



CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MATHEUS DE SOUZA SILVA

**MODELAGEM DO MECANISMO DE CINÉTICA DO CO₂ NO
PROCESSO DE CARBONATAÇÃO NATURAL DO CONCRETO**

FORTALEZA

2020

MATHEUS DE SOUZA SILVA

**MODELAGEM DO MECANISMO DE CINÉTICA DO CO₂ NO
PROCESSO DE CARBONATAÇÃO NATURAL DO CONCRETO**

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

Orientador: Prof. Me. Davi Valente Santos

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Faculdade Ari de Sá

Gerada automaticamente mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S586m Silva, Matheus.

MODELAGEM DO MECANISMO DE CINÉTICA DO CO₂ NO PROCESSO DE CARBONATAÇÃO
NATURAL DO CONCRETO / Matheus Silva. – 2020.

66 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade Ari de Sá, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza,
2020.

Orientação: Prof. Me. Davi Valente Santos.

1. Carbonatação. 2. Difusão. 3. Modelagem. I. Título.

CDD 620

MATHEUS DE SOUZA SILVA

**MODELAGEM DO MECANISMO DE CINÉTICA DO CO₂ NO PROCESSO DE
CARBONATAÇÃO NATURAL DO CONCRETO**

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

Orientador: Prof. Me. Davi Valente Santos

Aprovada em: 16/12/2020

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Davi Valente Santos
Faculdade Ari de Sá

Prof. Dr. Esequiel Fernandes Teixeira Mesquita
Universidade Federal do Ceará

Prof. Me. Francisca Lílian Brasileiro
Faculdade Ari de Sá

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ter colocado ao longo da caminhada de graduação pessoas que contribuíram para meu crescimento acadêmico e desenvolvimento profissional.

Aos meus pais, que ajudaram com todo o suporte necessário para que meus objetivos fossem realizados.

Ao professor Davi Valente, que contribuiu para o desenvolvimento do trabalho aqui apresentado.

À instituição Ari de Sá, por ter proporcionado uma ótima contribuição na minha formação de engenharia e pelos excelentes docentes lá presentes, em especial, Davi Valente, Lilian Brasileiro, Ésio Magalhães, Jeferson Bões, Anderson Almeida, Julianne Ribeiro, Emmanuelle Sancho e Leonardo Teixeira.

Aos meus amigos que fiz durante desse período, em especial, George Gomes, Jéssica Barroso, Shelldon Rocha, João Medeiros, Wescley Sousa, Davi Lima e Felipe Vasconcelos.

Finalmente ao Professor Esequiel Mesquita, por ter me conduzido ao meio científico e me dado a oportunidade de dar o primeiro passo rumo à ciência da engenharia civil juntamente com o amadurecimento acadêmico contínuo por meio das reuniões e conversações que tivemos que contribuiu e contribui para o meu desenvolvimento.

RESUMO

O uso de modelagens matemáticas para previsão da carbonatação em concreto é considerado um parâmetro de avaliação de durabilidade frente ao ingresso de agentes agressivos por matriz porosa. No entanto essas formulações sofrem limitações por seus dados de entrada não serem facilmente transponíveis para a representação do fenômeno. Modelos mais comuns e aplicáveis assumem que a cinética de ingresso do CO₂ é função da raiz quadrada do tempo por uma constante de difusividade, sem levar em consideração modificações microestruturais de permeabilidade e de formação de sais na matriz porosa no qual desaceleram o processo, fazendo com que as modelagens existentes não representem de forma precisa o avanço da frente carbonatada. Com base em um programa experimental que inclui testes de profundidade de carbonatação em corpos de prova de concreto em condições de exposição natural durante os intervalos de 14, 28, 56 e 84 dias e análises dos termos das equações e de suas condições de contorno, o objetivo desse trabalho é propor um modelo de termo de difusividade capaz de ser empregado em equações existentes e que represente de forma satisfatória o fenômeno. Decorrente ao que foi proposto, é possível descrever que a cinética de penetração do CO₂ pode ser escrita em função da permeabilidade, pressão do dióxido de carbono, área de contato e quantidade de sais de carbonato formados. O termo modelado apresentou variação máxima de 25% em relação aos dados reais obtidos, demonstrando boa representatividade para as condições na qual foi submetido.

