frac{c \cdot k \cdot d}{f_c} \right) \cdot \sqrt{t} \quad (8)$$

Onde:

c = coeficiente do tipo de cimento (Tabela 2);

k = coeficiente dependente da umidade relativa do ar (Tabela 2);

f_c = resistência à compressão do concreto (MPa);

d = coeficiente referente à quantidade de CO₂ (Tabela 2).

Tabela 2 - Coeficientes do modelo de Bob e Affana.

a) Coeficiente dependente da umidade do ar.		b) Coeficiente da concentração de CO ₂ .	
Umidade Relativa	k	Quantidade de CO ₂	d
UR ≤ 60	1,0	CO ₂ ≤ 0,03%	1,0
70 ≤ UR ≤ 75	0,7	0,03% < CO ₂ ≤ 0,1%	2,0
80 ≤ UR ≤ 85	0,5		
UR ≤ 90	0,3		

c) Coeficiente associado ao tipo de cimento.	
Tipo de cimento	c
Cimento Portland (CP40 e CP45)	0,8
Cimento Portland (CP50 e CP55)	1,0
Cimento Portland + 15% de adições	1,2
Cimento Portland + 30% de adições	1,4
Cimento Portland + 50% de adições	2,0

Fonte: Bob e Affana (1993).

2.4.1.6 Modelo de EHE

O modelo estabelecido pela norma EHE (2008), expresso na Equação 9, introduziu uma abordagem diferenciada para estimar a carbonatação em concretos. Em contraste com as formulações anteriores, essa proposta passou a contemplar variáveis até então pouco exploradas na literatura, como a presença de ar nos poros da matriz cimentícia. A incorporação desse parâmetro permitiu uma avaliação mais realista do fenômeno, sobretudo em concretos submetidos a distintos níveis de saturação, consolidando o modelo como uma importante referência para os estudos de durabilidade em diferentes condições de exposição.

$$y = C_{amb} \cdot C_{ar} \cdot a \cdot f_{cm}^b \cdot \sqrt{t} \quad (9)$$

Onde:

y = profundidade de carbonatação (m);

f_{cm} = resistência média a compressão (Mpa);

C_{amb} = coeficiente do ambiente (Tabela 3);

C_{ar} = coeficiente do ar incorporado (Tabela 3);

a e b = parâmetros em função do tipo de aglomerante (Tabela 3).

A formulação prevista na norma EHE (2008) tem como fundamento a equação proposta por Tuutti (1982), no qual o coeficiente de carbonatação (k) é definido como o produto dos quatro primeiros termos apresentados na Equação 9.

Tabela 3 - Coeficientes do modelo da norma EHE.

a) Coeficiente do ar incorporado.		b) Coeficiente do ambiente.	
Ar incorporado	C_{ar}	Ambiente	C_{amb}
< 4,5%	1,0	Protegido de chuva	1,0
≥ 4,5%	0,7	Desprotegido de chuva	0,7

c) Coeficientes dependentes dos tipos de cimento.		
Tipo de cimento	a	b
Cimento Portland	1800,00	-1,70
Cimento Portland + 28% de CV	360,00	-1,20
Cimento Portland + 9% de AS	400,00	-1,20
Cimento Portland + 65% de Escória	360,00	-1,20

Fonte: EHE (2008).

2.4.1.7 Modelo de POSSAN

O estudo desenvolvido por Possan (2010) resultou na formulação apresentada na Equação 10, que contempla um conjunto mais amplo de fatores que influenciam o processo de carbonatação do concreto. Em relação aos modelos anteriormente discutidos, essa proposta incorpora um maior número de parâmetros, considerando o tipo de cimento empregado, o ambiente e a condição de exposição do elemento estrutural. Outro aspecto relevante é a inclusão da influência da exposição às chuvas, variável que, até então, havia sido considerada apenas no modelo de Vesikari (1988) (Equação 6). A ampliação dos parâmetros avaliados tornou o modelo de Possan uma ferramenta mais abrangente para estudos de previsão da vida útil das estruturas, especialmente quando aplicado a condições reais de serviço.

$$y = k_c \cdot \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[\left(k_{ad} \cdot ad^{\frac{3}{2}} \right) + \left(k_{CO_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}} \right) - \left(\frac{k_{UR} \cdot (UR - 0,58)^2}{100 + f_c} \right) \right] \cdot k_{ce} \quad (10)$$

Onde:

y = profundidade de carbonatação (mm);

f_c = resistência média à compressão (MPa);

k_c = fator dependente do tipo de cimento (Tabela 4 “a”);

k_{fc} = fator de resistência à compressão do concreto, em função do cimento (Tabela 4 “a”);

t = tempo (anos);

ad = teor de adição pozolânica no concreto (% em relação à massa do concreto);

k_{ad} = fator dependente das adições, em função do cimento (Tabela 4 “a”);

UR = umidade relativa do ar (%*0,01);

k_{UR} = fator dependente da umidade relativa do ar, em função do cimento (Tabela 4 “a”);

CO_2 = teor de dióxido de carbono no ambiente (%);

k_{CO_2} = fator dependente do teor de dióxido de carbono, em função do cimento (Tabela 4 “a”);

k_{ce} = fator dependente do ambiente de exposição (protegido ou desprotegido), em função das condições de exposição do concreto (Tabela 4 “b”).

Tabela 4 - Coeficientes do modelo em função (a) das características do concreto e das condições ambientais (b) das condições de exposição (POSSAN, 2010).

a)	b)
----	----

Tipo de cimento	Características do concreto			Condições ambientais		Condições de exposição da estrutura	
	Cimento	f_c	Adição	CO_2	UR	Proteção a chuva	k_{ce}
	k_c	k_{fc}	k_{ad}	k_{CO_2}	k_{UR}		
CP I	19,80	1,70	0,24	18,00	1300	Ambiente interno Protegido da chuva	1,30
CP II E	22,48	1,50	0,32	15,50	1300	Ambiente externo Protegido da chuva	1,00
CP II F	21,68	1,50	0,24	18,00	1100	Ambiente externo Desprotegido da chuva	0,65
CP II Z	23,66	1,50	0,32	15,50	1300		
CP III	30,50	1,70	0,32	15,50	1300		
CP IV	33,27	1,70	0,32	15,50	1000		
CP V ARI	19,80	1,70	0,24	18,00	1300		

2.4.1.8 Modelo de LIU, YU e CHEN

Liu, Yu e Chen (2020) propuseram um modelo de previsão, descrito na Equação 11, desenvolvido com base em medições obtidas em experimentos de carbonatação acelerada conduzidos pelos próprios autores. Para tal, foram moldadas amostras cúbicas de concreto, submetidas inicialmente à cura em condições normais e, em seguida, expostas em uma estufa especialmente projetada para simular concentrações elevadas de dióxido de carbono (CO_2). Com base nos dados experimentais obtidos, foi estruturado um modelo que contempla os principais fatores que influenciam diretamente o processo de carbonatação em estruturas de concreto. Essa abordagem experimental permitiu ajustar os parâmetros da equação em condições controladas, o que favoreceu maior precisão das estimativas quando aplicadas a diferentes cenários de exposição.

$$d_c = K_x \cdot \left(\frac{W}{C} - 0.106 \right) \cdot (C_e^2 - 508.351 \cdot C_e - 1195.624) \cdot (F + 112.460) \cdot (T - 277.662) \cdot (C_d^{0.538}) \cdot (RH^2 - 125.410RH + 2351.806) \cdot \sqrt{t} \quad (11)$$

Onde:

d_c = profundidade de carbonatação (mm);

C_e = teor de cimento (kg/m^3);

F = teor de aditivo (kg/m^3);

T = temperatura de carbonatação (Kelvin);

C_d = concentração de CO_2 (%);

RH = umidade relativa (%).

2.4.1.9 Modelo de EKOLU

No estudo conduzido por Ekolu (2018), foi proposto um modelo, apresentado na Equação 12, fundamentado em funções matemáticas capazes de considerar simultaneamente a influência da composição do concreto e das condições ambientais no avanço da carbonatação natural. A formulação buscou integrar variáveis intrínsecas ao material, como a relação água-cimento e o tipo de aglomerante, com fatores externos de exposição, oferecendo uma abordagem mais completa para a previsão da durabilidade das estruturas.

$$d_{(f,t)} = e_h \cdot e_s \cdot e_{co} \cdot cem(F_{c(t)})^g \cdot \sqrt{t} \quad (12)$$

Onde:

$d_{(f,t)}$ = profundidade de carbonatação (mm);

e_h = coeficiente de umidade relativa (Equação 13);

e_s = coeficiente de condição de exposição a chuva (Equação 14);

e_{co} = coeficiente da concentração de CO_2 (Equação 15);

cem = fator escalar do cimento (Tabela 6);

g = fator de condutância do cimento (Tabela 6);

$F_{c(t)}$ = função de crescimento da resistência do concreto (Equação 16);

t = tempo (anos).

Com o objetivo de desenvolver e calibrar sua formulação, Ekolu (2018) utilizou dados de um estudo de carbonatação natural de 10 anos. Contudo, na construção da equação final, foram incorporados apenas os resultados obtidos em estruturas localizadas em ambientes externos, abrangendo tanto as protegidas quanto as expostas diretamente à ação da chuva. Nessa abordagem, o autor estabeleceu os coeficientes ambientais e_h , e_s e e_{co} , definidos conforme apresentado a seguir:

$$e_h = 16 \left(\frac{RH-35}{100} \right) \left(1 - \frac{RH}{100} \right)^{1.5} \text{ para } 50\% \leq RH \leq 80\% \quad (13)$$

Onde:

RH = umidade relativa (%).

$$e_s = \begin{cases} 1.0 & \text{para ambientes externos protegidos} \\ f_c^{-0.2} & \text{para ambientes externos desprotegidos} \end{cases} \quad (14)$$

Onde:

f_c = é a resistência a compressão em 28 dias do concreto.

$$e_{co} = \begin{cases} \alpha f_c^r & \text{para } 20 < f_c < 60 \text{ MPa} \\ 1.0 & \text{para } f_c \geq 60 \text{ MPa} \end{cases} \quad (15)$$

Onde:

α = fator de correção para carbonatação natural sob variadas concentrações de CO_2 ;

r = fator de correção para carbonatação natural sob variadas concentrações de CO_2 .

Tabela 5 - Fatores de correção da carbonatação natural.

Resistência aos 28 dias (MPa)	Fator de correção		Concentração de CO_2				
			200 ppm	300 ppm	500 ppm	1000 ppm	2000 ppm
$20 < f_c < 60$	$e_c = \alpha f_c^r$	α	1.4	1.0	2.5	4.5	14
		r	-1/4	0	-1/4	-2/5	-2/3
$f_c \geq 60$	$e_c = 1.0$						

Fonte: Eklou (2018).

A função $F_{c(t)}$, responsável por descrever a evolução da resistência à compressão do concreto ao longo do tempo, é apresentada na Equação 16. As constantes a e b , associadas a essa função, são definidas em conformidade com diferentes condições de análise:

- Pela Equação 17, para casos em que $t < 6$ anos, tomando como referência a resistência à compressão aos 28 dias;
- Pela Equação 18, para situações em que $t \geq 6$ anos, também considerando a resistência aos 28 dias;
- Pela Equação 19, quando $t < 15$ anos, tomando como base a resistência medida na data do ensaio; e
- Pela Equação 20, para $t \geq 15$ anos, considerando igualmente a resistência determinada no momento do ensaio.

$$F_{c(t)} = \frac{t}{a+bt} \cdot f_c, \text{ onde } f_c = f_{c28} \text{ ou } f_{cbn} \quad (16)$$

$$a = 0.35, \quad b = 0.6 - t^{0.5}/50 \quad (17)$$

$$a = 0.15t, \quad b = 0.5 - t^{0.5}/50 \quad (18)$$

$$a = 0.35, \quad b = 1.15 - t^{0.6}/50 \quad (19)$$

$$a = 0.15t, \quad b = 0.95 - t^{0.6}/50 \quad (20)$$

Tabela 6 - Fatores do cimento para condutância da carbonatação.

Materiais cimentícios suplementares	Tipos de cimento	cem	Fator de condutância, g
20% qualquer	CEM I, CEM II/A	1000	-1,5
30% cinza volante	CEM II/B, CEM IV/A	1000	-1,4
50% escória	CEM III/A	1000	-1,4

Fonte: (EKOLU, 2018).

2.4.2 MEF e MEC

Métodos numéricos constituem procedimentos matemáticos empregados na resolução de problemas cuja solução é obtida por meio de operações aritméticas sucessivas. O desenvolvimento e a ampla utilização dessas ferramentas estão diretamente relacionados ao avanço dos recursos computacionais, especialmente a partir da década de 1960, quando os computadores passaram a viabilizar o processamento eficiente de grandes volumes de cálculos. Entre as diversas aplicações dos métodos numéricos, destacam-se a resolução de equações diferenciais ordinárias e parciais, a solução de sistemas de equações lineares por meio de técnicas matriciais, a integração numérica baseada em métodos de aproximação ou em procedimentos estatísticos, bem como a determinação de autovalores e autovetores.

Sua aplicação torna-se especialmente relevante no tratamento de problemas caracterizados por geometrias complexas e condições de contorno de difícil resolução analítica, contexto no qual a obtenção de soluções exatas por vias convencionais é, em geral, inviável. No âmbito da Engenharia de Estruturas, métodos como o Método dos Elementos de Contorno (MEC) e o Método dos Elementos Finitos (MEF) consolidaram-se como as principais abordagens para essa classe de problemas, sendo o MEF amplamente difundido em razão de sua eficiência computacional e da facilidade de aplicação em problemas de domínio (SILVA, 2020). De caráter generalista, essas técnicas demonstram versatilidade e capacidade de fornecer soluções aproximadas com elevado grau de precisão, o que justifica sua ampla utilização em diferentes áreas da engenharia e da pesquisa científica, mesmo que não resultem em respostas matematicamente exatas.

Dentre os métodos numéricos aplicados à Engenharia de Estruturas, o Método dos Elementos Finitos (MEF) destaca-se como uma das ferramentas mais

robustas e consolidadas para a análise estrutural. Seu princípio fundamental baseia-se na discretização do meio contínuo, denominado domínio, em um conjunto finito de subdomínios denominados elementos, cada um definido por pontos discretos chamados nós. A esses nós são associados parâmetros denominados graus de liberdade, que descrevem as grandezas de interesse no problema analisado, tais como deslocamentos, forças, velocidades e acelerações, e são caracterizados por suas coordenadas no espaço. Essa decomposição estruturada do domínio permite formular um sistema de equações algébricas que aproxima o comportamento do problema contínuo original, conferindo ao método generalidade e precisão compatíveis com as exigências da análise estrutural (FELIX, 2018).

Em contraposição ao MEF, o Método dos Elementos de Contorno (MEC) fundamenta-se em uma formulação baseada exclusivamente no contorno do domínio, o que confere ao método características distintivas de relevância prática (PELLIZZER, 2019). A principal vantagem dessa abordagem reside na redução da dimensionalidade do problema, uma vez que a discretização é realizada apenas nas fronteiras do domínio, eliminando a necessidade de subdivisão volumétrica ou superficial do interior. Essa característica, aliada à adequação natural à geometria do contorno e à capacidade de tratar singularidades sem recorrer à aproximação direta das equações governantes, confere ao MEC um perfil de destaque em relação a outros métodos numéricos. Em problemas de difusão, especificamente, o método demonstra redução do tempo de processamento, pois a solução é obtida a partir de variáveis definidas no contorno, o que possibilita a determinação das grandezas internas ao domínio em etapa subsequente, a partir dessas informações de contorno.

2.4.3 Aprendizado de máquina

A produção científica voltada à previsão da carbonatação do concreto tem evidenciado uma transição progressiva das formulações analíticas tradicionais para abordagens numéricas de maior sofisticação computacional. Os modelos desenvolvidos nesse contexto organizam-se, de modo geral, em duas categorias: modelos baseados na simulação do fluxo gasoso, empregando técnicas como o MEF e o MEC, e modelos fundamentados em algoritmos de aprendizado de máquina, tais como redes neurais artificiais, árvores de decisão e máquinas de vetores de suporte,

voltados ao mapeamento da profundidade de carbonatação ou da velocidade de difusão do dióxido de carbono.

Isgor e Razaqpur (2004) desenvolveram uma abordagem não linear por elementos finitos para rastrear o avanço espacial e temporal da frente de carbonatação em estruturas de concreto, com e sem fissuras, resultando no software tridimensional CONDUR, cujos resultados foram validados em relação a dados experimentais. Al-Ameeri et al. (2021), por sua vez, propuseram um modelo numérico voltado à avaliação do impacto das mudanças climáticas sobre as velocidades de carbonatação, incorporando a variação temporal da concentração de CO_2 , da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar, em resposta às limitações dos modelos analíticos existentes para contemplar esses fatores. A modelagem da frente de carbonatação foi realizada por simulação de elementos finitos com abordagem física não linear, possibilitando o mapeamento das reações entre CO_2 e $\text{Ca}(\text{OH})_2$, com validação por ensaios de carbonatação acelerada.

As previsões foram realizadas para cenários definidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014), com base nos Caminhos de Concentração Representativos (RCPs) 6.0 e 8.5, sendo este último o mais severo, com projeções de concentração de CO_2 superiores a 1000 ppm e acréscimo de temperatura de até 5,75 °C em 2100, considerando estruturas localizadas em Londres com relações água-cimento de 0,4, 0,5 e 0,6 em uma prospecção de 100 anos. Os resultados indicam que as mudanças climáticas terão impactos expressivos sobre a durabilidade e a vida útil das estruturas de concreto armado, evidenciando a necessidade de incorporá-los no projeto de novas estruturas.

O uso de técnicas de aprendizado de máquina para a modelagem da carbonatação do concreto corresponde a aproximadamente 27% dos 492 artigos dedicados ao tema, publicados na última década e indexados na base de dados ScienceDirect. Lu e Liu (2009) propuseram modelos de redes neurais artificiais para previsão da profundidade de carbonatação em concretos protendidos, um de retropropagação e outro de função de base radial, treinados com dados de carbonatação acelerada, obtendo erros percentuais absolutos máximos de 10,88% e 8,46%, respectivamente. Taffese, Sistonen e Puttonen (2015) desenvolveram modelos de previsão integrando redes neurais artificiais, árvores de decisão e modelos ensemble, com base em dados do projeto Finnish DuraInt, e as redes neurais

apresentaram desempenho superior, com MSE de 0,2417, RMSE de 0,4916 e MAE de 0,2860.

Felix e Possan (2018) aplicaram redes neurais artificiais do tipo Perceptron de múltiplas camadas, totalizando 91 arquiteturas avaliadas, para previsão da profundidade de carbonatação em ambiente marítimo, utilizando dados coletados por Meira, Padaratz e Borba Junior (2006) em estruturas localizadas em João Pessoa, PB. O melhor modelo obteve RMSE de 0,130, R^2 de 0,973 e erro médio de 0,54 mm na previsão da profundidade de carbonatação. Liu et al. (2021) desenvolveram modelos híbridos de redes neurais para a previsão da carbonatação em concretos com agregados reciclados, com base em 593 dados de carbonatação acelerada. O modelo WOANN, com pesos sinápticos e bias otimizados pelo algoritmo Whale Optimization, foi o de melhor desempenho, atingindo R^2 de 0,947 e RMSE de 2,012. Huo, Wang e Huang (2023) propuseram modelos ensemble híbridos de aprendizado de máquina, integrando múltiplos algoritmos de variância inversa e de redes neurais artificiais, com base em 532 dados de carbonatação acelerada, sendo que o modelo de variância inversa apresentou melhor desempenho, com R de 0,975 e RMSE de 2,978 mm. Os trabalhos revisados indicam que as técnicas de aprendizado de máquina apresentam capacidade preditiva compatível com as exigências da modelagem da carbonatação, consolidando-se como alternativas complementares às abordagens analíticas e numéricas tradicionais.

2.5 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

A revisão dos modelos analíticos de predição da profundidade de carbonatação evidencia uma evolução progressiva na incorporação de parâmetros físicos, químicos e ambientais ao longo das últimas décadas. O modelo de Tuutti (1982), ponto de partida dessa trajetória, descreve o fenômeno por meio de uma única variável, o coeficiente de carbonatação k , cuja determinação experimental é, por si só, uma limitação prática relevante. As formulações subsequentes buscaram, de formas distintas, superar essa restrição, seja correlacionando k com a resistência à compressão do concreto (Smolczyk, 1976; Bob e Affana, 1993), seja com a relação água-cimento (Vesikari, 1988), seja fundamentando seu cálculo na microestrutura da pasta de cimento hidratada (Papadakis, Vayenas e Fardis, 1991).