Palavras-chave: Carbonatação. Difusão. Modelagem.

ABSTRACT

The use of mathematical modelling for the prediction of carbonation in concrete is considered a parameter for assessing durability against the entry of aggressive agents by porous matrix. However, these formulations suffer limitations because their input data are not easily transposed to represent the phenomenon. Most common and applicable models assume that the kinetics of CO₂ ingress is a function of the square root of time due to a diffusivity finding, without taking into account microstructural modifications of permeability and formation of salts in the porous matrix in which they slow down the process, causing that the existing models do not accurately represent the advance of the carbonated front. Based on an experimental program that includes carbonation depth tests on concrete specimens under conditions of natural exposure during the intervals of 14, 28, 56 and 84 days and analyzes of the terms of the equations and their boundary conditions, the objective of this work is to propose a diffusivity term model capable of being used in existing equations and that satisfactorily represents the phenomenon. Due to what was proposed, it is possible to describe that the penetration kinetics of CO₂ can be written as a function of permeability, carbon dioxide pressure, contact area and amount of carbonate salts formed. The modelled term showed a maximum variation of 25% in relation to the actual data obtained, showing good representativeness for the conditions in which it was submitted.

Keywords: Carbonation. Diffusion. Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Crescimento da concentração de CO ₂	1
Figura 2 - Probabilidade de risco.....	3
Figura 3 - Ação da água na estrutura porosa	9
Figura 4 - Valores ótimos de umidade relativa	9
Figura 5 - Variação da profundidade de carbonatação em função do teor de adições e da resistência à compressão.....	11
Figura 6 - Variação da profundidade de carbonatação em relação a variação a/c....	12
Figura 7 - Relação entre o avanço da carbonatação e a diminuição da porosidade .	13
Figura 8 - Representação da microestrutura do concreto	15
Figura 9 - Distribuição granulométrica dos agregados	24
Figura 10 - Marcação para medição.....	25
Figura 11 - Medição da profundidade de carbonatação	25
Figura 12 - Fluxograma das atividades	27
Figura 13 - Comportamento gráfico dos dados reais	43
Figura 14 - Crescimento hipotético da carbonatação	43
Figura 15 - Frente de carbonatação vista por microscópio	44
Figura 16 - Comportamento gráfico do termo difusivo	44
Figura 17 - Comparação dos dados reais e modelos empregados	45
Figura 18 - Variação das modelagens em relação aos dados reais	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Concentrações de CO ₂ por ambiente	8
Tabela 2 - Valores para umidade	18
Tabela 3 - Valores para concentração de CO ₂	18
Tabela 4 - Valores para tipo de cimento	18
Tabela 5 - Coeficientes do modelo (a) das características do concreto e das condições ambientais	19
Tabela 6 - Coeficientes do modelo (b) das condições de exposição	20
Tabela 7 - Atividades da metodologia	23
Tabela 8 - Consumo em kg/m ³ dos materiais utilizados para a fabricação das amostras.....	24
Tabela 9 - Valores médios das intempéries	26
Tabela 10 - Termos das modelagens.....	29
Tabela 11 - Profundidade de carbonatação 14 dias	39
Tabela 12 - Profundidade de carbonatação 28 dias	40
Tabela 13 - Profundidade de carbonatação 56 dias	41
Tabela 14 - Profundidade de carbonatação 84 dias	42
Tabela 15 - Valores discriminados de difusão	45