A incorporação de variáveis ambientais marcou um segundo estágio nessa evolução. Bob e Affana (1993) introduziram coeficientes discretizados para a umidade relativa e a concentração de CO_2 , enquanto a norma EHE (2008) passou a contemplar a presença de ar incorporado e o efeito da exposição à chuva como fatores redutores da taxa de carbonatação. O modelo de Possan (2010) representa, entre os analíticos revisados, o de maior abrangência paramétrica, ao reunir simultaneamente o tipo de cimento, a resistência à compressão, o teor de adições pozolânicas, a umidade relativa, a concentração de CO_2 e o fator de condição de exposição k_{ce} , que distingue três cenários: ambiente interno ($k_{ce} = 1,30$), externo protegido da chuva ($k_{ce} = 1,00$) e externo desprotegido da chuva ($k_{ce} = 0,65$). Essa diferenciação aproxima o modelo das condições reais de serviço, reconhecendo que a precipitação desempenha papel relevante no controle da difusão do CO_2 . O modelo de Ekolu (2018) incorpora essa mesma distinção por meio do coeficiente e_s e considera a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo, o que confere maior precisão às estimativas em análises de longo prazo.

Um aspecto de particular relevância, ao confrontar os modelos com os resultados experimentais da presente pesquisa, diz respeito à temperatura. Entre todos os modelos analíticos revisados, apenas Liu, Yu e Chen (2020) incorporam explicitamente a temperatura como variável independente na estimativa da profundidade de carbonatação. Esse fato assume importância diante dos resultados obtidos, que indicaram correlação positiva moderada entre temperatura e profundidade carbonatada nos elementos sem proteção e com tinta PVA, o que pode significar que, ao desconsiderar esse parâmetro, os demais modelos analíticos introduzem uma fonte adicional de imprecisão, especialmente em regiões com amplitude térmica relevante ou em avaliações de longo prazo.

Não obstante os avanços observados, nenhum dos modelos analíticos revisados incorpora o efeito dos sistemas de proteção superficial sobre a taxa de difusão do CO_2 . Essa omissão decorre de uma premissa estrutural comum a todas as formulações: o modelo de Tuutti (1982), referência central da área, trata a difusão do CO_2 como um processo sem a interposição de barreiras físicas externas, premissa herdada por todos os modelos dele derivados, independentemente do grau de sofisticação paramétrica incorporado. Essa limitação compromete a representatividade dessas formulações para a grande maioria das edificações correntes, nas quais sistemas multicamada de revestimento impõem resistência

adicional ao transporte difusivo do CO_2 , que nenhuma das formulações existentes é capaz de capturar, conforme evidenciado quantitativamente pelos resultados experimentais da presente pesquisa.

No âmbito dos métodos numéricos, os modelos baseados no MEF e no MEC têm demonstrado capacidade de representar com precisão satisfatória o avanço da frente de carbonatação, inclusive em geometrias complexas e sob diferentes condições de contorno. No entanto, a incorporação do efeito de sistemas de revestimento multicamada nessas formulações ainda carece de investigação, uma vez que as interfaces entre camadas com propriedades difusivas distintas introduzem descontinuidades que representam um desafio adicional à modelagem. De modo análogo, os modelos baseados em aprendizado de máquina, embora apresentem desempenho preditivo compatível com as exigências da modelagem da carbonatação, foram desenvolvidos predominantemente a partir de dados obtidos em concreto sem revestimento, o que limita sua aplicabilidade a estruturas protegidas por sistemas de acabamento superficial.

No contexto das normas brasileiras, a durabilidade das estruturas de concreto é abordada de forma abrangente, mas não contempla especificamente os efeitos dos sistemas de acabamento superficial sobre os mecanismos de transporte de agentes agressivos, como o dióxido de carbono. Sob a ótica técnica e regulatória, esses revestimentos são tradicionalmente compreendidos como recursos de caráter estético ou arquitetônico, podendo também ser reconhecidos como barreiras físicas à carbonatação.

Considerando esse cenário, evidencia-se a necessidade de produzir trabalhos experimentais, sobretudo em elementos de concreto sob condições naturais de degradação e protegidos por diferentes sistemas de revestimento em múltiplas camadas. Além disso, a revisão dos modelos existentes indica que a maioria deles não contempla todas as variáveis relacionadas às condições de exposição ambiental, como a incidência de chuva e a temperatura. Sendo assim, campanhas experimentais precisam ser conduzidas a fim de evidenciar o efeito desses parâmetros, para, então, propor modelos mais representativos da realidade ou calibrar os existentes, sejam eles baseados em formulações numéricas ou em técnicas de aprendizado de máquina.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 9 apresenta, por meio de um fluxograma dividido em quatro etapas, os principais processos metodológicos adotados neste estudo, cujo objetivo é avaliar o efeito do uso de sistemas de proteção sobre a durabilidade de elementos de concreto expostos à carbonatação em ambiente natural de degradação.

Figura 9 - Fluxo de processos da metodologia empregada no presente estudo.



Fonte: Própria autoria.

Considerando a incipiência de resultados na literatura que ofereçam dados para o mapeamento da durabilidade de estruturas de concreto com proteção superficial diante da ação do CO_2 , foi conduzida uma campanha experimental na qual elementos com diferentes sistemas de proteção foram expostos ao CO_2 e avaliados quanto às propriedades físico-mecânicas e à facilidade de difusão do agente agressivo no concreto (etapas 1, 2 e 3). Para reduzir o desperdício de material, decidiu-se por seguir com dois cenários base: (i) elementos de concreto com aplicação de uma camada de proteção de argamassa com 20 mm de espessura; e (ii) elementos de argamassa com proteções de massa corrida, selador e duas camadas de tinta (acrílica acetinada, acrílica fosca, acrílico semibrilho ou PVA standard). Com estas composições, verifica-se o efeito da proteção da argamassa no concreto, e da massa corrida, selador e tinta na argamassa, sendo possível estender os resultados para o

caso em que o concreto apresenta a proteção completa (argamassa + massa corrida + selador + tinta).

Além da variação dos sistemas de proteção superficial, foram considerados diferentes ambientes de exposição, todos localizados na área da Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá (UNESP/FEG). Os cenários analisados incluíram elementos expostos diretamente à ação do sol e da chuva (ambiente externo desprotegido), elementos em ambiente externo protegidos da incidência direta do sol e da chuva (ambiente externo protegido) e elementos mantidos em condições internas, protegidos da ação direta do sol e da chuva (ambiente interno), conforme ilustrado na Figura 10.

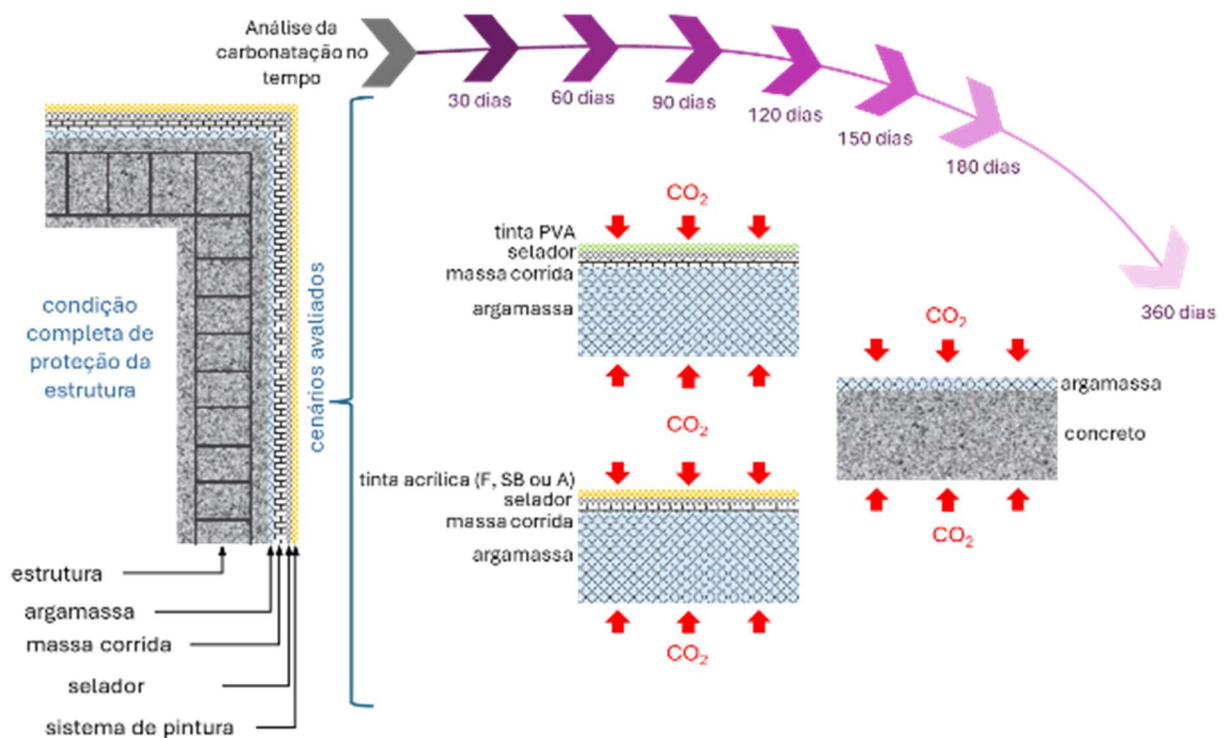
Figura 10 - (a) ambiente externo desprotegido, (b) ambiente externo protegido e (c) ambiente interno



Fonte: Própria autoria.

Os cenários investigados na campanha experimental estão ilustrados na Figura 11, enquanto a Figura 12 apresenta os processos de produção e de avaliação da carbonatação dos elementos de concreto e de argamassa. A Figura 13, por sua vez, apresenta a linha do tempo de todos os procedimentos experimentais adotados.

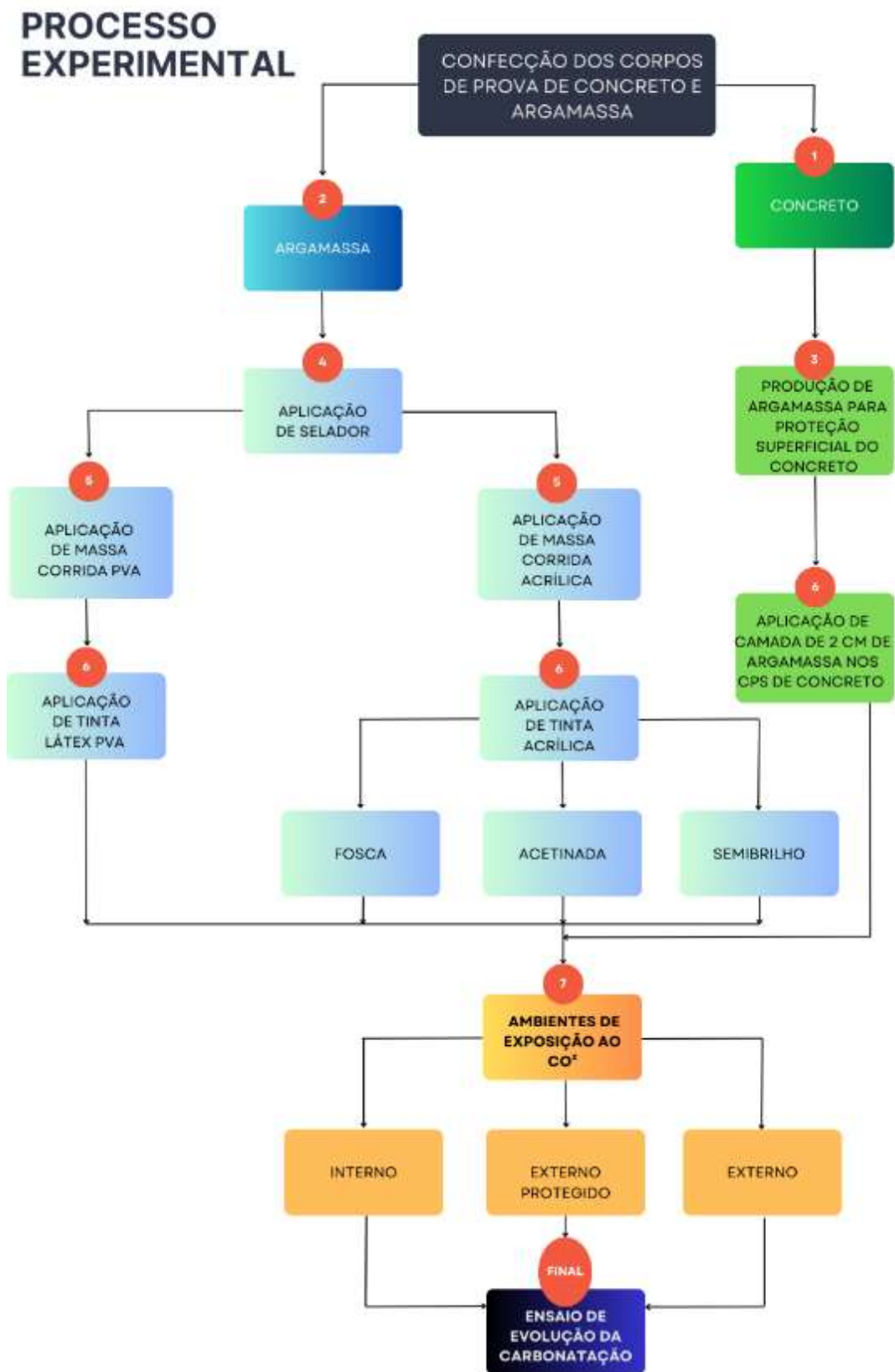
Figura 11 - Cenários de investigação da campanha experimental.



Fonte: Própria autoria.

Concomitantemente ao desenvolvimento da campanha experimental, foi realizada a análise exploratória dos resultados e da explicabilidade do efeito da proteção na vida útil de componentes estruturais do ambiente construído, além do efeito das condições de corte no ambiente de exposição avaliadas no estudo. Na sequência, apresentam-se os materiais e métodos utilizados na pesquisa, conforme as etapas indicadas na Figura 9.

Figura 12 - Fluxo de processos de produção e de avaliação dos elementos expostos ao CO₂.



Fonte: Própria autoria.

Figura 13 - Linha do tempo da campanha experimental.



Fonte: Própria autoria.

3.1 CAMPANHA EXPERIMENTAL

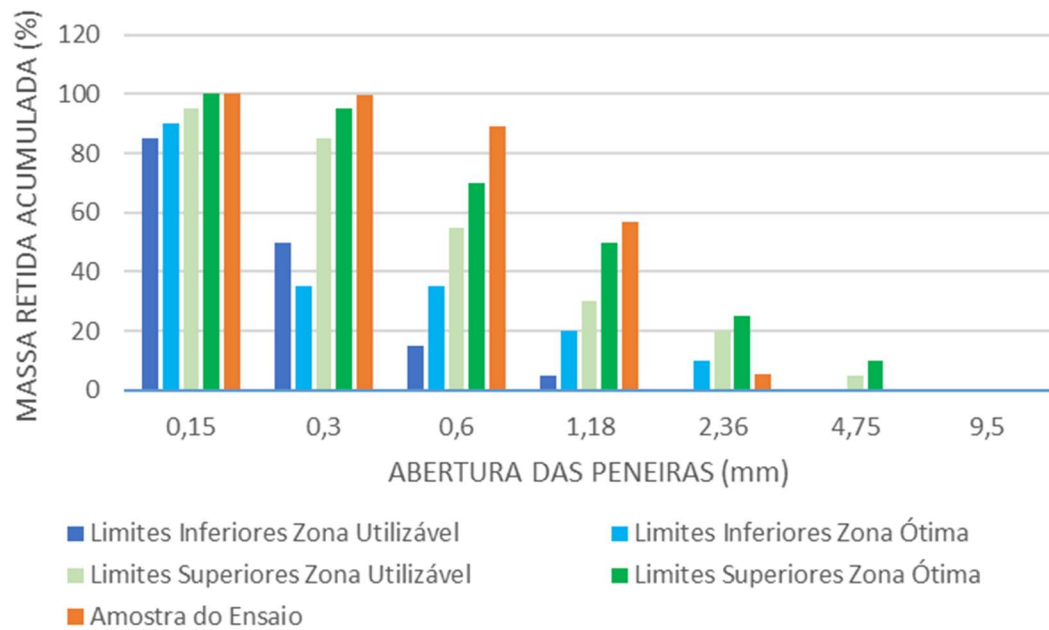
Este capítulo descreve os procedimentos experimentais adotados na pesquisa, abrangendo desde a caracterização dos materiais empregados na produção dos elementos de concreto e argamassa até os ensaios realizados para a avaliação de suas propriedades físico-mecânicas e do avanço da carbonatação. Inicialmente, são apresentados os materiais utilizados e os respectivos processos de produção e caracterização, incluindo a descrição dos sistemas de proteção superficial aplicados aos corpos de prova. Na sequência, são detalhados os ensaios de índice de vazios e absorção de água, de resistência à compressão e, por fim, os procedimentos adotados para a determinação da profundidade e da taxa de carbonatação, parâmetros fundamentais para a análise da durabilidade dos sistemas investigados.

3.1.1 Materiais – produção e caracterização

Para o desenvolvimento dos concretos e das argamassas de revestimento, utilizou-se cimento Portland CP V ARI, conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018), com resistência à compressão de 32 MPa. De acordo com as normas NBR 16605 (ABNT, 2017) e NBR 16372 (ABNT, 2015), foram determinadas a massa específica ($3,15 \text{ g/cm}^3$) e a área superficial específica do cimento ($1,7 \text{ m}^2/\text{g}$).

Na produção do concreto, empregou-se brita 1 de gnaiss como agregado graúdo e areia quartzosa média como agregado miúdo, sendo esta última também utilizada nas argamassas. Ambos os agregados foram caracterizados por meio de ensaios de composição granulométrica (Figuras 14 e 15), de módulo de finura, de massa unitária, de massa específica e de absorção de água, conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022). Três amostras de cada material foram analisadas, e os resultados médios foram considerados. As amostras foram secas em estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ por 24 horas.

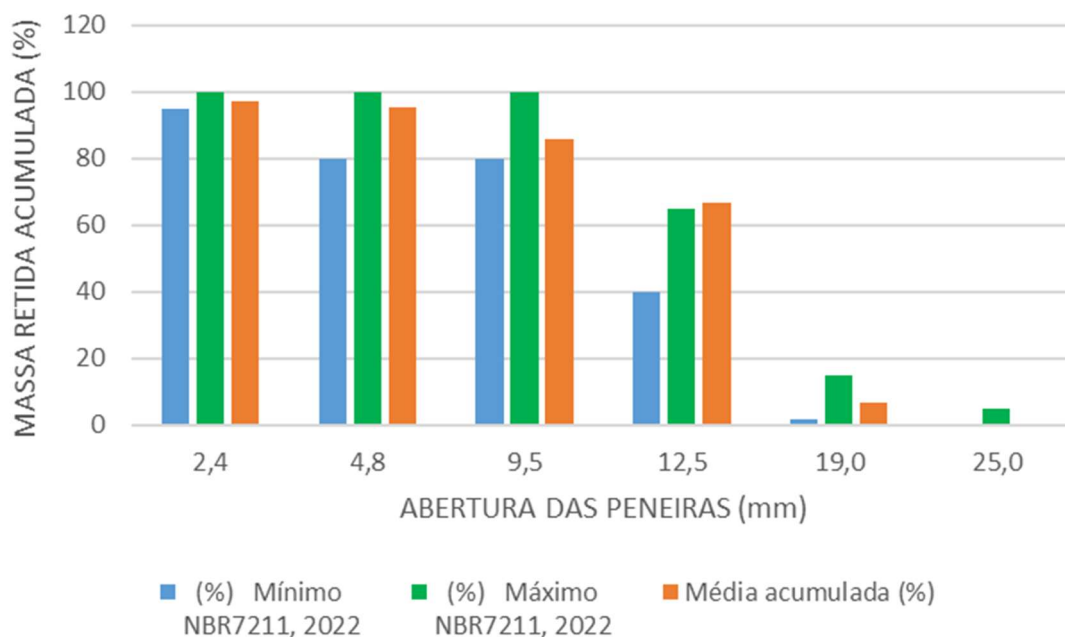
Figura 14 - Granulometria do agregado miúdo.



Fonte: Própria autoria.

A areia foi classificada como média, com partículas entre 0,42 mm e 1,20 mm, de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022). O agregado graúdo foi confirmado como brita 1, com granulação entre 9,5 mm e 19,0 mm, conforme a mesma norma. A Tabela 7 apresenta um resumo dos resultados obtidos na caracterização dos agregados.

Figura 15 - Curva granulométrica do agregado graúdo.



Fonte: Própria autoria.

Tabela 7 - Propriedades dos agregados.

Propriedades	Agregado miúdo	Agregado graúdo	Normas usadas
Massa unitária (kg/m³)	1515,10	1530,26	(NBR 16972;2021)
Massa específica (kg/m³)	2332,52	2857,14	(NBR 16917, 2021)
Absorção (%)	0,31	2,86	(NBR 16917, 2021)
Módulo de finura	2,65	4,52	(NBR 17054, 2022)

Fonte: Própria autoria.

De acordo com a NBR 7175 (ABNT, 2003), a cal hidratada é um pó obtido pela hidratação da cal virgem, composto principalmente por hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio, podendo também conter óxido de magnésio. Ela é classificada nas categorias CH-I, CH-II e CH-III, de acordo com suas propriedades químicas e físicas.

Nos corpos de prova de argamassa, utilizou-se a cal hidratada CH-III. Quimicamente, essa cal apresenta teor de anidrido carbônico (CO₂) de, no máximo, 13% na fábrica e 15% no depósito; teor de óxidos não hidratados de cálcio e magnésio (CaO + MgO) de até 15%; e teor de óxidos totais não voláteis (CaOt + MgOt) igual ou superior a 88%.

Fisicamente, a CH-III deve atender a critérios como granulometria controlada (com até 0,5% retido na peneira de 0,6 mm e 15% na de 0,075 mm), retenção de água mínima de 70%, incorporação de areia igual ou superior a 2,2 e plasticidade mínima de 110. Além disso, deve estar isenta de cavidades ou protuberâncias, o que assegura melhor desempenho em argamassas.

Segundo a fabricante Votorantim, a cal hidratada CH-III é recomendada para diversos tipos de argamassa, atuando como aglomerante e plastificante. Proporciona maior plasticidade, aderência, resistência, elasticidade e rendimento. Diferentemente da cal virgem, não exige tempo de hidratação nem de repouso, podendo ser utilizada imediatamente, sem riscos na aplicação.

Tanto para produção do concreto quanto da argamassa foi utilizada água proveniente da rede pública de abastecimento do município de Guaratinguetá (SP), cujo responsável pelo tratamento e distribuição é a Companhia de Serviço de Água, Esgoto e Resíduos de Guaratinguetá (SAEG).

A composição química do cimento CP V foi analisada no Laboratório de Caracterização Química da Escola de Engenharia de Lorena (EEL-USP), por meio de

fluorescência de raios X e de análise semiquantitativa sem padrões, abrangendo elementos do flúor ao urânio. Os resultados estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição química do cimento.

Componente	Proporção (%)
CaO	58,85
SiO ₂	21,74
SO ₃	5,95
Al ₂ O ₃	5,27
Fe ₂ O ₃	4,20
MgO	1,54
Na ₂ O	0,79
K ₂ O	0,59
SrO	0,40
P ₂ O ₅	0,29
TiO ₂	0,23
MnO	0,08
Br	0,08

Fonte: Própria autoria.

Considerando todos os cenários e diferentes proteções, foram necessárias quatro concretagens, com intervalo de 24 horas, devido à limitação de formas. Ao todo, foram produzidos 120 elementos prismáticos de 8x10x20 cm. A cada dia de concretagem, foram produzidos 30 elementos prismáticos e 12 cilíndricos para o controle tecnológico (resistência à compressão, massa unitária, absorção de água e índice de vazios). Para todas as concretagens, utilizou-se um traço padrão com resistência à compressão de 30 MPa, conforme apresentado na Tabela 9. A definição do traço baseou-se em um estudo prévio conduzido por Félix (2022).

Tabela 9 - Traço de concreto em massa para 1 m³ de material.

CLASSE	Cimento CP-V (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/m ³)	Agregado grauído (kg/m ³)	Água (kg/m ³)	Aditivo (kg/m ³)	Relação a/c
C30	353,96	800,44	1023,68	246,69	0	0,52

Fonte: Félix (2022).

Em cada concretagem, o concreto produzido foi despejado nas formas prismáticas e cilíndricas, devidamente vibrado com equipamento próprio, e permaneceu em local apropriado no Laboratório de Materiais e Estruturas da UNESP/FEG. Em atendimento à NBR 5738 (ABNT, 2016), todos os elementos de concreto foram armazenados por 24 horas em local protegido de intempéries, sobre uma superfície horizontal rígida, livre de vibrações e de qualquer outra ação que possa

perturbar o concreto, para, depois, passarem ao processo de cura por imersão em água potável por 27 dias.

Passado o período de moldagem e cura (28 dias), os corpos de prova foram retirados do tanque, para condução dos ensaios de caracterização físico-mecânica (elementos cilíndricos) e aplicação de proteção superficial nos elementos prismáticos. Nos concretos, a proteção se deu pela aplicação da argamassa de revestimento em elementos prismáticos (com 20 mm), conforme indicado na Figura 16. Para tal produção, considerou-se um traço dosado e testado por Pedry (2020), com proporções em massa apresentadas na Tabela 10. É importante destacar que, nesses corpos de prova (de concreto), não foram aplicadas proteções superficiais adicionais, como tinta, selador ou massa corrida. O objetivo foi avaliar a possível existência de um atraso (delay) entre a carbonatação na argamassa e no concreto, e, em seguida, estender os resultados para os casos com proteção completa.

Tabela 10 - Traço da argamassa de revestimento.

Cimento CP-V (kg/m ³)	Agregado miúdo (kg/cm ³)	Cal CH-III (kg/cm ³)	Água (kg/cm ³)	Aditivo (kg/cm ³)	Relação a/c
140,92	1477,30	93,30	349,60	0	2,48

Fonte: Pedry (2020).

Figura 16 - Processos adotados para a proteção com argamassa.



Fonte: Cornélio (2025).

Quanto à produção dos elementos de argamassa, o mesmo traço indicado na Tabela 10 foi utilizado para produzir elementos prismáticos com dimensões de 8x10x20 cm, a fim de garantir que as análises nas faces com tinta pudessem ser estendidas ao concreto com proteção completa. Para atender a todos os cenários, considerando os ambientes de exposição, os sistemas de proteção e as idades de mensuração da carbonatação, foram produzidos 150 elementos de argamassa.

Quatro tipos de proteção aplicados nos corpos de prova de argamassa: acrílica fosca, acetinada, semibrilho e látex PVA. Nas faces dos elementos protegidos com tinta acrílica, o sistema de pintura seguiu as seguintes etapas, cujos materiais e respectivas especificações são indicados na Figura 17.

- I. Aplicação de uma demão de massa corrida acrílica, composta por resina à base de dispersão aquosa de copolímero estireno-acrílico e vinílicos modificados, pigmentos livres de metais pesados, cargas minerais inertes, além de aditivos fungicidas, bactericidas, glicóis e tensoativos. Essa camada teve como objetivo nivelar a superfície e corrigir pequenas imperfeições;
- II. Aplicação de uma demão de selador acrílico, formulado com resina estireno-acrílica em base aquosa, que atua na redução da absorção da tinta e melhora a aderência das camadas subsequentes;
- III. Aplicação de duas demãos de tinta acrílica de alta performance, indicada para ambientes internos e externos, com excelente cobertura, durabilidade, fácil limpeza e fórmula sem cheiro. Sua composição inclui resina estireno-acrílica, pigmentos atóxicos, cargas minerais, glicóis, tensoativos e aditivos microbicidas.

Já nas faces protegidas com tinta látex PVA, o processo envolveu:

- I. Uma demão de massa corrida PVA, com formulação similar à acrílica, contendo copolímeros estireno-acrílicos, pigmentos livres de metais pesados, cargas minerais, fungicidas, bactericidas, glicóis e tensoativos;
- II. Aplicação de uma demão de selador acrílico, formulado com resina estireno-acrílica em base aquosa, que atua na redução da absorção da tinta e melhora a aderência das camadas subsequentes;

- III. Duas demãos de tinta látex PVA, com tecnologia de alto rendimento e diluição em até 80% de água, proporcionando excelente cobertura, durabilidade e acabamento uniforme. A fórmula é composta por dispersão aquosa de copolímero estireno-acrílico, pigmentos atóxicos, cargas minerais inertes, glicóis e tensoativos.

Figura 17 - Características e propriedades dos materiais de proteção.

MATERIAL DE PROTEÇÃO	ACABAMENTO	MARCA	COMPOSIÇÃO	RENDIMENTO (POR DEMÃO)	DILUIÇÃO (ÁGUA)	APLICAÇÃO (DEMÃOS)	SECAGEM (HORAS)
SELADOR	Acrílico	Eucatex	Resina a base de dispersão aquosa de polímero estireno acrílico, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais inertes, glicóis e tensoativo.	Balde 3,6L: Até 20m ²	15%	1 a 2	6
MASSA CORRIDA	Acrílica	Eucatex	Resina à base de dispersão aquosa de copolímero estireno acrílico e vinílicos modificados, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais inertes, fungicidas e bactericidas, glicóis e tensoativo.	Galão 900ml: 1,45 kg - Até 3,5m ² por demão	Pronto para uso	2 a 3	4
	PVA	Eucatex	Resina à base de dispersão aquosa de copolímero estireno acrílico e vinílicos modificados, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais inertes, fungicidas e bactericidas, glicóis e tensoativo.	Galão 900ml: 1,45 kg - Até 3,5m ² por demão	Pronto para uso	2 a 3	4
TINTA	Acrílica Acetinada	Eucatex	Resina à base de dispersão aquosa de copolímero estireno acrílico, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais inertes, glicóis e tensoativo, aditivos microbicidas.	Galão 3,6L: Até 22m ²	25% de água na primeira demão e 15% nas demais.	2 a 3	12
	Acrílica Fosca	Eucatex	Resina à base de dispersão aquosa de copolímero estireno acrílico, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais inertes, glicóis e tensoativo, aditivos microbicidas.	Galão 3,6L: Até 28 m ²	20%	2 a 3	12
	Acrílica semibrilho	Eucatex	Resina à base de dispersão aquosa de copolímero estireno acrílico, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais inertes, glicóis e tensoativo, aditivos microbicidas.	Galão 3,6L: Até 22m ²	25% de água na primeira demão e 15% nas demais.	2 a 3	12
	PVA	Eucatex	Resina à base de dispersão aquosa de copolímero, estireno acrílico, pigmentos isentos de metais pesados, cargas minerais inertes, glicóis e tensoativo.	Galão 3,6L: Até 34m ²	50 a 80%	2 a 3	12

Fonte: Própria autoria.

3.1.2 Ensaio de índice de vazios e absorção de água

Para o desenvolvimento dos concretos e argamassas de revestimento, utilizou-se cimento Portland CP V ARI, conforme a NBR 16697 (ABNT, 2018), com resistência à compressão de 32 MPa. De acordo com as normas NBR 16605 (ABNT, 2017) e NBR 16372 (ABNT, 2015), foram determinadas a massa específica (3,15 g/cm³) e a área superficial específica do cimento (1,7 m²/g).

A NBR 9778 (ABNT, 2005) define o índice de vazios como a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra, e estabelece as diretrizes para a determinação deste parâmetro. Segundo a norma, os passos para execução do ensaio são:

- I. Coloca-se a amostra em estufa por 72 horas, a uma temperatura de (105±5) °C. Registra-se então, a massa da amostra (M_s);
- II. A amostra é imersa em água, a uma temperatura de (23±2) °C, e deve permanecer assim por 72 horas;
- III. Posteriormente à saturação, a amostra deve ser colocada em um recipiente cheio de água e levada à ebulição progressivamente, iniciando-se após 15 minutos e antes de 30 minutos. Esse processo precisa se manter por 5 horas, com volume constante de água. A água precisa esfriar naturalmente até a temperatura de (23±2) °C. É determinada então, a massa hidrostática (M_i);
- IV. Retira-se a amostra da água e deve-se enxugá-la com pano úmido. A massa saturada (M_{sat}) é determinada e registrada. O índice de vazios é calculado, em porcentagem, pela Equação (21).

$$IV = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} 100 \quad (21)$$

Seguindo as instruções da NBR 9778 (ABNT, 2005) foi realizada a coleta dos dados em quatro amostras, considerando a definição de cada um dos parâmetros da Equação 13, conforme a Figura 18.

Figura 18 - Ensaio para determinação do índice de vazios.

(a) Determinação da m_{sat} .



(b) m_i .



(c) Modelo de pesagem.



Fonte: Própria autoria.

3.1.3 Ensaio de resistência à compressão

A NBR 5739 (ABNT, 2018) estabelece os procedimentos para a determinação da resistência à compressão do concreto. Os ensaios devem ser realizados em corpos de prova cilíndricos com altura equivalente ao dobro do diâmetro, neste trabalho, foram utilizados corpos de prova com altura de 20 cm e diâmetro de 10 cm. Após a moldagem e adensamento, os corpos de prova foram mantidos por 24 horas em ambiente protegido da luz solar direta, de respingos de água, vibrações e contatos indesejados.

Decorridos 28 dias de cura, as bases dos corpos de prova devem ser preparadas de modo a assegurar a planicidade e a perpendicularidade em relação ao eixo longitudinal. Neste estudo, optou-se pelo uso de discos de Neoprene, considerando a indisponibilidade de equipamento para retificação das superfícies no laboratório.

O carregamento foi aplicado de forma contínua e sem choques, à taxa de 0,5 MPa/s, até a ruptura do corpo de prova. A resistência à compressão foi calculada com base na Equação (22), expressa em N/m², a partir da força de ruptura P (em N) e da área da seção transversal A (em m²).

$$f_c = \frac{P}{A} \quad (22)$$

Os ensaios de resistência à compressão foram conduzidos no laboratório de Estruturas e Materiais de Construção Civil do Centro Universitário Salesiano de Lorena, utilizando uma máquina de ensaios Kratos, modelo EC, de acionamento servohidráulico, automatizado por meio de software, com capacidade de carga de 1000 kN (Figura 19).

Figura 19 - (a) Máquina utilizada nos ensaios e (b) corpo de prova após ruptura por compressão.



Fonte: Falcão e Santos (2024).

3.1.4 Profundidade de carbonatação e taxa de carbonatação (Y_{carb} e K_{carb})

Diversos métodos podem ser utilizados para determinar a profundidade e o grau de carbonatação em materiais cimentícios. Segundo Despotou et al. (2016), destacam-se entre eles: difração de raios X, métodos termogravimétricos e gravimétricos, espectroscopia no infravermelho com transformada de Fourier (FTIR), titulação química e o uso de indicadores químicos de pH.

Neste estudo, optou-se pela utilização de indicadores químicos de pH, principalmente por sua simplicidade de aplicação, baixo custo e boa precisão dos resultados, assim como nos trabalhos anteriormente desenvolvidos pelo grupo de pesquisa “CO₂ Construction” (PEDRY, 2020; BARBOSA, 2021). Esses indicadores são substâncias que apresentam mudança de cor conforme o pH do meio em que são aplicados (Figura 20). O indicador adotado foi a fenolftaleína, amplamente utilizada

para mensurar a profundidade da frente de carbonatação em argamassas e em concretos. Conforme Chinchón-Payá, Andrade e Chinchón (2016), sua aplicação consiste na pulverização da solução sobre a superfície recém-fraturada do material, permitindo a visualização da zona carbonatada pela ausência de coloração.

Figura 20 - Coloração do indicador fenolftaleína em função do pH.



Fonte: Própria autoria.

Os ensaios foram realizados conforme o cronograma apresentado na Figura 21. Para cada etapa, foram testados dois corpos de prova em cada cenário de exposição: ambiente externo desprotegido da chuva, ambiente externo protegido da chuva, ambiente interno e condição de proteção.

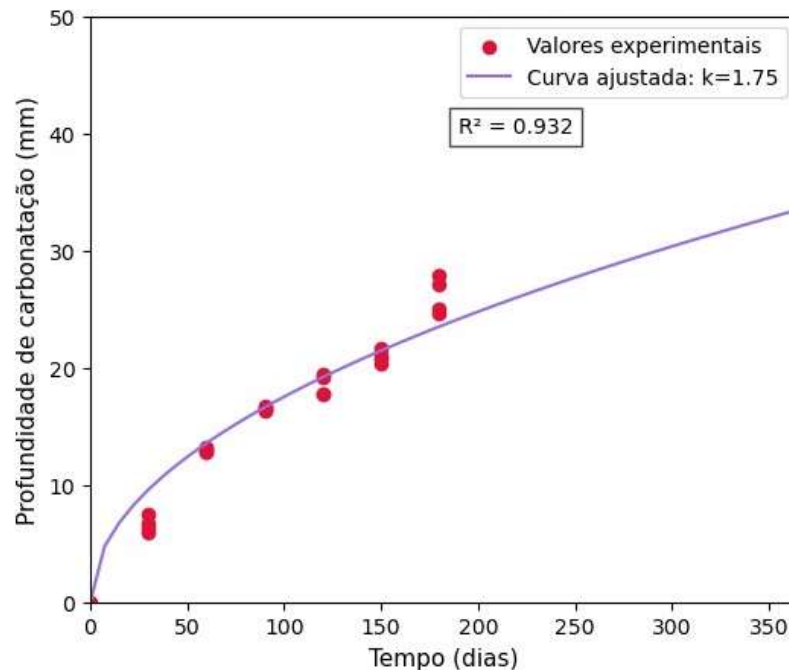
Figura 21 - Cronograma dos ensaios de mensuração da profundidade de carbonatação.

CORPOS DE PROVA	PREPARO	CONCRETAGEM	DESFORMA	CRONOGRAMA ENSAIO DE CARBONATAÇÃO (SEM E COM PROTEÇÃO)							
				30 DIAS sem proteção	Aplicação da proteção superficial	30 DIAS com proteção	60 DIAS com proteção	90 DIAS com proteção	120 DIAS com proteção	150 DIAS com proteção	365 DIAS com proteção
Argamassa Externo	08/fev	09/fev	15/fev	16/03/2024	16/03/2024	15/04/2024	15/05/2024	14/06/2024	15/07/2024	13/08/2024	-
Argamassa Externo Protegido	15/fev	16/fev	19/fev	20/03/2024	20/03/2024	19/04/2024	20/05/2024	18/06/2024	18/07/2024	17/08/2024	-
Argamassa Interna	19/fev	20/fev	22/fev	23/03/2024	23/03/2024	22/04/2024	22/05/2024	21/06/2024	22/07/2024	20/08/2024	-
Concreto (concreto + argamassa)	07/fev	07/fev	08/fev	-	26/03/2024	25/04/2024	25/05/2024	24/06/2024	24/07/2024	23/08/2024	26/03/2025

Fonte: Própria autoria.

Ao final do período de ensaios, utilizando o Python para a construção das curvas de evolução da profundidade de carbonatação, aplicou-se o Método dos Mínimos Quadrados, considerando a formulação proposta por Tuutti (1982), na Equação (4), fundamentada na primeira Lei de Fick, ajustando-se o gráfico da evolução da profundidade para obter a taxa de difusão de CO_2 (K). Como exemplo, a Figura 22 apresenta um gráfico de calibração da taxa de difusão do gás ($K = 1,75 \text{ mm/ano}^{0.5}$) para um elemento de argamassa protegido com tinta PVA, situado em ambiente externo, desprotegido da chuva. Observa-se que a formulação proposta por Tuutti (1982) conseguiu captar o avanço da carbonatação, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,93.

Figura 22 - Exemplo de calibração da taxa de difusão do CO_2 .



Fonte: Própria autoria.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados da campanha experimental, identificando o nível de influência das diferentes condições de proteção superficial sobre a durabilidade do concreto, por meio da mensuração da profundidade de carbonatação e da taxa de difusão de CO₂.

4.1 ENSAIOS FÍSICO-MECÂNICOS

De acordo com as diretrizes estabelecidas na NBR 9778 (ABNT, 2005), foram analisadas experimentalmente quatro amostras de concreto e de argamassa, com o objetivo de determinar o índice de vazios (IV), expresso em porcentagem. A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos para cada um dos parâmetros utilizados no cálculo do IV, bem como os valores médios e os desvios padrão referentes ao concreto e à argamassa. Observa-se que a argamassa apresenta um índice de porosidade significativamente superior ao do concreto, cerca de 263% maior, o que indica menor resistência ao ingresso de CO₂.