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 DURABILIDADE	4
2.2 PROCESSO DE CARBONATAÇÃO	6
2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A CARBONATAÇÃO	7
2.3.1 Concentração de CO ₂	7
2.3.2 Umidade relativo do ar	8
2.3.3 Temperatura	9
2.3.4 Cimento	10
2.3.5 Relação água/cimento e resistência a compressão	11
2.4 FATORES DINÂMICOS AO PROCESSO DE CARBONATAÇÃO	12
2.4.1 Modificações microestruturais	12
2.4.2 Cura do concreto	14
2.4.3 Agregados empregados	14
2.4.4 Condições meteorológicas	15
2.4 MODELAGENS DE PREDIÇÃO	16
2.5 VARIAÇÃO E CONFIABILIDADE DOS RESULTADOS	21
3 METODOLOGIA	23
3.1 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS	23
3.2 MENSURAÇÃO DA CARBONATAÇÃO	24
3.3 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE	26
3.4 VERIFICAÇÃO DOS DADOS	26
3.5 MODELAGEM	28
4 RESULTADOS E DISCUÇÕES	29
4.1 ETAPA 1 – ANÁLISE DOS ARRANJOS MATEMÁTICOS	29
4.2 ETAPA 2 – RELAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA NA FORMAÇÃO DO PARÂMETRO	30
4.2.1 Coeficiente de difusão do CO ₂	30
4.2.2 Porosidade	31
4.2.3 Pressão do CO ₂	32
4.2.4 Grau de absorção do CO ₂	34
4.2.5 Área de contato	35
4.3 ETAPA 3 – AJUSTES E CONDIÇÕES DE CONTORNO	36
4.3.1 Resistência a compressão	37
4.3.2 Ajustes	38

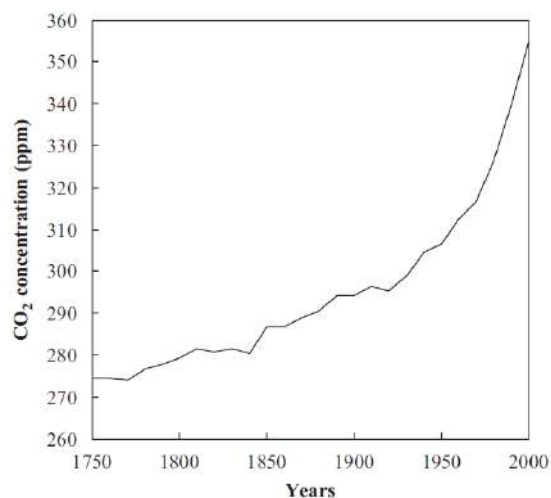
4.4 ETAPA 4 – CORRELAÇÃO COM OS DADOS REAIS OBTIDOS DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	38
5 CONCLUSÃO.....	47
REFERENCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

O aumento da urbanização das cidades está atrelado ao crescimento de obras civis e, conseqüentemente, o maior consumo de cimento para a construção de estruturas de concreto. Essa tendência se tornou mais aparente no Brasil em meados dos anos 50 decorrente ao êxodo rural, acompanhando da presença de indústrias e maiores fluxos viários.

Tal cenário reflete um crescimento significativo da emissão de gases de dióxido de carbono, tendo aumento contínuo desde a década de 70, provenientes em especial do consumo de cimento, que fez com que as concentrações do gás na atmosfera urbana aumentassem cerca de 25% em relação a século passado (YOON; ÇOPUROĞLU; PARK, 2007). Para os pesquisadores, esse fenômeno não se restringe apenas ao território brasileiro, pois há um aumento gradual de 0,5% ao ano da concentração do CO₂ no ambiente em escala global, como demonstra a figura 1.

Figura 1 - Crescimento da concentração de CO₂



Fonte: Yoon; Çopuroglu; Park (2007)

Essa geração de gás carbônico tem relação direta com a estabilidade das edificações, visto que parte do CO₂ presente no ambiente é absorvido pela via porosa do concreto, caracterizando o processo de carbonatação. Esse processo faz com que as estruturas de concreto tenham sua durabilidade afetada pela redução do pH e pelo condicionamento ao processo de corrosão das armaduras, por meio das reações provenientes entre o dióxido de carbono e os materiais alcalinos do cimento. Desse

modo existirá uma implicação entre a concentração de CO₂ e a durabilidade das edificações em relação a penetração desses agentes.