Tabela 11 - Índice de vazios.

	Concreto				Argamassa			
Amostra	m _{sat} (kg)	m _i (kg)	m _s (kg)	I _v (%)	m _{sat} (kg)	m _i (kg)	m _s (kg)	I _v (%)
1	3,545	2,615	3,410	14,516	3,219	2,221	2,804	41,583
2	3,555	2,610	3,415	14,815	3,231	2,212	2,815	40,824
3	3,550	2,615	3,380	18,182	3,226	2,225	2,811	41,458
4	3,585	2,630	3,440	15,183	3,235	2,231	2,819	41,434
Média	3,558	2,617	3,411	15,674	3,227	2,222	2,812	41,325
Desvio Padrão	0,017	0,006	0,024	1,694	0,016	0,017	0,016	0,340

Fonte: Própria autoria.

Tabela 12 - Resistência à compressão dos materiais.

Amostra	f _c concreto (MPa)	f _c argamassa (MPa)
1	32,34	4,41
2	30,30	4,18
3	30,05	4,22
4	34,63	3,92
Média	31,83	4,18
Desvio Padrão	2,12	0,20

Fonte: Própria autoria.

No que se refere às propriedades mecânicas, a Tabela 12 apresenta os valores de resistência à compressão da argamassa e do concreto empregados na produção dos elementos. Conforme indicado, o concreto possui classe de resistência C30, com resistência à compressão média de 31,83 MPa, enquanto a argamassa apresenta resistência à compressão média de 4,18 MPa.

4.2 ANÁLISE DA CARBONATAÇÃO

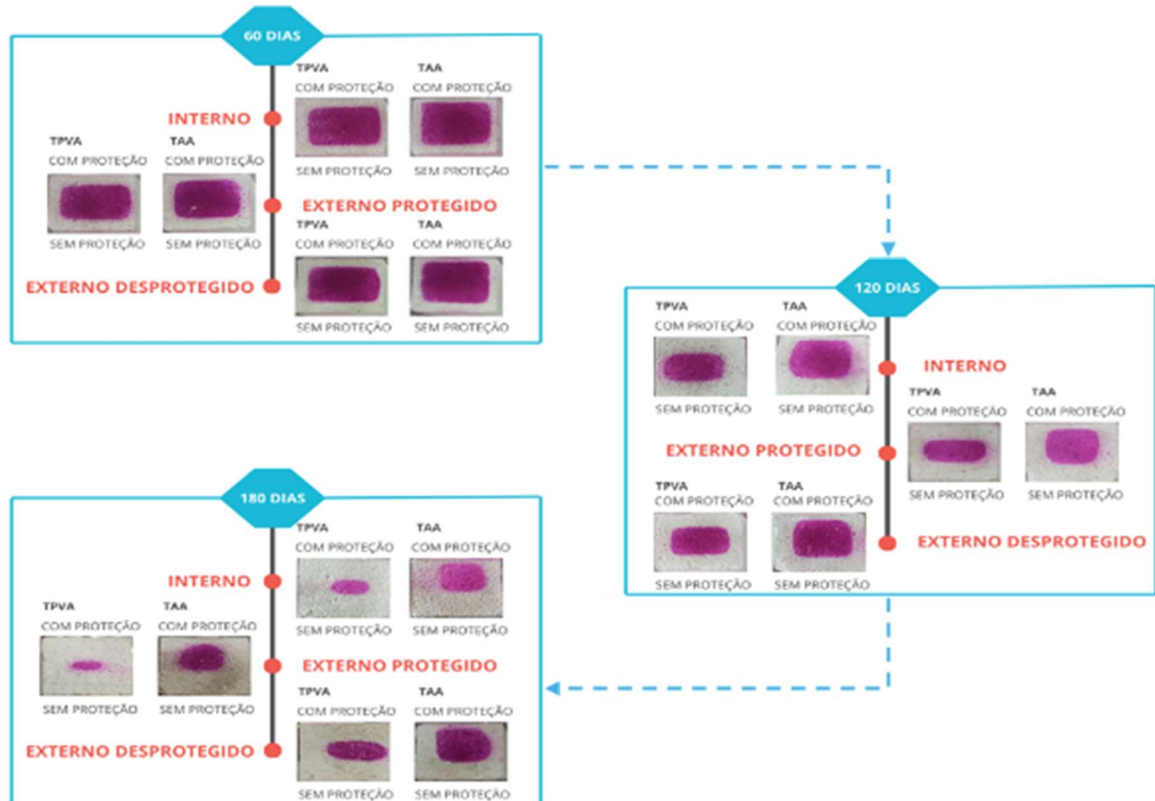
As medições das frentes carbonatadas foram realizadas em diferentes idades, conforme a metodologia previamente definida, abrangendo o comportamento dos sistemas avaliados ao longo de 180 dias para os elementos de argamassa e de 365 dias para os elementos de concreto, considerando três ambientes distintos: externo desprotegido da chuva, externo protegido da chuva e interno.

4.2.1 Avanço da carbonatação na argamassa

Com o objetivo de ilustrar qualitativamente as diferenças no avanço da carbonatação entre os sistemas de proteção superficial aplicados nos elementos de argamassa, a Figura 23 apresenta corpos de prova de argamassa submetidos à aspersão de fenolftaleína, permitindo constatar a menor profundidade de carbonatação no elemento protegido com tinta acrílica acetinada (TAA), em comparação aos demais sistemas, evidenciando a eficácia dessa proteção na contenção da frente carbonatada. A análise quantitativa dos resultados é apresentada a seguir, iniciando-se pelo ambiente externo desprotegido da chuva.

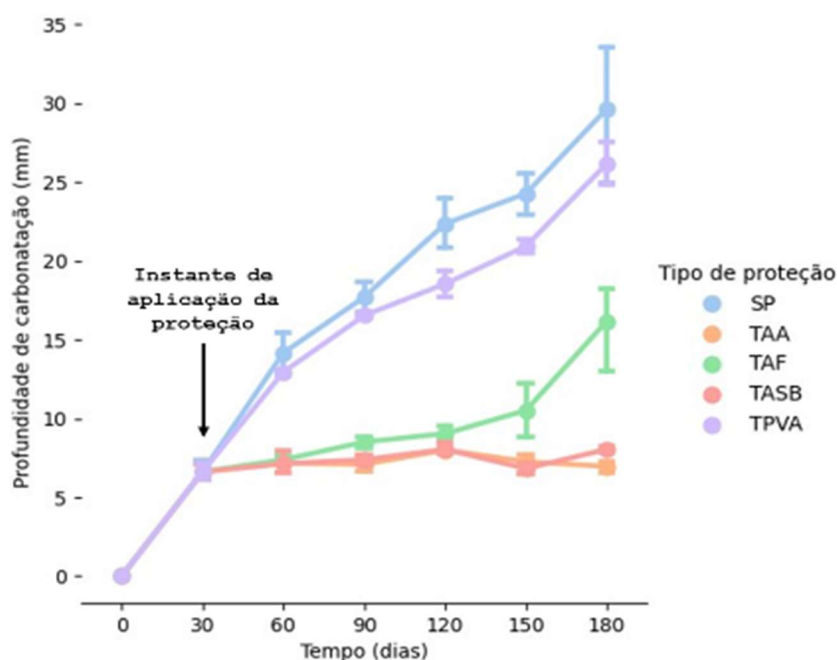
A Figura 24 apresenta a evolução da profundidade de carbonatação, em milímetros, ao longo do tempo, para elementos de argamassa expostos ao ambiente externo, desprotegidos da chuva e submetidos a diferentes condições de proteção superficial. Foram avaliadas cinco situações distintas: sem proteção (SP) e com aplicação de tintas acrílicas do tipo acetinada (TAA), fosca (TAF), semibrilho (TASB) e PVA (TPVA). É importante destacar que a aplicação das proteções ocorreu aos 30 dias de idade dos elementos, motivo pelo qual, até o momento, todos os grupos apresentaram comportamento idêntico quanto à penetração de dióxido de carbono.

Figura 23 - Exemplo de elementos avaliados quanto à carbonatação aos 60, 120 e 180 dias.



Fonte: Própria autoria.

Figura 24 - Evolução da carbonatação no ambiente externo, desprotegido da chuva, em elementos de argamassa.

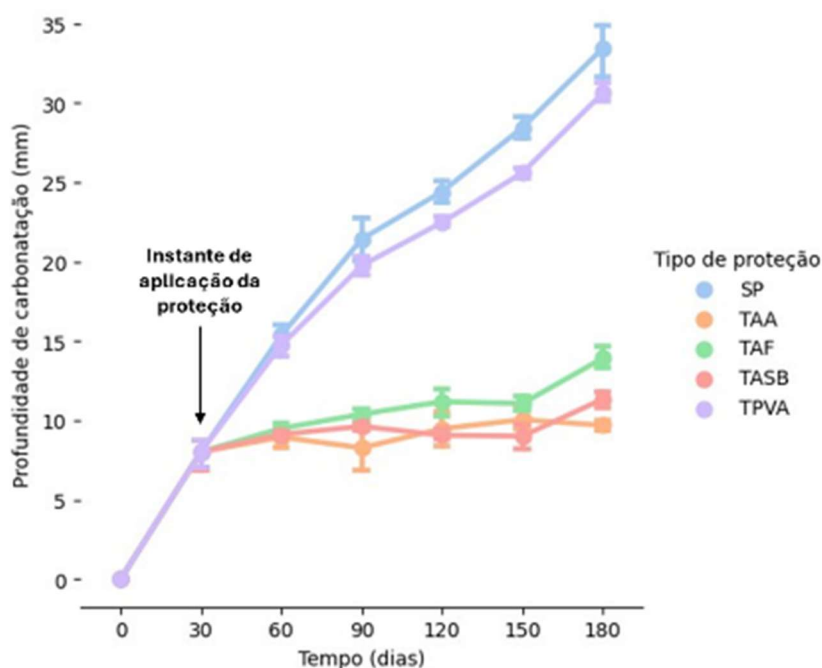


Fonte: Própria autoria.

A partir dos 60 dias, com a aplicação das camadas de proteção aos 30 dias, observa-se uma divergência clara entre os grupos protegidos e os não protegidos. O grupo SP, que permaneceu exposto sem qualquer tipo de revestimento, apresentou o maior avanço na profundidade de carbonatação ao longo do tempo, alcançando valores superiores a 30 mm aos 180 dias. A argamassa protegida com tinta PVA (TPVA) apresentou comportamento semelhante ao do grupo sem proteção, indicando baixa eficácia dessa tinta na contenção do processo de carbonatação.

Por outro lado, os grupos protegidos com tintas acrílicas, especialmente a tinta acrílica semibrilho (TASB) e a acrílica acetinada (TAA), apresentaram desempenho significativamente superior. Aos 180 dias, esses sistemas limitaram a penetração de dióxido de carbono a profundidades próximas ou inferiores a 10 mm, evidenciando maior capacidade de barreira contra o agente agressivo. A tinta acrílica fosca (TAF), embora tenha apresentado desempenho intermediário, ainda apresentou redução substancial na carbonatação em comparação ao grupo SP, com profundidade próxima de 17 mm no mesmo intervalo de tempo.

Figura 25 - Evolução da carbonatação no ambiente externo, protegido da chuva, em elementos de argamassa.

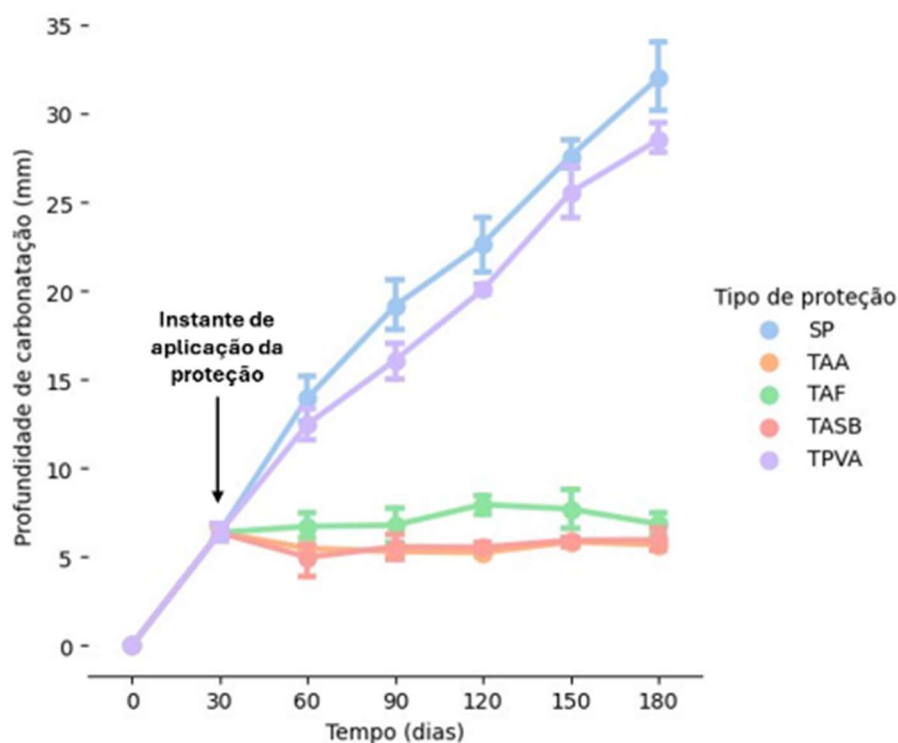


Fonte: Própria autoria.

Figura 25 apresenta a evolução da profundidade de carbonatação dos elementos de argamassa expostos em ambiente externo, protegidos da chuva, no qual o grupo SP também apresentou a maior profundidade de carbonatação ao final dos 180 dias, com média de 33,44 mm e desvio padrão de 18,11 mm, evidenciando uma elevada taxa de penetração de dióxido de carbono em ausência de barreira superficial. Isso demonstra que, mesmo em ambientes sem incidência direta de chuva, a ausência de proteção torna os elementos de argamassa extremamente suscetíveis à carbonatação, comprometendo significativamente sua durabilidade.

Entre os sistemas de proteção avaliados, os revestimentos com tinta acrílica apresentaram melhor desempenho. A tinta acrílica acetinada (TAA) foi a mais eficiente, restringindo a profundidade de carbonatação a uma média de 9,69 mm, com desvio padrão de apenas 0,38 mm, evidenciando não apenas elevada proteção, mas também baixa variabilidade nos resultados. Em seguida, destaca-se o desempenho da tinta acrílica semibrilho (TASB), com média de 11,34 mm, e da acrílica fosca (TAF), com média de 13,91 mm, ambas apresentando proteção significativamente superior à da ausência de revestimento.

Figura 26 - Evolução da carbonatação no ambiente interno de elementos de argamassa.



Fonte: Própria autoria.

Por outro lado, a tinta PVA (TPVA) apresentou desempenho inferior ao dos sistemas acrílicos, com uma média de 30,62 mm de profundidade de carbonatação, valor ainda substancialmente menor do que o do grupo SP, mas cerca de três vezes superior ao dos sistemas acrílicos. Esses dados indicam que, embora a TPVA exerça alguma função de barreira, sua eficácia é consideravelmente inferior à dos demais tipos de tinta acrílica avaliados.

A Figura 26 ilustra a evolução da profundidade de carbonatação dos elementos de argamassa protegidos com diferentes tipos de revestimentos e expostos em ambiente interno. Assim como nos demais ambientes, as proteções foram aplicadas aos 30 dias, resultando em profundidades iniciais semelhantes entre os grupos.

Com o passar do tempo, torna-se evidente a diferença de comportamento entre os sistemas de proteção. O grupo SP (sem proteção) apresentou a maior profundidade de carbonatação ao final de 180 dias, com média de 32,01 mm e desvio padrão de 2,32 mm, indicando que, mesmo em ambiente interno, com menor

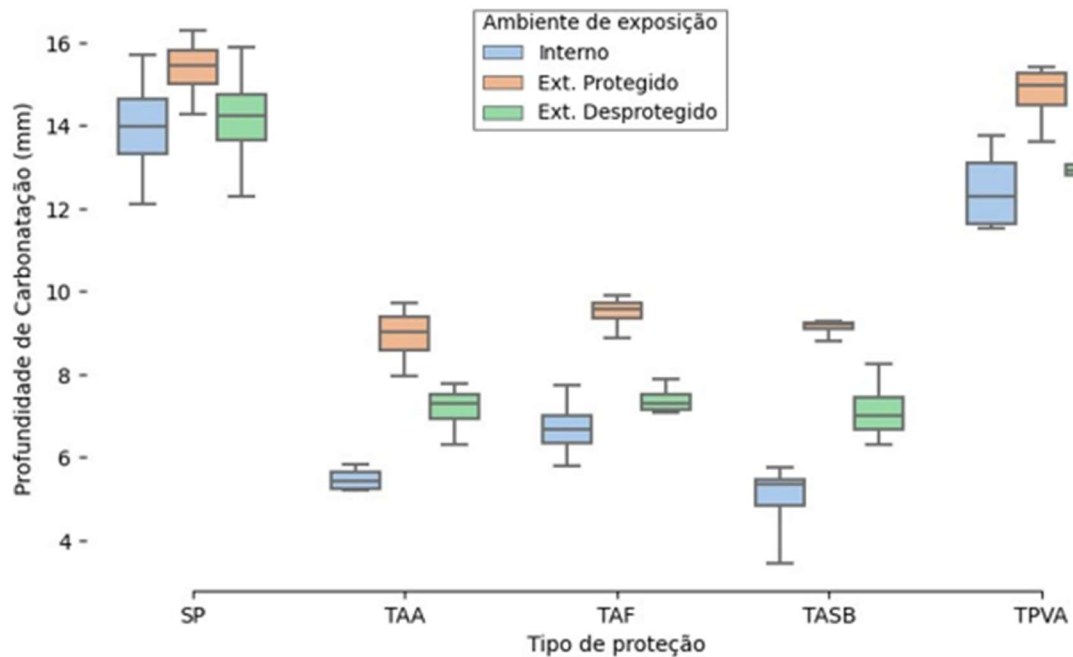
influência das intempéries, o avanço da carbonatação ainda ocorre de forma significativa na ausência de barreiras protetoras.

Entre os sistemas avaliados, o grupo protegido com TAA (tinta acrílica acetinada) foi novamente o mais eficiente, limitando a profundidade de carbonatação a uma média de 5,68 mm e apresentando baixa dispersão dos dados (desvio padrão de 0,39 mm), o que demonstra alto desempenho e consistência da proteção aplicada. Em seguida, o grupo com TASB (acrílico semibrilho) apresentou média de 5,95 mm, seguido pela TAF (acrílico fosca), com 6,84 mm, ambos mantendo valores bastante inferiores aos do grupo SP. Por outro lado, a proteção com TPVA (tinta PVA) apresentou desempenho claramente inferior ao das tintas acrílicas, com uma média de 28,52 mm, próxima da profundidade observada no grupo sem proteção.

Esses resultados indicam que a escolha do tipo de revestimento superficial exerce influência direta sobre a durabilidade dos elementos cimentícios no processo de carbonatação. A aplicação de tintas acrílicas, especialmente as com acabamento acetinado e semibrilho, mostrou-se eficaz na contenção do avanço da frente de carbonatação, ao passo que o uso de tinta PVA não apresentou efeito protetivo significativo, sendo comparável à ausência total de proteção. Barbosa (2021), por meio de ensaios experimentais, também demonstrou que sistemas de proteção superficial à base de tintas acrílicas apresentam maior eficiência no retardo da carbonatação quando comparados às tintas à base de PVA, destacando que os revestimentos acrílicos oferecem maior resistência à difusão de CO_2 , o que confirma, de forma consistente, os achados do presente estudo.

A fim de avaliar o efeito do ambiente de exposição em conjunto com o sistema de proteção, compilaram-se os dados em três períodos de exposição ao CO_2 : 60 dias (Figura 27), 120 dias (Figura 28) e 180 dias (Figura 29). Os resultados obtidos mostram que, nas condições climáticas da região do Vale do Paraíba (estado de São Paulo), entre fevereiro e agosto, o ambiente externo protegido da chuva tende a proporcionar as maiores profundidades de carbonatação, indicando que nem sempre o ambiente interno apresenta as maiores frentes de carbonatação. Estes resultados têm sido observados pelo grupo de pesquisa CO_2 Construction, no qual Pedry (2020) e Barbosa (2021) registraram maiores profundidades nos elementos situados no ambiente externo, protegido da chuva, ambos desenvolvidos na região oeste do Paraná.

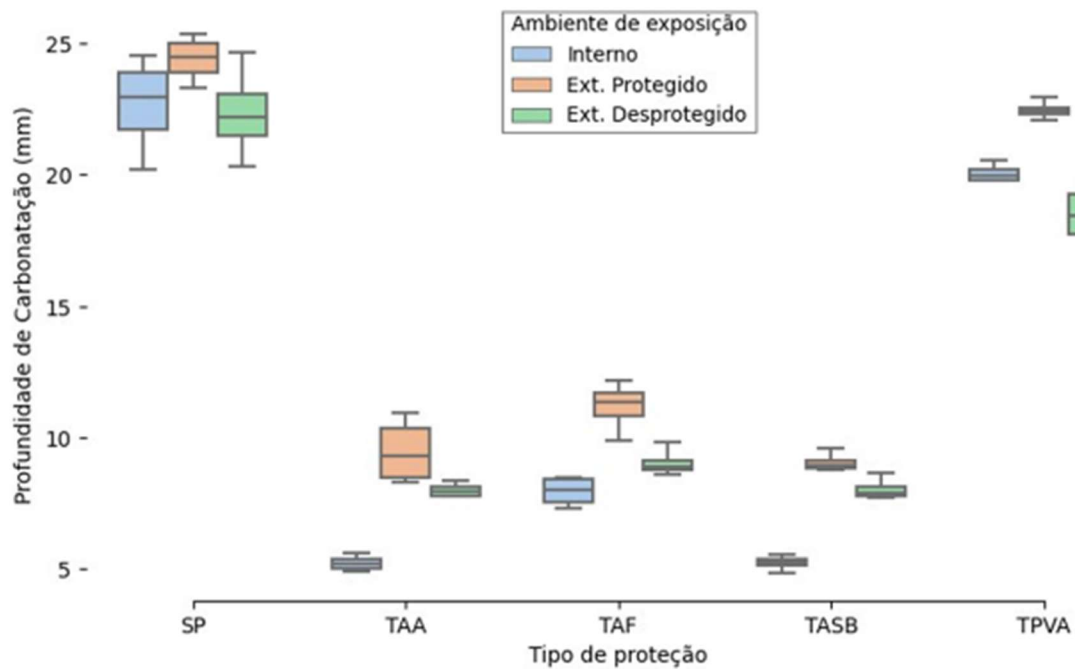
Figura 27 - Profundidade de carbonatação em função do ambiente de exposição aos 60 dias.



Fonte: Própria autoria.

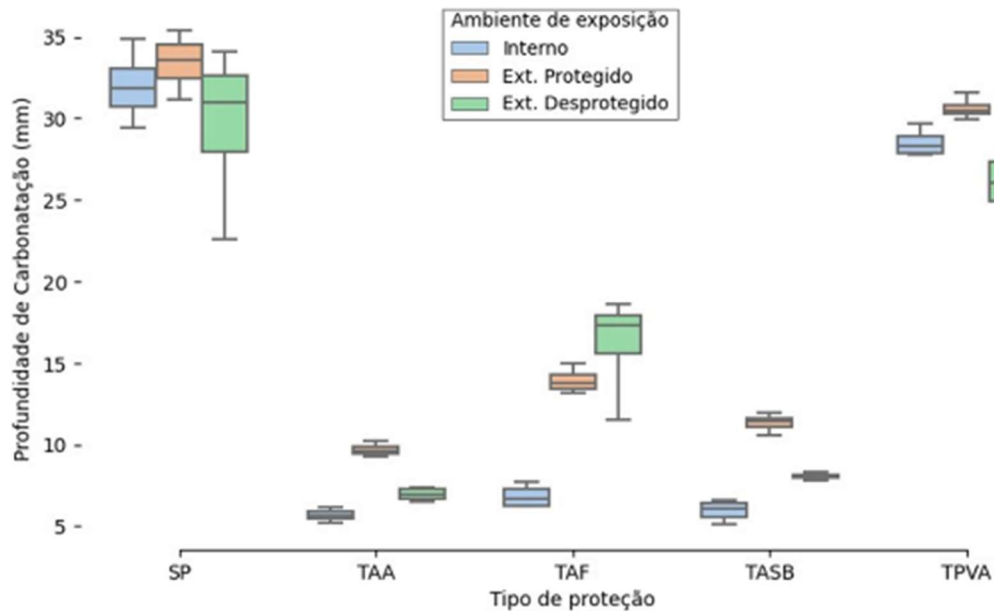
Acredita-se que o ambiente externo, desprotegido da chuva, atua diretamente como fator de retardamento da carbonatação. Isso ocorre porque a água da chuva tende a manter os poros superficiais saturados, o que dificulta a entrada do CO_2 (POSSAN 2010). Além disso, o efeito de lavagem superficial pode remover parcialmente os produtos da reação da carbonatação ou dificultar sua formação contínua. Essa dinâmica ajuda a explicar por que, mesmo sendo mais agressivo em outros aspectos, como a lixiviação e o ataque por íons, o ambiente externo desprotegido pode apresentar profundidades de carbonatação menores do que o ambiente protegido da chuva.

Figura 28 - Profundidade de carbonatação em função do ambiente de exposição aos 120 dias.



Fonte: Própria autoria.

Figura 29 - Profundidade de carbonatação em função do ambiente de exposição aos 180 dias.



Fonte: Própria autoria.

No ambiente externo, protegido da chuva, embora menos exposto à ação direta da água, mantém os poros do material em condições favoráveis às reações

químicas de carbonatação, especialmente em locais com boa ventilação e variações de temperatura. Essas condições podem favorecer a difusão do dióxido de carbono (CO_2) pelos poros da matriz cimentícia, o que acelera a carbonatação.

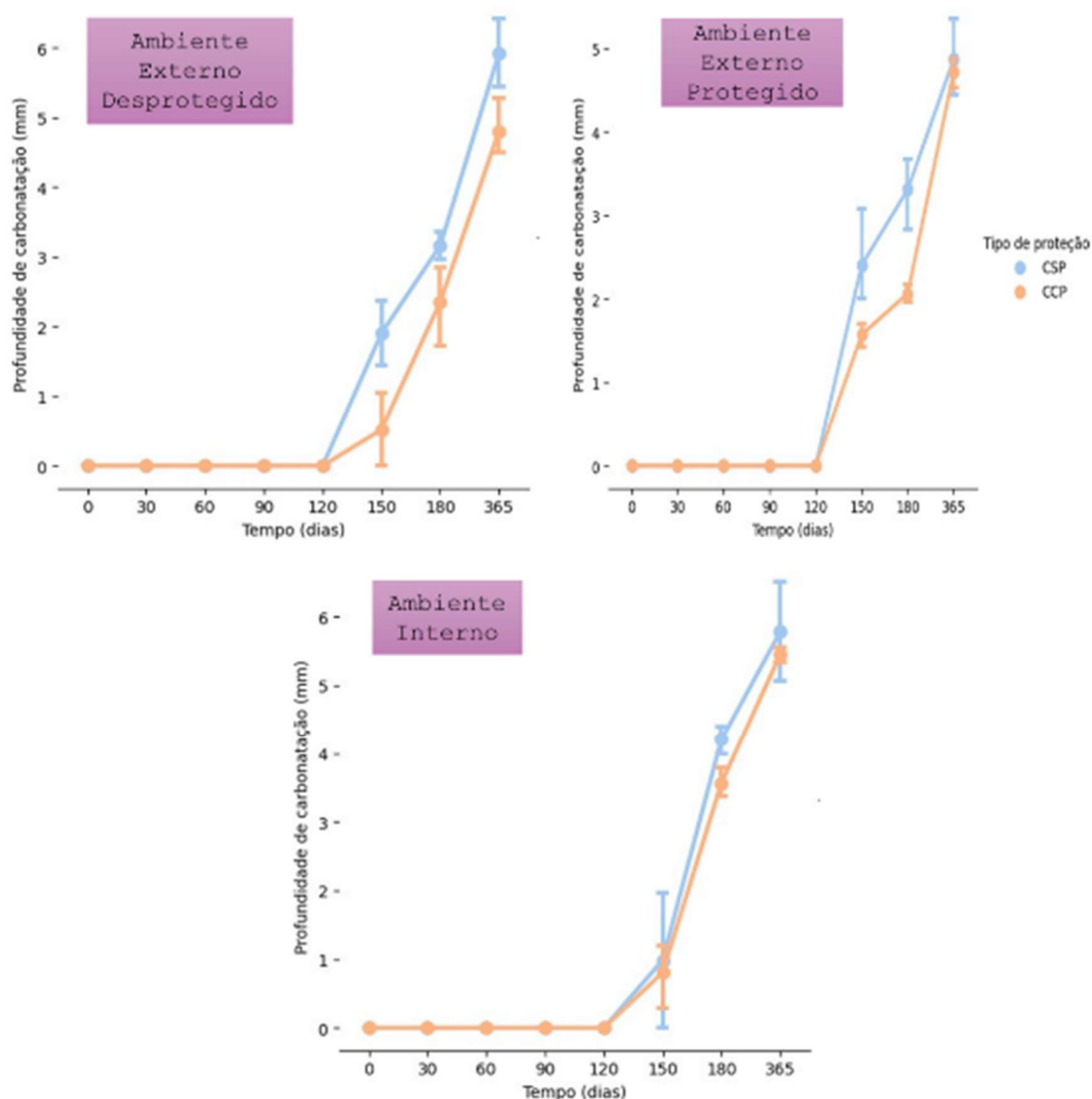
Já no ambiente interno, a carbonatação ocorre mais lentamente. A menor ventilação, as variações limitadas de temperatura e a relativa estabilidade da umidade contribuem para uma taxa reduzida de penetração de CO_2 . Isso, considerando o ambiente investigado nesse estudo, que consistia em uma sala de laboratório com temperatura e umidade controladas entre 20 e 25 °C e umidade relativa entre 70 e 80%. De acordo com a literatura (VERBECK, 1958; POSSAN, 2010; CHEN; LIU; YU, 2018), umidades acima de 60-70% já provocam retardo na carbonatação de materiais cimentícios, o que pode justificar as menores frentes de carbonatação observadas no estudo. Com isso, os valores de profundidade de carbonatação nesse ambiente, especialmente em sistemas totalmente protegidos, permanecem significativamente inferiores aos observados em ambientes externos.

4.2.2 Avanço da carbonatação no concreto

Avaliada a carbonatação nos sistemas de argamassa com proteção, verificou-se se a argamassa aplicada nas faces da estrutura de concreto reduz a difusão de CO_2 , contribuindo para a vida útil do concreto. Com base na comparação entre os concretos sem proteção (CSP) e com proteção por uma camada de argamassa de 20 mm (CCP), os resultados da Figura 30 mostram que a camada de argamassa reduz a velocidade de carbonatação. Comenta-se até 120 dias; a profundidade de carbonatação nos concretos foi considerada zero, uma vez que não foi possível mensurá-la com precisão quando a camada carbonatada estava abaixo de 1 mm.

No ambiente externo desprotegido, a profundidade média de carbonatação aos 180 dias do concreto sem proteção foi de 3,16 mm, enquanto o concreto protegido apresentou profundidade média de 2,35 mm. Isso representa uma redução de 25,63% na penetração do dióxido de carbono devido à presença da camada de argamassa. No ambiente externo, protegido da chuva, o efeito da camada de argamassa foi ainda mais expressivo ao longo dos 180 dias. A profundidade média da frente de carbonatação no CSP foi de 3,31 mm, em comparação com 2,07 mm no CCP, o que corresponde a uma redução de 37,61%.

Figura 30 - Carbonatação nos elementos de concreto com e sem proteção.



Fonte: Própria autoria.

No ambiente interno, aos 180 dias, os valores médios de profundidade foram de 4,21 mm para o CSP e de 3,56 mm para o CCP, o que representa uma redução de 15,22%. Embora essa seja a menor diferença percentual entre os ambientes analisados, a presença da camada de argamassa apresentou efeito positivo. A menor eficácia relativa nesse ambiente pode estar relacionada à menor taxa de avanço da carbonatação em geral, uma vez que a umidade e ventilação são mais controladas, e os mecanismos de difusão de CO_2 ocorrem com menor intensidade.

Ao estender a análise aos 365 dias de exposição ao dióxido de carbono, observa-se a manutenção do comportamento favorável da camada de argamassa

(CCP) na redução da profundidade de carbonatação em relação ao concreto sem proteção (CSP), embora com variações no grau de eficácia conforme o ambiente de exposição.

No ambiente externo desprotegido, a profundidade média de carbonatação no CSP foi de 5,92 mm, enquanto no CCP foi de 4,81 mm, o que corresponde a uma redução de 18,83%. Essa redução, embora menor do que a observada aos 180 dias (25,63%), ainda evidencia a ação contínua da argamassa como barreira física ao avanço da frente de carbonatação, mesmo com o prolongamento da exposição. A ligeira redução no percentual pode indicar que, ao longo do tempo, a proteção oferecida pela camada de argamassa começa a se equilibrar com a ação contínua de difusão do CO_2 .

No ambiente externo protegido da chuva, o efeito da argamassa aos 365 dias foi mais discreto. A profundidade média da frente de carbonatação foi de 4,88 mm no CSP e de 4,72 mm no CCP, o que corresponde a uma redução de apenas 3,08%. Esse dado reforça a tendência observada em análises anteriores: embora esse ambiente promova condições propícias ao avanço da carbonatação (por manter os poros mais secos), a eficiência da proteção com argamassa tende a se tornar mais limitada ao longo do tempo. Já no ambiente interno, a profundidade média aos 365 dias foi de 5,78 mm para o CSP e de 5,45 mm para o CCP, o que resulta em uma redução de 5,71%. Assim como no ambiente protegido, essa redução é inferior à observada aos 180 dias (15,22%), indicando que, com o tempo, a diferença de desempenho entre os dois sistemas tende a diminuir.

A análise ao longo de 365 dias revela que a camada de argamassa continua atuando como uma medida eficaz de proteção contra a carbonatação do elemento de concreto, especialmente no início do processo. Com o passar do tempo, essa eficácia tende a diminuir, o que pode ser atribuído ao esgotamento da capacidade de barreira superficial da argamassa ou à difusão mais profunda do agente agressivo.

De modo geral, seja nos elementos de concreto, seja nos elementos de argamassa, os dados obtidos destacam que o ambiente de exposição exerce influência direta sobre o avanço da carbonatação da argamassa, sendo que, neste trabalho, o ambiente externo, protegido da chuva, mostra-se o mais propício à penetração de CO_2 . Em contrapartida, a presença da chuva, usualmente associada a efeitos deletérios na durabilidade das estruturas, pode, nesse contexto, atuar como fator moderador da carbonatação, ao promover a saturação parcial dos poros e

restringir a difusão do dióxido de carbono. Tendência semelhante foi observada por Fontolan et al. (2024), que identificaram o ambiente externo protegido como aquele associado às maiores taxas de progressão da carbonatação, bem como por Rufatto (2019) e Pedry (2020), que demonstraram que o avanço do processo atinge valores elevados em ambientes externos protegidos da chuva. Esses resultados reforçam a ideia de que a combinação de disponibilidade significativa de CO_2 e de um regime de umidade favorável ao transporte gasoso constitui a condição mais propícia ao desenvolvimento do fenômeno. Tal comportamento, contudo, diverge da abordagem apresentada na literatura tradicional, como exposto por Ortolan, Squiavon e Andrade (2015), Antônio (2018) e Mazurana (2019), que associam as maiores taxas de carbonatação predominantemente ao ambiente interno.

4.2.3 Influência do ambiente de exposição

Ao considerar os resultados mais recentes da literatura e os obtidos neste estudo, observa-se a importância de considerar não apenas o tipo de ambiente (interno, externo desprotegido e externo protegido da chuva), mas também os diferentes parâmetros que caracterizam as condições climáticas do ambiente de exposição, como a temperatura, a umidade relativa do ar, a precipitação e a exposição direta ao sol.

A profundidade da carbonatação em materiais cimentícios está diretamente relacionada às condições ambientais de exposição e é influenciada de forma integrada pela temperatura, pela umidade relativa do ar e pelo regime de precipitação (POSSAN, 2010). Esses parâmetros atuam em conjunto no controle dos mecanismos de transporte do dióxido de carbono e na disponibilidade de água nos poros do material, elementos essenciais para a ocorrência das reações de carbonatação. Variações na umidade relativa afetam o grau de saturação dos poros, podendo tanto favorecer quanto restringir a difusão gasosa, enquanto a precipitação interfere no estado hídrico superficial por meio de ciclos de saturação e de secagem (DESPOTOU et al., 2016). Dessa forma, a análise da profundidade de carbonatação requer uma abordagem integrada às condições ambientais, como é apresentada na sequência para o período dos 120 primeiros dias de exposição.

Para subsidiar essa análise, as informações referentes à temperatura, à umidade relativa e ao volume de precipitação foram obtidas da plataforma Climatempo

para caracterizar os ambientes externos. No ambiente interno, os elementos permaneceram em condições controladas, com baixa variação ao longo do tempo, registrando temperatura entre 20 e 25 °C e umidade relativa entre 70 e 80%. Para os ambientes externos, os dados provêm de uma estação meteorológica situada a aproximadamente 6,6 km dos pontos de exposição dos corpos de prova, localizados nas dependências da FEG-UNESP, conforme ilustrado na Figura 31.

Figura 31 - Indicação, por satélite, da posição da estação meteorológica em relação aos CPs.



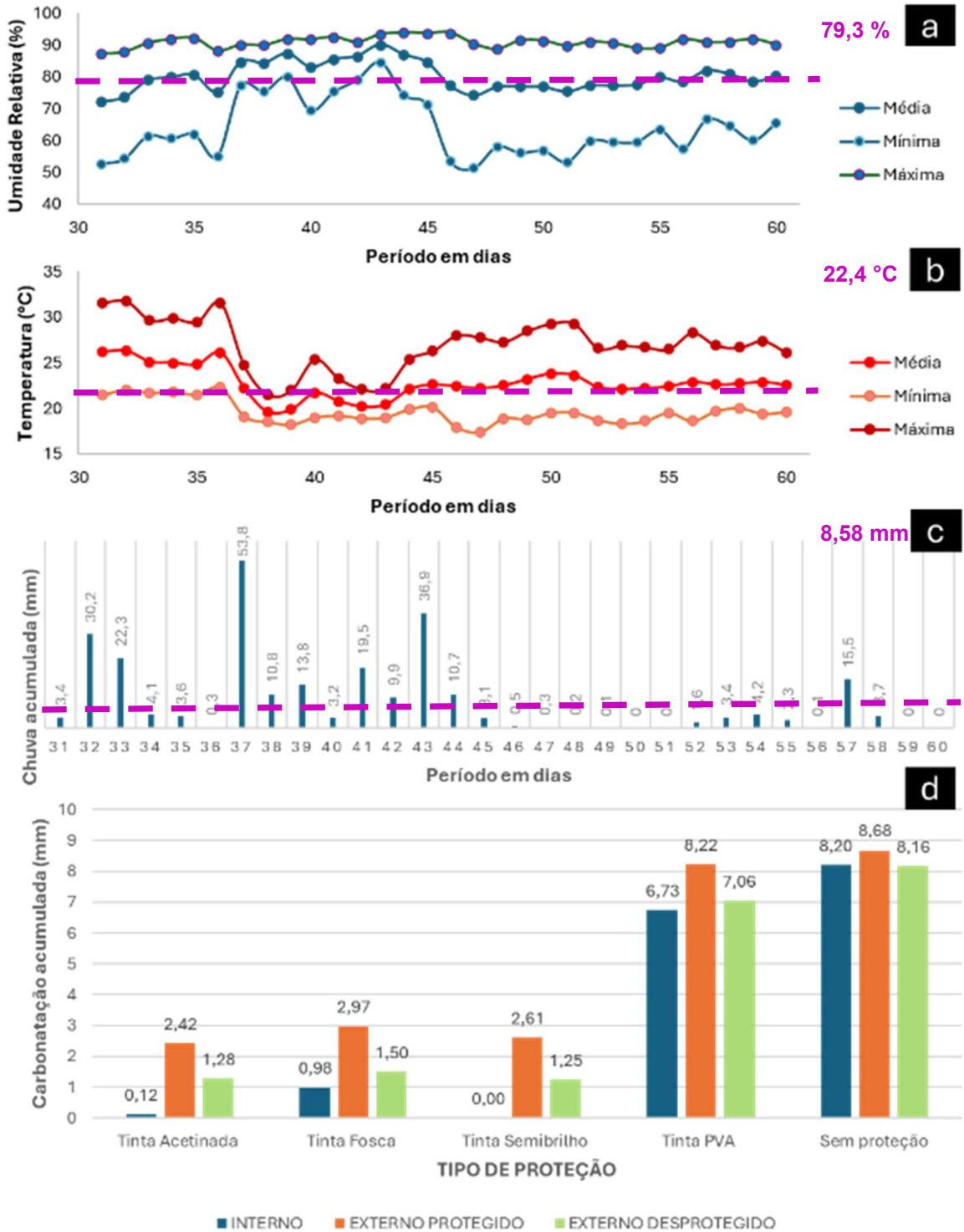
Fonte: Website Climatedpo (2025).

Com os dados coletados, tratados e analisados, a seguir são apresentadas e discutidas as relações entre a temperatura média, a umidade relativa média e a precipitação pluviométrica ao longo do período experimental, relacionando-as ao avanço da frente de carbonatação observado nos corpos de prova de argamassa (Figuras 32, 33 e 34). Comenta-se que os dados de temperatura e de umidade relativa estão associados aos ambientes externos protegidos e desprotegidos, enquanto o de precipitação refere-se apenas ao ambiente externo desprotegido. Para o ambiente interno, a umidade média foi de 75% e a temperatura média, de 22,5 °C, ao longo de todo o período de análise.

Ao longo dos 30 primeiros dias após a aplicação do sistema de proteção (Figura 32), todos os elementos sem proteção apresentaram um avanço acumulado de 8 mm na profundidade de carbonatação, sendo o ambiente externo protegido o de

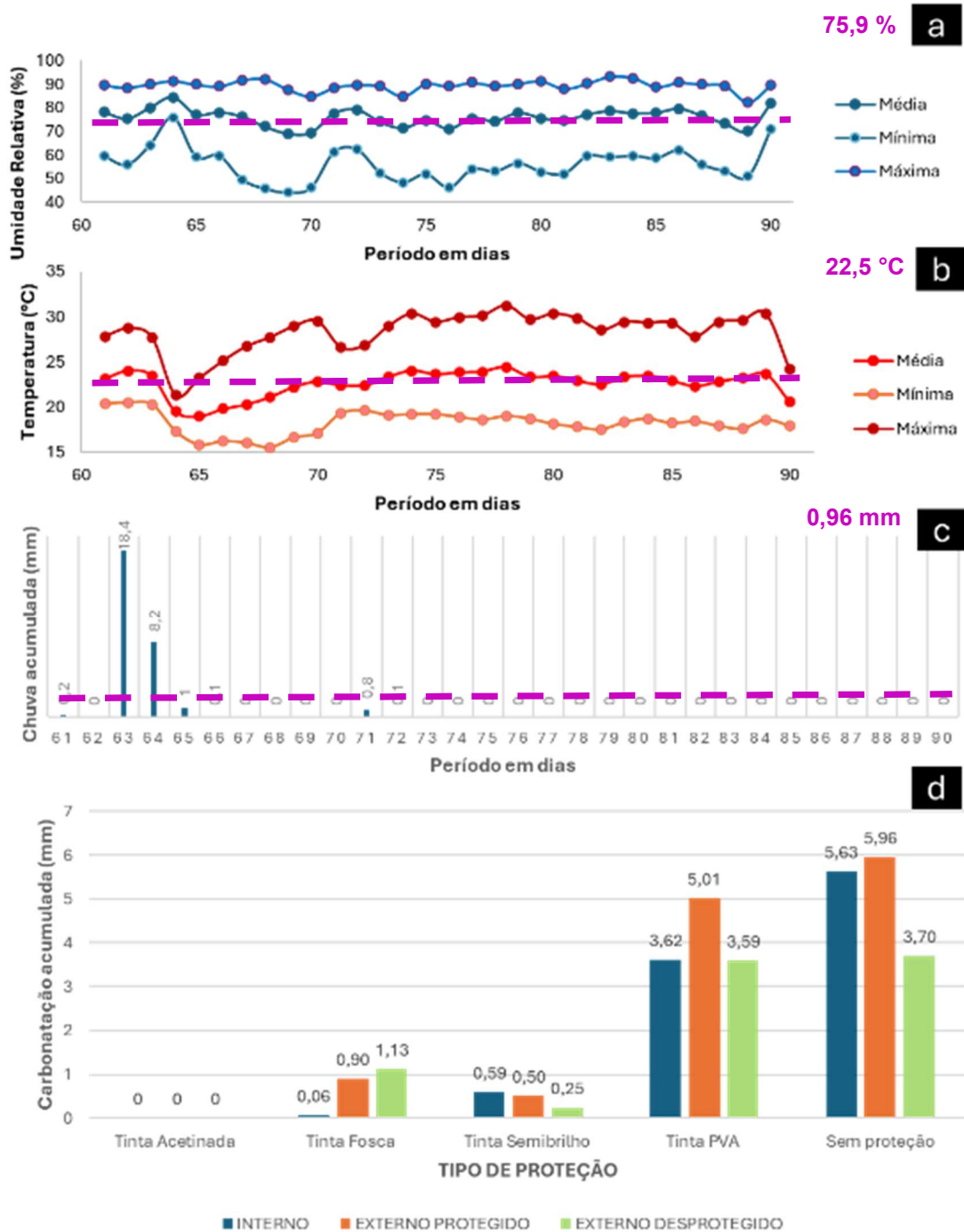
maior carbonatação (8,64 mm) e o externo desprotegido o de menor carbonatação (8,16 mm). Na maioria dos sistemas de proteção, os elementos em ambiente externo, desprotegidos da chuva, apresentaram os maiores avanços na profundidade de carbonatação. No entanto, as profundidades reduziram-se significativamente nos sistemas com proteção superficial. No sistema com tinta acrílica acetinada, o ambiente interno apresentou um acumulado médio de carbonatação de 0,12 mm, enquanto o ambiente externo protegido apresentou uma frente carbonatada média de 1,28 mm.

Figura 32 - (a) Umidade Relativa; (b) Temperatura; (c) Chuva Acumulada; (d) Carbonatação acumulada, no período de 1-30 dias após a aplicação da proteção superficial (31-60 dias).



Fonte: Própria autoria.

Figura 33 - (a) Umidade Relativa; (b) Temperatura; (c) Chuva Acumulada; (d) Carbonatação acumulada, no período de 31-60 dias após a aplicação da proteção superficial (61-90 dias).

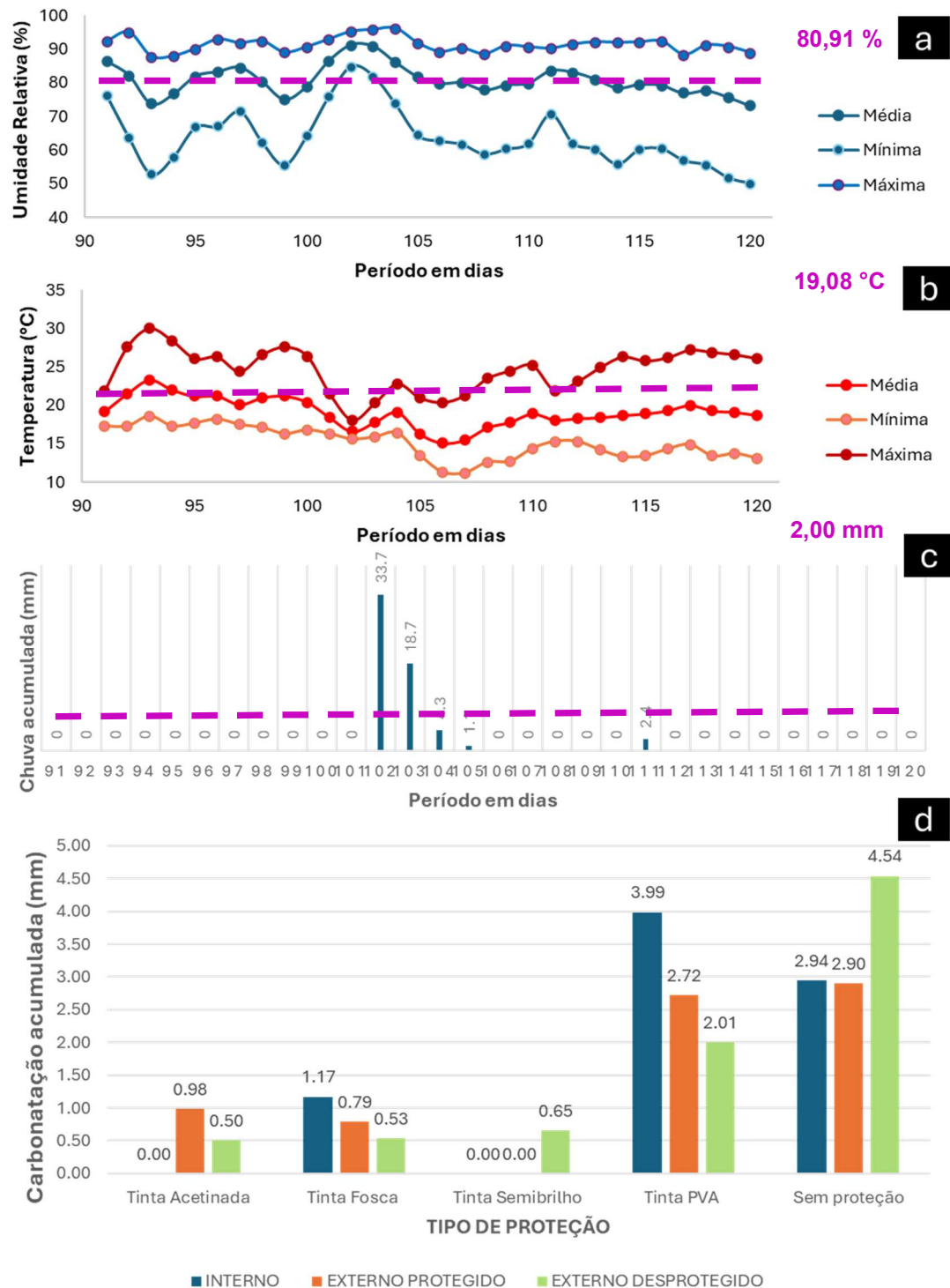


Fonte: Própria autoria.

Ao confrontar estes resultados com os parâmetros do ambiente de exposição, observa-se que houve um volume considerável de chuva no período, o que pode ter favorecido o transporte de CO_2 para o interior da matriz cimentícia

(principalmente nos protegidos da chuva). A chuva acumulada no período foi de 257,5 mm, sendo 53,8 mm o maior acumulado diário.

Figura 34 - (a) Umidade Relativa; (b) Temperatura; (c) Chuva Acumulada; (d) Carbonatação acumulada, no período de 91-120 dias após a aplicação da proteção superficial (121-150 dias).



Fonte: Própria autoria.

A temperatura média dos ambientes externos foi de 22,4 °C (máxima de 31,8 °C e mínima de 15,5 °C), enquanto a umidade relativa média foi de 79,3 % (máxima de 94,0 % e mínima de 44,1 %). Estes valores são muito próximos dos valores médios do ambiente interno controlado (umidade média de 75% e temperatura média de 22,5 °C). No entanto, como há considerável variabilidade nos valores máximos e mínimos ao longo do dia, esta variabilidade deve ter permitido que o CO₂ ingressasse mais rapidamente nos ambientes externos. Como, no ambiente externo desprotegido, a chuva incide diretamente na face do elemento, em uma parte do período de exposição, o CO₂ não penetrou na matriz, não havendo reação com ela, resultando em uma média da frente carbonatada inferior à do ambiente externo protegido.

Avaliando o período de 31 a 60 dias de exposição após a aplicação do sistema de proteção (Figura 33), observou-se precipitação mensalmente acumulada baixa (28,8 mm), em comparação com os primeiros 30 dias (Figura 32). A temperatura média dos ambientes externos foi de 22,5 °C (máxima de 31,2 °C e mínima de 15,6 °C), enquanto a umidade relativa média foi de 75,9 % (máxima de 93,1 % e mínima de 44,8 %). Nessas condições, verificou-se uma redução generalizada da frente de carbonatação acumulada, como esperado, uma vez que a velocidade de carbonatação diminui com o tempo (POSSAN, 2010). A carbonatação acumulada teve valores menores no ambiente interno, reduzindo, por exemplo, de 8,20 mm (nos primeiros 30 dias de exposição, Figura 32) para 5,63 mm no corpo de prova sem proteção e de 6,73 mm para 3,62 mm nos elementos com proteção PVA.

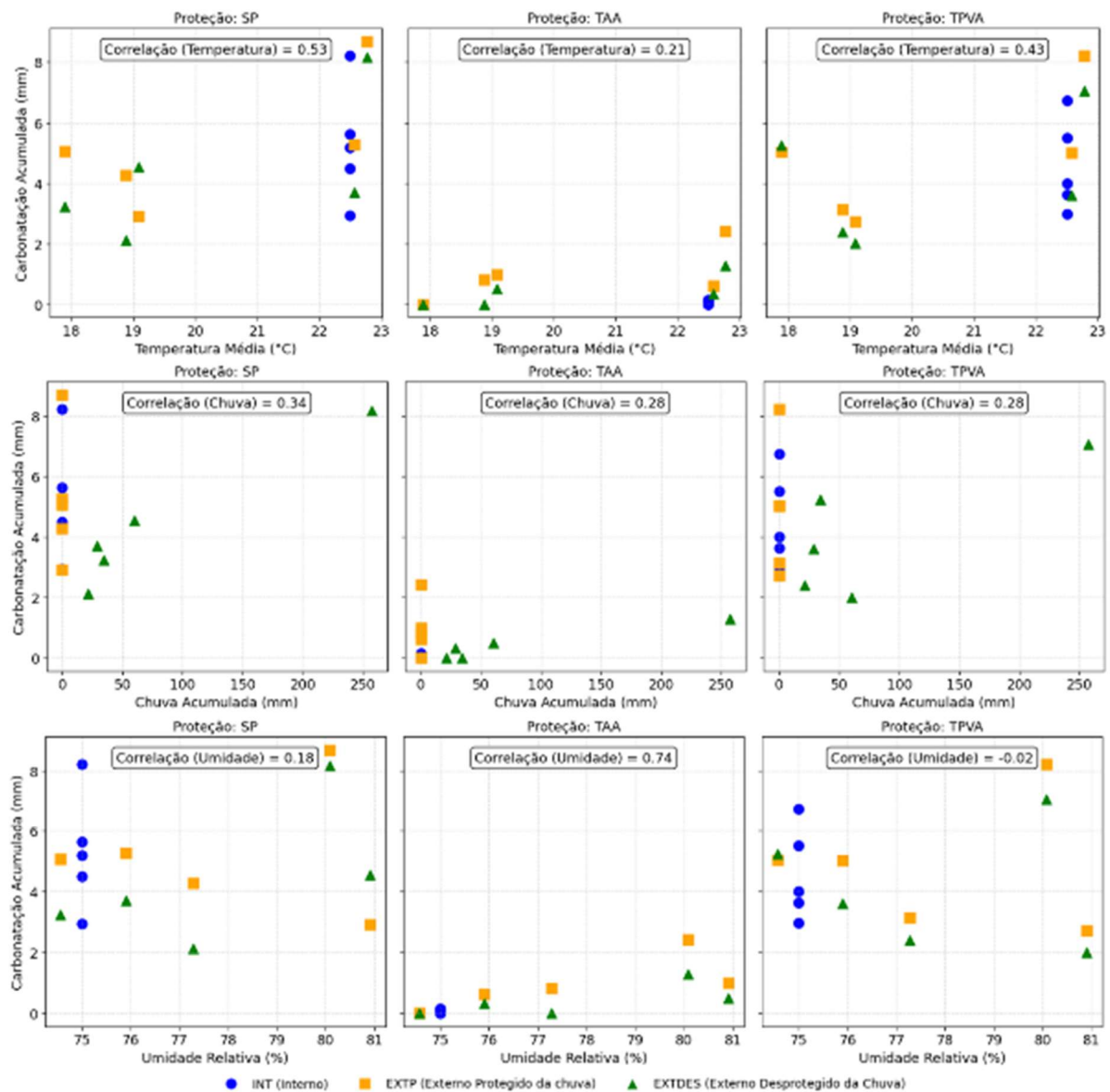
Ao compilar os dados de todos os períodos, considerando todos os cenários de exposição e tipos de proteção superficial, foi possível correlacionar os parâmetros climáticos com a carbonatação acumulada a cada 30 dias ao longo de todo o período da campanha experimental. Os resultados são apresentados na Figura 35, na qual, em cada linha, estão os resultados da análise de correção para cada parâmetro climático, em função de três configurações de proteção superficial (SP - sem proteção, TAA - tinta acrílica acetinada e TPVA - tinta látex PVA).

A avaliação dos resultados compilados indica que a carbonatação acumulada é influenciada pelas condições climáticas, porém, essa influência depende diretamente do tipo de proteção aplicada ao concreto. De modo geral, temperatura, umidade relativa e chuva acumulada atuam conjuntamente, alterando tanto a cinética

da reação de carbonatação quanto os mecanismos de difusão do CO_2 nos poros do material.

No caso da temperatura, observa-se que seu efeito é mais pronunciado nas proteções menos eficientes. Para o concreto sem proteção (SP), a correlação positiva moderada (0,53) indica que o aumento da temperatura média favorece a intensificação da carbonatação. Esse comportamento é coerente com a aceleração das reações químicas em ambientes mais quentes, além da possível redução da umidade relativa interna em temperaturas elevadas, criando condições próximas ao intervalo ótimo de carbonatação (aproximadamente 50–70% de umidade interna nos poros). A proteção TPVA apresentou tendência semelhante (correlação de 0,43), indicando que seu desempenho permite que o material continue a responder de forma significativa às variações térmicas. Já a proteção TAA apresentou correlação fraca (0,21), indicando que sua eficiência reduz a sensibilidade do material às oscilações térmicas; a carbonatação permanece baixa mesmo em condições mais favoráveis à reação.

Figura 35 - Correlação entre os parâmetros climáticos do ambiente de exposição e a carbonatação.



Fonte: Própria autoria.

A influência da chuva acumulada apresenta um comportamento mais complexo. Visualmente, observa-se que os cenários com chuva tendem a apresentar valores médios de carbonatação inferiores aos dos cenários secos (interno e externo protegido), independentemente da configuração do cenário de proteção superficial. Esse comportamento confirma o chamado “efeito de bloqueio dos poros”, no qual a saturação do concreto em água reduz a difusão do CO_2 , limitando o avanço da frente de carbonatação. Esse efeito é perceptível tanto no SP quanto no TPVA e no TAA, ainda que, neste último, os valores absolutos sejam muito baixos. Entretanto, as correlações estatísticas calculadas com a variável de chuva acumulada foram

positivas (por exemplo, 0,34 em SP). Aqui cabe pontuar que a avaliação da chuva acumulada considerou apenas os dados do ambiente externo desprotegido da chuva. Esse comportamento ocorre porque, no subconjunto de dados de elementos expostos à chuva, os maiores volumes acumulados coincidiram com alguns dos maiores valores de carbonatação desse grupo.

Assim, embora a presença de chuva reduza a média global da carbonatação em comparação com os ambientes secos, variações internas no volume de precipitação podem gerar uma correlação positiva no conjunto analisado. Isso sugere que eventos intensos, combinados com temperaturas elevadas ou com ciclos de molhagem e secagem, podem favorecer condições locais de maior avanço da carbonatação.

A umidade relativa, por sua vez, desempenha papel fundamental como variável de controle do processo. Nos grupos SP e TPVA, a carbonatação foi mais elevada em cenários com umidade média de 75–80%, especialmente no ambiente externo seco, onde há disponibilidade contínua de CO_2 , sem saturação permanente dos poros. No caso da proteção TAA, apesar dos baixos valores absolutos, observa-se maior sensibilidade à transição entre os ambientes interno e externo, indicando que o aumento da umidade externa pode representar um fator crítico para o desempenho desse sistema quando exposto a ela. Isso reforça que a carbonatação é maximizada em condições intermediárias de umidade, nas quais há água suficiente para a reação química, mas não em quantidade que impeça a difusão gasosa.

De forma integrada, e considerando os ambientes de exposição da campanha experimental, os resultados indicam que o cenário externo protegido é o mais agressivo ao avanço da carbonatação, pois combina a disponibilidade de CO_2 atmosférico, umidade favorável e a ausência de saturação prolongada. A temperatura atua como catalisador do processo, especialmente quando a proteção não é eficaz. A chuva, embora necessária para fornecer umidade, quando excessiva, tende a reduzir a taxa média de carbonatação ao bloquear a difusão do CO_2 . Entre as proteções avaliadas, o sistema TAA apresentou desempenho significativamente superior, mantendo a carbonatação próxima de zero e reduzindo a influência das variáveis climáticas. A proteção TPVA apresentou comportamento intermediário, ainda próximo ao do concreto sem proteção, indicando que sua capacidade de mitigação é limitada diante das variações ambientais.

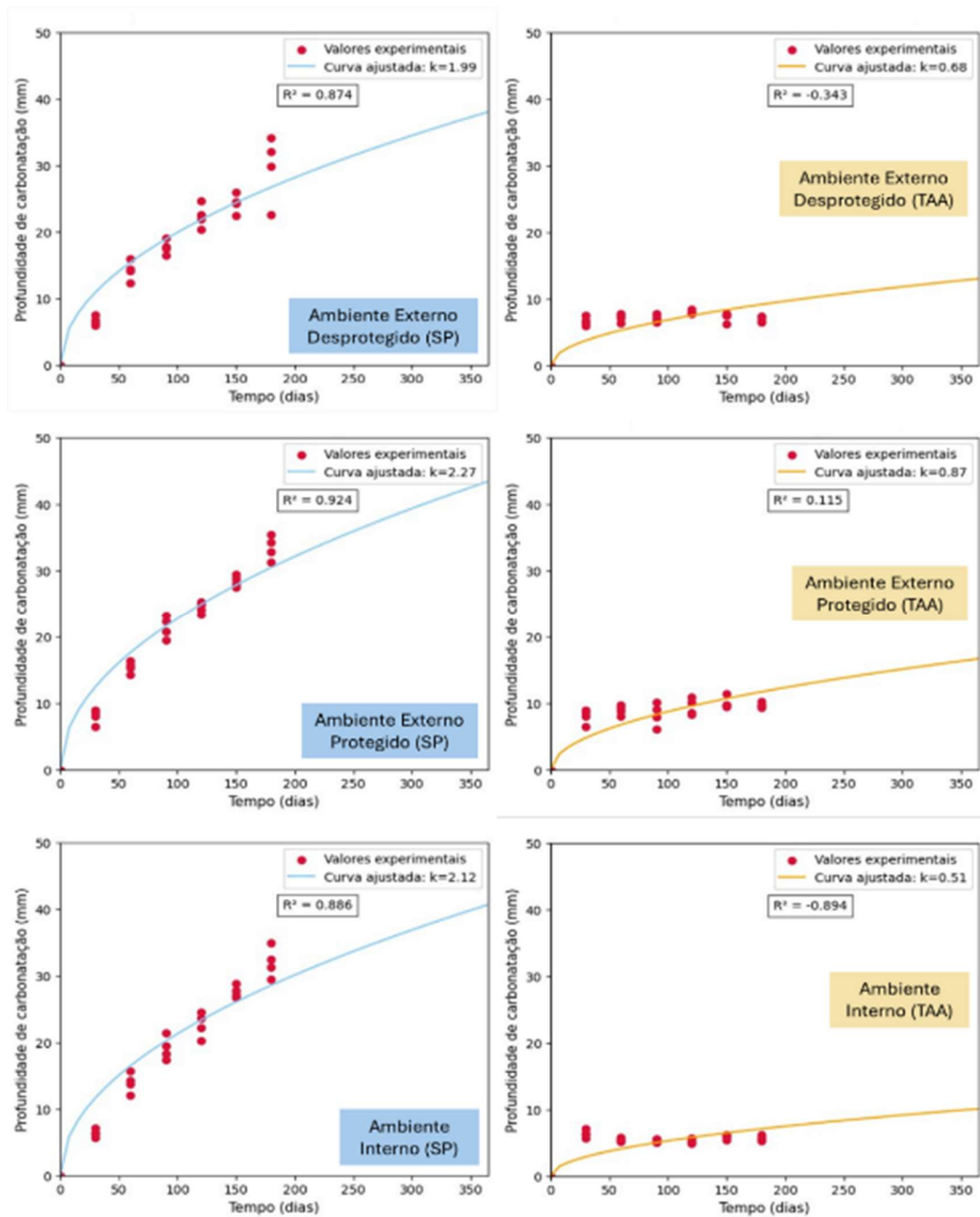
Assim, observa-se que a interação entre parâmetros climáticos e desempenho do sistema de proteção é determinante para o avanço da carbonatação, sendo o controle da exposição ao ambiente externo seco e a escolha adequada da proteção fatores críticos para a durabilidade.

4.2.4 Análise da velocidade de difusão do CO₂

A aplicabilidade do modelo de Tuutti (1982), assim como os demais modelos analíticos dele derivados, pressupõe que a difusão do CO₂ no interior do material cimentício ocorre sem a interposição de barreiras físicas externas, condição que corresponde a elementos expostos diretamente ao ambiente, sem qualquer sistema de proteção superficial. Quando sistemas de revestimento multicamadas são aplicados, a resistência adicional imposta por essas camadas ao transporte do CO₂ não é contemplada pelos parâmetros do modelo, o que pode comprometer a qualidade do ajuste e, conseqüentemente, a confiabilidade das estimativas de vida útil obtidas por essa formulação. Nesse contexto, os resultados a seguir evidenciam essa limitação quantitativamente, com base nos ajustes realizados para cada sistema de proteção e ambiente de exposição avaliados na campanha experimental.

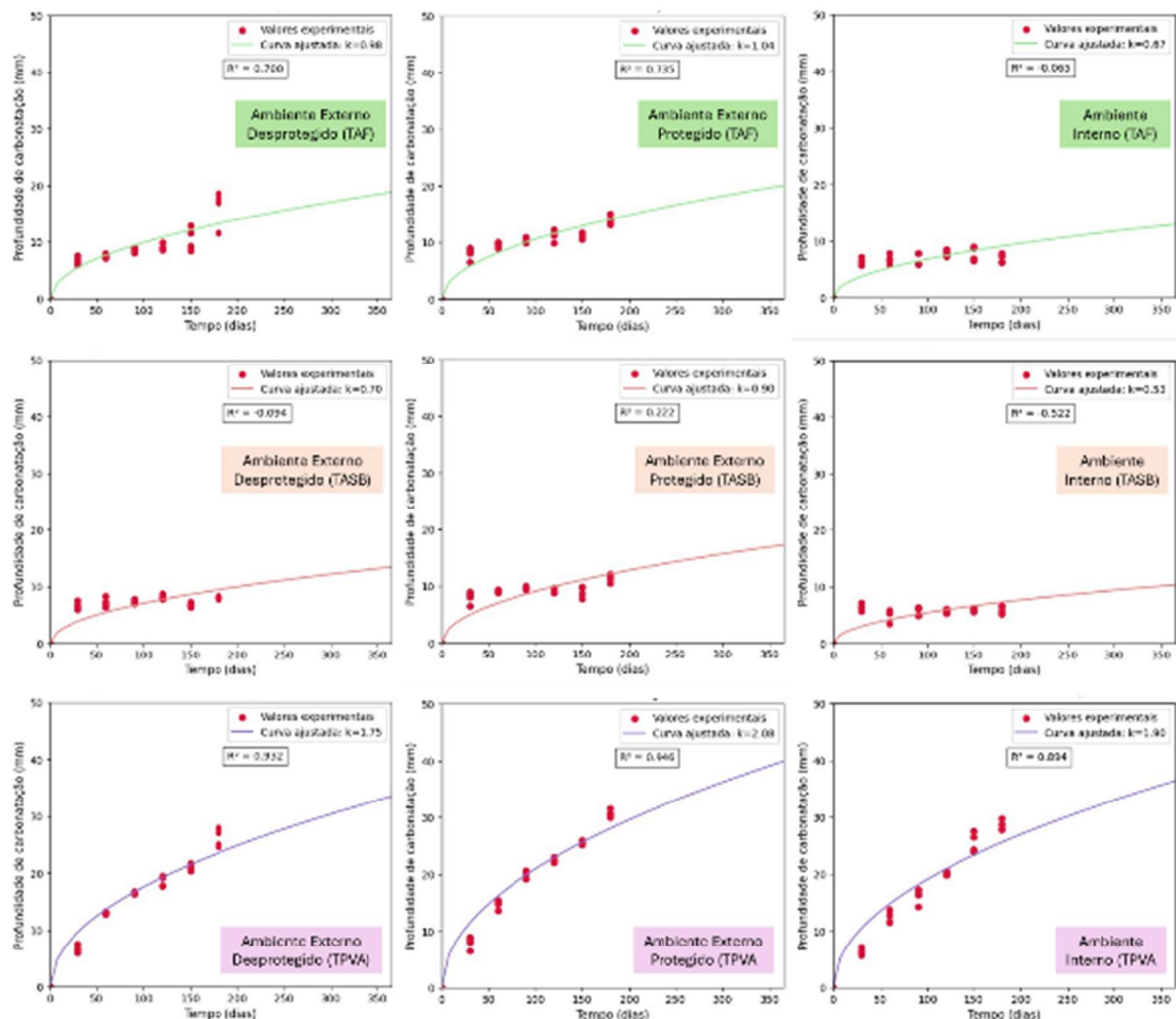
Não obstante as limitações supracitadas, ajustes de curvas foram realizados com base na formulação proposta por Tuutti (1982) (Equação 4), com o objetivo de quantificar comparativamente a velocidade de difusão de CO₂ nos diferentes sistemas avaliados e de evidenciar, de forma experimental, em quais condições o modelo apresenta ou não aderência aos dados observados. Os resultados são apresentados nas Figuras 36 e 37. Os ajustes foram obtidos por meio de um código em Python, considerando diferentes sistemas de proteção superficial e distintos ambientes de exposição. Os gráficos ilustram os valores experimentais (pontos) e as curvas ajustadas pelo método dos mínimos quadrados, permitindo avaliar a adequação do modelo à realidade observada em cada cenário. Além disso, são apresentados os valores das velocidades de difusão (K), expressos em mm/ano^{0.5}, e os respectivos coeficientes de determinação (R²), fornecendo uma medida quantitativa da qualidade dos ajustes e da confiabilidade dos parâmetros estimados.

Figura 36 - Ajuste de curva da velocidade de difusão de CO_2 nos elementos SP e TAA.



Fonte: Própria autoria.

Figura 37 - Ajuste de curva da velocidade de difusão de CO_2 nos elementos TAF, TASB e TPVA.



Fonte: Própria autoria.

Nos elementos de argamassa sem proteção (SP), observa-se que os valores de K são consistentemente elevados em todos os ambientes, com destaque para o ambiente externo protegido ($K = 2,27 \text{ mm/ano}^{0.5}$), seguido pelo ambiente interno ($K = 2,12 \text{ mm/ano}^{0.5}$) e pelo ambiente externo desprotegido ($K = 1,99 \text{ mm/ano}^{0.5}$). Esses resultados refletem a tendência já observada de maior avanço da carbonatação em ambientes protegidos da chuva, onde os poros permanecem mais secos, o que favorece a difusão do CO_2 . Os coeficientes de determinação (R^2) desses ajustes foram elevados, variando entre 0,874 e 0,924, indicando que os modelos de Tuutti (1982) representaram bem o comportamento experimental nesses casos, o que é esperado, uma vez que a ausência de proteção superficial mantém as condições de difusão livre do CO_2 compatíveis com as hipóteses fundamentais da formulação.

Ao analisar os sistemas com proteção superficial, especialmente os revestidos com tinta acrílica acetinada (TAA), verifica-se uma redução significativa nas velocidades de difusão. Os valores de K foram os menores entre todos os sistemas avaliados: $K = 0,68 \text{ mm/ano}^{0.5}$ (ambiente externo desprotegido), $K = 0,87 \text{ mm/ano}^{0.5}$ (ambiente externo protegido) e $K = 0,51 \text{ mm/ano}^{0.5}$ (ambiente interno). No entanto, os valores de R^2 foram muito baixos ou negativos ($R^2 = -0,343; -0,894; 0,115$), evidenciando que o modelo de Tuutti (1982), fundamentado na difusão livre do CO_2 em meio poroso, não é capaz de representar adequadamente o comportamento da frente de carbonatação em sistemas nos quais a barreira superficial impõe resistência adicional ao transporte do agente agressivo. Essa limitação é intrínseca à formulação do modelo, que não incorpora parâmetros relativos à resistência à difusão imposta por revestimentos superficiais. Cabe destacar, contudo, que caso os valores médios de carbonatação obtidos com a TAA fossem empregados no ajuste, a velocidade de difusão estimada pelo modelo tenderia a ser superior à real, configurando uma estimativa conservadora do ponto de vista da segurança estrutural.

Diante da mesma consideração, pode-se dizer que o modelo de Tutti (1982) não permite mapear a velocidade de difusão do CO_2 nos elementos com a aplicação de tintas de base acrílica. A tinta acrílica fosca (TAF), dentre as tintas de base acrílica, foi a única que ainda apresentou boa correção entre as profundidades reais e as mapeadas pelo modelo de Tutti (1982), com velocidades de difusão variando entre $K = 0,98 \text{ mm/ano}^{0.5}$ (ambiente externo desprotegido) $K = 1,04 \text{ mm/ano}^{0.5}$ (ambiente externo protegido) e $K = 0,67 \text{ mm/ano}^{0.5}$ (ambiente interno). Os coeficientes de determinação foram razoáveis nos ambientes externo desprotegido ($R^2 = 0,700$) e protegido ($R^2 = 0,735$), mas negativos no ambiente interno ($R^2 = -0,065$).

Já o sistema com tinta acrílica semibrilho (TASB) apresentou os piores ajustes entre todos os sistemas analisados, com valores de R^2 extremamente baixos ou negativos, principalmente nos ambientes internos ($R^2 = -0,522$) e externos desprotegidos ($R^2 = 0,094$), e valores de K relativamente baixos (entre $0,53$ e $0,90 \text{ mm/ano}^{0.5}$). Esses resultados corroboram a incapacidade do modelo de Tuutti (1982) em descrever o processo difusivo em elementos dotados de revestimentos acrílicos de maior eficiência como barreira ao CO_2 .

A tinta PVA (TPVA), por sua vez, exibiu comportamento compatível com o mapeamento do modelo de Tutti (1982), com valores de K elevados: $K = 1,75 \text{ mm/ano}^{0.5}$ (ambiente externo desprotegido), $K = 2,08 \text{ mm/ano}^{0.5}$ (ambiente externo

protegido) e $K = 1,90 \text{ mm/ano}^{0.5}$ (ambiente interno). Os altos valores de R^2 (entre 0,894 e 0,946) indicam boa adequação do modelo aos dados experimentais, o que, nesse caso, reflete o fato de que a tinta PVA não atuou efetivamente como barreira à penetração do CO_2 , fazendo com que o elemento se comportasse de maneira análoga ao sistema sem proteção (SP), para o qual o modelo foi originalmente concebido.

Comparando os sistemas de proteção em diferentes ambientes, observa-se que os revestimentos acrílicos (TAA, TAF e TASB) apresentaram as maiores reduções no coeficiente K em relação ao sistema sem proteção (SP), com desempenho mais pronunciado nos ambientes interno e externo desprotegido. Em ambientes externos protegidos da chuva, onde a carbonatação tende a ser mais intensa em razão da maior disponibilidade de CO_2 combinada à menor saturação dos poros, os valores de K dos sistemas acrílicos, embora ainda inferiores ao SP, aproximaram-se ligeiramente dos observados sem proteção, indicando que a eficiência da barreira superficial é parcialmente condicionada pelo regime de exposição ambiental. A tinta PVA, por sua vez, apresentou valores elevados de K em todos os ambientes avaliados, confirmando sua ineficiência como sistema de proteção à carbonatação.

A análise das Figuras 36 e 37 mostra que os revestimentos acrílicos, especialmente a tinta acrílica acetinada (TAA), foram os mais eficazes em reduzir a velocidade de carbonatação, apesar da baixa qualidade dos ajustes em alguns ambientes. Os valores de R^2 , embora úteis, embora úteis como indicadores da aderência do modelo aos dados, devem ser interpretados com cautela em sistemas com baixa penetração de CO_2 , nos quais pequenas variações absolutas nas medições experimentais podem comprometer significativamente a qualidade do ajuste. A baixa qualidade dos ajustes nos sistemas acrílicos não invalida os valores de K obtidos, mas reforça a necessidade de desenvolver modelos específicos para elementos com proteção superficial, capazes de incorporar a resistência à difusão imposta pelas diferentes camadas de revestimento. Os elevados valores de K e R^2 observados para os sistemas TPVA e SP evidenciam que a ausência de barreira física eficaz resulta em um comportamento difusivo previsível pela formulação clássica, porém menos desejável do ponto de vista da durabilidade estrutural.

4.3 CONSIDERAÇÕES DO CAPÍTULO

Observou-se que tanto os sistemas de proteção superficial com tintas quanto a aplicação de uma camada de argamassa contribuíram significativamente para mitigar a carbonatação, embora com eficácias distintas em função do tipo de revestimento e do ambiente de exposição. Os revestimentos acrílicos, especialmente o tipo acetinado, apresentaram as menores velocidades de difusão de CO_2 , enquanto a tinta PVA apresentou desempenho semelhante ao da ausência de proteção.

A camada de argamassa também se mostrou eficaz na redução da taxa de avanço da carbonatação, especialmente nas fases iniciais de exposição e em ambientes externos desprotegidos da chuva, reforçando sua aplicabilidade como estratégia complementar de durabilidade em sistemas de revestimento multicamadas.

Verificou-se que o avanço da frente de carbonatação ao longo do período experimental é explicado pela interação entre temperatura, umidade relativa e regime de precipitação, analisados de forma segmentada em função do tempo de exposição. Observou-se que, mesmo em períodos com umidades relativas médias superiores a 70%, ocorreu carbonatação significativa nos corpos de prova, um comportamento associado às variações diárias das condições ambientais e às particularidades microestruturais da argamassa. Os ensaios evidenciaram que ciclos de saturação e secagem, aliados à variação da temperatura, modulam a difusão do CO_2 e a disponibilidade de água nos poros, influenciando diretamente as taxas de carbonatação observadas. Esses resultados corroboram a ideia de que a durabilidade de sistemas cimentícios deve ser avaliada de forma integrada, considerando simultaneamente o desempenho dos revestimentos, as características do elemento cimentício e as condições ambientais de exposição.

5 CONCLUSÕES

De forma geral, verificou-se, qualitativamente, que a presença de revestimentos acrílicos promoveu reduções expressivas na profundidade da frente de carbonatação, enquanto a tinta PVA apresentou comportamento semelhante ao do sistema sem proteção, o que confirma sua baixa eficácia como barreira à difusão de CO_2 .

Do ponto de vista quantitativo, nas camadas de argamassa, aos 180 dias de exposição, os elementos de argamassa sem proteção (SP) atingiram profundidades médias superiores a 30 mm em todos os ambientes analisados. No ambiente externo protegido da chuva, por exemplo, o grupo SP apresentou média de 33,44 mm, enquanto o sistema com tinta acrílica acetinada (TAA) limitou a carbonatação a 9,69 mm, o que representa uma redução aproximada de 71%. A tinta acrílica semibrilho (TASB) apresentou média de 11,34 mm (redução de cerca de 66%), e a acrílica fosca (TAF), de 13,91 mm (redução de cerca de 58%). Em contraste, a tinta PVA (30,62 mm) promoveu redução inferior a 9% em relação ao SP, evidenciando desempenho praticamente equivalente ao da ausência de proteção. No ambiente interno, o comportamento foi semelhante: o grupo SP atingiu 32,01 mm aos 180 dias, enquanto a TAA limitou a profundidade a 5,68 mm, o que corresponde a uma redução de aproximadamente 82%. Já a TPVA apresentou 28,52 mm, uma redução de apenas 11% em relação ao grupo sem proteção.

Os resultados mostraram que os revestimentos acrílicos atuam de forma eficaz como barreira física à difusão de CO_2 , reduzindo a sensibilidade do material às variações ambientais. Isso é corroborado pelas correlações observadas entre parâmetros climáticos e a carbonatação acumulada ao longo de 30 dias. No sistema sem proteção (SP), verificou-se correlação positiva moderada entre a temperatura média e a carbonatação (correlação = 0,53), indicando que o aumento térmico favorece o avanço da frente carbonatada, possivelmente pela aceleração das reações químicas e pela redução da umidade interna dos poros. Com a tinta PVA (TPVA), a correlação também foi moderada (correlação = 0,43), reforçando que esse sistema não impede que o substrato responda às variações térmicas. Já na TAA, a correlação foi fraca ($r = 0,21$), indicando que o revestimento reduziu significativamente a influência da temperatura na frente de carbonatação.

Em relação à precipitação acumulada, embora a análise global indique que a presença de chuva tende a reduzir a carbonatação média, em virtude do bloqueio dos poros pela saturação hídrica, as correlações internas no grupo exposto diretamente à chuva (ambiente externo desprotegido da chuva) apresentaram valores positivos (correlação = 0,34 no sistema SP). Esse resultado sugere que eventos intensos de precipitação, associados a ciclos subsequentes de secagem e temperaturas elevadas, podem criar condições favoráveis à carbonatação localizada. A umidade relativa mostrou-se variável crítica, com maiores profundidades observadas em faixas médias entre 75% e 80%, condição que equilibra a disponibilidade de água para a reação e a permeabilidade ao CO_2 . Em ambientes com saturação prolongada, a difusão gasosa foi restringida, o que reduziu o avanço médio da frente carbonatada.

No caso dos elementos de concreto, a aplicação de uma camada de argamassa de 20 mm resultou em reduções relevantes na profundidade de carbonatação aos 180 dias: 25,63% no ambiente externo desprotegido, 37,61% no ambiente externo protegido e 15,22% no ambiente interno. Ao longo de 365 dias, essas reduções foram de 18,83%, 3,08% e 5,71%, respectivamente, indicando que a eficácia da argamassa é mais pronunciada nas fases iniciais de exposição. Esse comportamento sugere que a camada adicional atua como uma barreira física complementar, mas não impede completamente a progressão difusiva ao longo do tempo.

Considerando o clima da região da campanha experimental, localizada no Vale do Paraíba, em São Paulo, Brasil, os resultados indicam que o ambiente externo protegido da chuva constitui o cenário mais crítico para a carbonatação nas condições avaliadas, combinando disponibilidade contínua de CO_2 e um regime de umidade favorável à difusão. Mas deve-se ter em conta o período avaliado neste estudo (verão-outono), sendo ainda necessário verificar o que acontece no período de inverno-primavera.

Para edificações em ambiente urbano (com concentração de CO_2 superior à de cloretos), conclui-se que a especificação de tintas acrílicas de alto desempenho pode reduzir a profundidade de carbonatação em até 80% nos primeiros 180 dias de exposição. A adoção de camadas de argamassa adequadamente executadas pode reduzir a carbonatação do concreto em 20-30% no primeiro ano. Sendo que sua reaplicação periódica pode prolongar a vida útil do elemento.

Como diretrizes para pesquisas futuras, sugere-se:

- A ampliação do período de monitoramento e a reaplicação da camada de tinta após o envelhecimento natural para avaliar o desempenho a longo prazo dos sistemas de proteção com revestimentos;
- O desenvolvimento de modelos matemáticos de carbonatação que integrem o transporte de CO_2 acoplado a sistemas multicamadas de proteção;
- O desenvolvimento de modelos preditivos da profundidade de carbonatação para argamassas e concretos que incorporem a temperatura e a incidência de chuvas;
- Avaliação do efeito combinado da umidade e temperatura na carbonatação, a fim de verificar se em condições de altas temperaturas, porém com umidade alta a carbonatação será acelerada;
- Avaliar outros sistemas de proteção comumente empregados em elementos estruturais de edifícios do ambiente construído.

Essas abordagens poderão refinar os modelos de avaliação da vida útil e aprimorar as estratégias de proteção de estruturas de concreto armado em ambientes urbanos, proporcionando maior durabilidade a esses elementos.

REFERÊNCIAS

- AL-AMEERI, A. S.; RAFIQ, M. I.; TSILOULOU, O.; RYBDYLOVA, O. Impact of climate change on the carbonation in concrete due to carbon dioxide ingress: experimental investigation and modelling. **Journal of Building Engineering**, Amsterdã, v. 44, p. 102594, 2021.
- AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo: Pini, 2000.
- ANDRADE, C. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1992.
- ANTONIO, I. O. **Avaliação da captura de CO₂ devido à carbonatação de argamassas de revestimento produzidas com RCD**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7175**: cal hidratada para argamassas: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: concreto de cimento portland – preparo, controle, recebimento e aceitação – procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 14037**: diretrizes para elaboração de manuais de uso, operação e manutenção das edificações – requisitos para elaboração e apresentação dos conteúdos. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15079**: tintas para construção civil – especificação dos requisitos mínimos de desempenho de tintas para edificações não industriais – tinta látex nas cores claras. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15575-1**: edificações habitacionais – desempenho – parte 1: requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16372**: Cimento portland e outros materiais em pó – determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine). Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16605**: cimento portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16697**: cimento portland – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16917:** agregado graúdo – determinação da densidade e da absorção de água – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16972:** agregados – determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054:** agregados – determinação da composição granulométrica – método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5674:** manutenção de edificações – requisitos para o sistema de gestão de manutenção. Rio de Janeiro: ABNT, 2024.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739:** concreto – ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118:** projeto de estruturas de concreto. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211:** agregados para concreto – requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

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

BARBOSA, M. C. **Efeito da proteção superficial (pintura imobiliária) na difusão e captura de CO₂ em argamassas de revestimento.** 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021.

BAROGHEL-BOUNY, V.; CAPRA, B.; LAURENS, S. A durabilidade das armaduras e do concreto de cobrimento. *In*: OLLIVIER, J.; VICHOT, A. (ed.). **Durabilidade do concreto:** bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 255–326.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS EN 206:** concrete – specification, performance, production and conformity. London: BSI, 2001.

BOB, C.; AFANA, E. On-site assessment of concrete carbonation. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE FAILURE OF CONCRETE CARBONATION, 1993, Bratislava. **Proceedings** [...]. Bratislava: RILEM, 1993. p. 84-87.

BONFIM, G. **Informações gerais sobre tintas e pintura imobiliária**. São Paulo: ABRAFATI, 2013. Disponível em: <https://abrafati.com.br/informacoes-gerais-sobre-tintas-e-pintura-imobiliaria/>. Acesso em: 15 abr. 2024.

CLIMATEMPO. **Informações gerais sobre meteorologia**. São Paulo: Climatedpo, 2025. Disponível em: <https://smac.climatedpo.io/>. Acesso em: 2 set. 2025.

COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **CEB 238: new approach to durability design – an example for carbonation induced corrosion**. Lausanne: Thomas Telford Ltd., 1997. 152 p.

CHEN, Y.; LIU, P.; YU, Z. Effects of environmental factors on concrete carbonation depth and compressive strength. **Materials**, Basel, v. 11, n. 11, e2167, 2018.

CHINCHÓN-PAYÁ, S.; ANDRADE, C.; CHINCHÓN, S. Indicator of carbonation front in concrete as substitute to phenolphthalein. **Cement and Concrete Research**, Oxford, v. 82, p. 87–91, 2016.

CORNÉLIO, P. G. **Estudo experimental da influência da proteção superficial na durabilidade de estruturas de concreto expostas a cloretos**. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2025.

COSTA, M. R. M. M.; PACHECO, A. P. G. Avaliação do potencial de carbonatação de cales hidratadas em pasta. **Revista Materials**, Rio de Janeiro, v. 23, n. 1, e11970, 2018.

CUNHA, A. C. Q.; HELENE, P. R. L. Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2001. (Boletim Técnico).

DESPOTOU, E.; SHTIZA, A.; SCHLEGEL, T.; VERHELST, F. Literature study on the rate and mechanism of carbonation of lime in mortars. **Mauerwerk**, Berlin v. 20, n. 2, p. 124–137, 2016.

EHE. **Instrucción de hormigón estructural (EHE-08)**. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, 2008.

EKOLU, S. O. Model for practical prediction of natural carbonation in reinforced concrete: part 1 – formulation. **Cement and Concrete Composites**, Amsterdam, v. 86, p. 40–56, fev. 2018.

FALCÃO, I. S.; SANTOS, L. G. **Contribuições ao dimensionamento otimizado de concretos com RCD visando durabilidade e performance mecânica: estudo numérico e validação experimental**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2024.

FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **fib Bulletin 34: model code for service life design**. Lausanne: fib, 2006.

FÉLIX, E. F. **Estudo numérico-experimental da fadiga em concretos submetidos à compressão cíclica**: proposição de um modelo de dano acumulado. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2022.

FELIX, E. F. **Modelagem da deformação do concreto armado devido à formação dos produtos de corrosão**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

FELIX, E. F.; CARRAZEDO, R.; POSSAN, E. Análise paramétrica da carbonatação em estruturas de concreto armado via redes neurais artificiais. **Revista ALCONPAT**, Mérida, v. 7, n. 3, p. 302-316, set. 2017.

FELIX, E. F.; POSSAN, E. Modeling carbonation of concrete structures in the marine environment through artificial neural networks. **IEEE Latin America Transactions**, Piscataway, v. 16, n. 6, p. 1772-1779, jun. 2018.

FERREIRA, M. B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.

FERREIRA, R. M.; JALALI, S. Software for probability-based durability analysis of concrete structures. *In*: **Concrete repair, rehabilitation and retrofitting**. London: Taylor & Francis, 2006.

FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. *In*: ISAIA, G. C. (ed.). **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2, p. 829-855.

FONSECA, G. C. da. **Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil**: uma abordagem epistêmica. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

FONTOLAN, B. L.; SILVA, T. B.; GAVA, G. P.; RIGO, E.; NEVES JUNIOR, A.; POSSAN, E. CO₂ emissions and uptake in rendering mortars: sustainable approach. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 24, e131131, 2024.

GARCÍA-ALONSO, M. C.; ESCUDERO, M. L.; MIRANDA, J. M.; VEGA, M. I.; CAPILLA, F.; CORREIA, M. J.; SALTA, M.; BENNANI, A.; GONZÁLEZ, J. A. Corrosion behaviour of new stainless steels reinforcing bars embedded in concrete. **Cement and Concrete Research**, Amsterdam, v. 37, n. 10, p. 1463-1471, 2007.

HAMADA, M. Neutralization (carbonation) of concrete and corrosion of reinforcing steel. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE CHEMISTRY OF CEMENT, 5., 1968, Tokyo. **Proceedings** [...]. Tokyo: Japan Cement Association, 1969. v. 3, part 3, p. 343–369.

HAN, J.; LIU, W.; WANG, S.; DU, D.; XU, F.; LI, W.; DE SCHUTTER, G. Effects of crack and ITZ and aggregate on carbonation penetration based on 3D micro X-ray CT microstructure evolution. *Construction and Building Materials*, Amsterdam, v. 128, p. 256-271, Dez. 2016.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. Vida útil das estruturas. **Revista ABESC**, São Paulo, v. 1, n. 6, p. 20-23, 1995.

HELENE, P. R. L. **Vida útil das estruturas de concreto**. In: CONGRESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE, 6., 1997, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: CONPAT, 1997.

HOUST, Y. F.; WITTMANN, F. H. Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI-AGGREGATE REACTION IN CONCRETE, 11., 2000, Québec. **Proceedings [...]**. Québec: Centre de Recherche Interuniversitaire sur le Béton, 2000. p. 1923–1930.

HUO, Z.; WANG, L.; HUANG, Y. Predicting carbonation depth of concrete using a hybrid ensemble model. **Journal of Building Engineering**, Amsterdam, v. 76, 107320, out. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2014: synthesis report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/>. Acesso em: 19 ago. 2025.

ISGOR, O. B.; RAZAQPUR, A. G. Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures. **Cement and Concrete Composites**, Amsterdã, v. 26, n. 1, p. 57-73, Jan. 2004.

ISAIA, G. C. Carbonatação do concreto: uma revisão. In: JORNADAS DE TRABALHO SOBRE CARBONATAÇÃO DO CONCRETO, 2., 1999, São José dos Campos. **Anais [...]**. São José dos Campos: Instituto de Pesquisas Científicas e Tecnológicas, 1999. p. 1-15.

KAZMIERCZAK, C. S. **Contribuição para a análise da eficiência de películas aplicadas sobre estruturas de concreto armado com o objetivo de proteção contra a carbonatação**. 1995. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

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

LAVINICKI, B. M. **Proposta de modelo ensemble de aprendizagem de máquina para a predição da profundidade de carbonatação de concretos expostos a condições naturais de degradação**. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2024.

LO, T. Y.; LIAO, W.; WONG, C. K.; TANG, W. Avaliação da resistência à carbonatação do concreto revestido com tinta para edifícios. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 107, p. 299-306, 2016.

LIU, P.; YU, Z.; CHEN, Y. Carbonation depth model and carbonated acceleration rate of concrete under different environment. **Cement and Concrete Composites**, Oxford, v. 114, e103736, Nov. 2020.

LIU, K.; ALAM, M. S.; ZHU, J.; ZHENG, J.; CHI, L. Prediction of carbonation depth for recycled aggregate concrete using ANN hybridized with swarm intelligence algorithms. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 301, e124006, Set. 2021.

LU, C.; LIU, R. Predicting carbonation depth of prestressed concrete under different stress states using artificial neural network. **Advances in Artificial Neural Systems**, New York, v. 2009, art. 193139, 2009.

MARTINS, C. A. C. **Estimativa da profundidade de carbonatação do concreto com o uso de redes neurais**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2011.

MAZURANA, L. **Captura de CO₂ em argamassas de revestimento através da carbonatação natural**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete**: microstructure, properties, and materials. New York: McGraw-Hill, 2014.

MEHTA, P. K. **Concrete technology at the crossroads**: problems and opportunities. *In*: CONCRETE TECHNOLOGY: PAST, PRESENT AND FUTURE, 1994, São Paulo. **Proceedings** [...]. São Paulo: ACI-144, 1994. p. 1-30.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MI, R.; PAN, G.; SHEN, Q. Carbonation modelling for cement-based materials considering influences of aggregate and interfacial transition zone. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 229, e116982, Dez. 2019.

MÜLLER, H. S.; HAIST, M.; VOGEL, M. Assessment of the sustainability potential of concrete and concrete structures considering their environmental impact, performance and lifetime. **Construction and Building Materials**, Amsterdã, v. 67, p. 321-337, fev. 2014.

NEVILLE, A.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre:

Bookman, 2013.

ORTOLAN, T. L. P.; SQUIAVON, J. Z.; ANDRADE, J. J. de O. Análise da carbonatação de argamassas de cimento Portland produzidas com agregados miúdos reciclados de construção e demolição (RCD) através de ensaios de exposição natural. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CONCRETO*, 57., 2015, Bonito. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2015.

PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, Farmington Hills, v. 88, n. 4, p. 363-373, 1991.

PARROTT, L. J. **A review of carbonation in reinforced concrete**. Slough: Cement and Concrete Association, 1987.

PAULETTI, C. **Estimativa da carbonatação natural de materiais cimentícios a partir de ensaios acelerados e de modelos de predição**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

PEDRY, G. R. **Avaliação do efeito da proteção superficial (pintura) na captura de CO₂ devido à carbonatação de argamassas de revestimento**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu, 2020.

PELLIZZER, G. P. **Sobre a modelagem numérica da difusão de cloretos no concreto: uma abordagem pelo método dos elementos de contorno com aplicação de modelos de confiabilidade e otimização**. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.

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

POSSAN, E.; DEMOLINER, C. A. Desempenho, durabilidade e vida útil das edificações: abordagem geral. **Revista técnico-científica do CREA-PR**, Curitiba, n. 1, p. 1-14, 2013.

QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; ÂNGULO, S. C.; GUILGE, M. S.; CAVANI, G. D. R.; CASTRO, A. L. D.; CINCOTTO, M. A. Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 4, p. 175-187, 2009.

RABEHI, M.; MEZGHICHE, B.; GUETTALA, S. Correlation between initial absorption of the cover concrete, the compressive strength and carbonation depth. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 45, p. 123-129, 2013.

RUFATTO, M. E. **Estimativa da captura de CO₂ devido à carbonatação natural de argamassas de revestimento**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso

(Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2019.

SILVA, R. C. S. **Análise da interação estaca inclinada e o solo via combinação MEC/MEF**. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020.

SMOLCZYK, H. G. Physical and chemical phenomena of carbonation. *In*: RILEM COLLOQUIUM ON CARBONATION OF CONCRETE, 1976, Espoo. **Proceedings** [...]. Espoo: RILEM, 1976

STEFFENS, A.; DINKLER, D.; AHRENS, H. Modeling carbonation for corrosion risk prediction of concrete structures. **Cement and Concrete Research**, Amsterdam, v. 32, n. 6, p. 935-941, jun. 2002.

TAFFESE, W. Z.; SISTONEN, E.; PUTTONEN, J. CaPrM: Carbonation prediction model for reinforced concrete using machine learning methods. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 100, p. 70-82, dez. 2015.

TONGARIA, K.; MANDAL, S.; MOHAN, D. A review on carbonation of concrete and its prediction modelling. **Journal of Environmental Nanotechnology**, Coimbatore, v. 7, n. 4, p. 75-90, 2018.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.

VERBECK, G. Carbonation of hydrated Portland cement. *In*: AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **Cement and concrete**. Philadelphia: ASTM, 1958. p. 17-36. (ASTM Special Technical Publication, 205).

VESIKARI, E. **Service life prediction of concrete structures with regard to corrosion of reinforcement**. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 1988. 53 p. (Research Report, 553).

YOUNSI, A.; TURCRY, P.; AÏT-MOKHTAR, A. Quantification of CO₂ uptake of concretes with mineral additions after 10-year natural carbonation. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 349, 131362, mar. 2022.

DADOS CURRICULARES

IDENTIFICAÇÃO	
	CARLOS MANUEL ANDRADE DE SOUSA 13/08/1988
Nacionalidade	brasileira
Nome em citações bibliográficas:	de Sousa, C.M.A
Currículo Lattes	http://lattes.cnpq.br/5786268103833125
ORCID	-
outro identificador	-
FORMAÇÃO ACADÊMICA	
2013/2017	Graduação (Bacharel em Engenharia Civil, bacharel) UNISAL - Centro Universitário Salesiano São Paulo
2020/2022	Especialização (Especialista em Estruturas de concreto e fundações) UNIP - Universidade Paulista
PRODUÇÃO BIBLIOGRÁFICA	
ALMEIDA, T. A. D. C.; FELIX, E. F.; SOUSA, C. M. A. de; PEDROSO, G. O. M.; MOTTA, M. F. B.; PRADO, L. P. Influence of the ANN Hyperparameters on the Forecast Accuracy of RAC's Compressive Strength. Materials, v. 16, n. 24, p. 7683, 2023. FÉLIX, E. F.; CORNELIO, P. G.; SOUSA, C. M. A.; PRADO, L. P.; POSSAN, E. Modelagem da carbonatação acelerada de concretos com cinza de casca de arroz via aprendizado de máquina. In: Encontro Nacional de Aproveitamento de Resíduos na Construção, 8., 2023. Anais [...]. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1-7. SOUSA, C. M. A. de; FERREIRA, M. F. B. M. Reutilização de resíduos sólidos de estação de tratamento de água em misturas com aditivos químicos para base e sub-base de pavimentação. In: REUNIÃO DE PAVIMENTAÇÃO URBANA, 21., 2018, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: Associação Brasileira de Pavimentação, 2018	
PARTICIPAÇÃO EM BANCAS E ORIENTAÇÕES	

Bancas de trabalhos de conclusão
SOBRENOME, N.; SOBRENOME, N.; SOBRENOME, N. Participação em banca de Nome Completo do Aluno. Título do trabalho . 2021. Dissertação (Mestrado em Nome do curso) - Nome da Universidade, Cidade, 2021.
Orientações
-
PARTICIPAÇÃO EM EVENTOS CIENTÍFICOS
SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE PROJETOS EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA, 2., 2017, Lorena. Reutilização de resíduos sólidos de estação de tratamento de água em misturas com aditivos químicos para base e sub-base de pavimentação. 2017. (Simpósio). WORKSHOP DA PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA, 8., 2024, Guaratinguetá. Análise experimental da desp passivação por carbonatação em estruturas de concretos com proteção superficial. 2024. (Workshop). SIMPÓSIO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1., 2025, Lorena. Avaliação experimental da difusão de CO₂ em elementos de concretos com proteção superficial. 2025. (Pôster presencial).