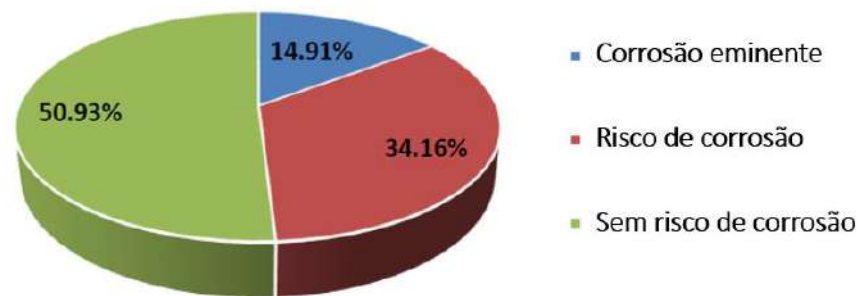
Essa relação afeta significativamente os valores destinados à manutenção e conservação das estruturas, que tem por objetivo garantir que as construções de concreto atinjam a vida útil estimada em projeto. Uma vez que os efeitos ocasionados pelas reações geram envelhecimento precoce e, conseqüentemente, faz com que as edificações necessitem de manutenções constantes para atingir o desempenho estimada.

Com o intuito de monitorar a saúde das estruturas mediante ao avanço do processo de carbonatação, muitos pesquisadores descreveram por métodos matemáticos o mecanismo de avanço do CO₂ para o interior do concreto a partir de características do ambiente e do traço do concreto, podendo assim descrever por meios numéricos o tempo estimado para a ocorrência do efeito patológico. Contribuindo com a melhoria dos resultados de manutenção, visto que a eficiência de um reparo se dá pela identificação e o grau de ação de certa manifestação patológica.

No entanto algumas modelagens propostas não apresentam adequação aos resultados reais fazendo com que os valores resultantes das equações de predição possibilitem diagnósticos imprecisos, não representando a realidade das ocorrências do fenômeno.

Sabendo que o avanço da carbonatação pode promover ambiente propício para corrosão, a identificação dos dados está atrelada diretamente com a tomada de decisão de intervenção, visto que o custo anual estimado para o tratamento de estruturas sob esse efeito excede 3 a 4% do valor do produto interno bruto de países industrializados (SCHMITT, G. A., ET AL., 2009; TAFSESE, W. & SISTONEN, E., 2017), sendo que a possibilidade de corrosão por carbonatação é de 34% do total das ocorrências do fenômeno (BENÍTEZ et al., 2018), como é demonstrando na figura 2.

Figura 2 - Probabilidade de risco



Fonte: Benítez et al. (2018)

Desse modo, com o objetivo de promover resultados mais precisos em relação a frente carbonatada, esse trabalho visa entender o comportamento do fenômeno de cinética do CO₂ pela matriz porosa do concreto e analisar como fatores dinâmicos em relação ao tempo, como diferença de permeabilidade, poro pressão, quantidade de material carbonatável e área de contato, influenciam nos valores estimados de carbonatação.

A análise realizada possibilitará propor um termo de difusividade a partir dos fatores citados, no qual será analisado junto aos resultados reais para avaliar sua eficiência. O termo de difusividade bem empregado contribuirá para a previsão de vida útil das estruturas de concreto pois o transporte de gás por via porosa é considerado um bom indicador de durabilidade de materiais cimentícios frente a ataques químicos (BANTHIA; BIPARVA; MINDESS, 2005).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DURABILIDADE

Toda e qualquer estrutura de concreto está sujeita a reações com o meio na qual está inserido (NEPOMUCENO, 1992), como variações de temperatura, umidade e presença de agentes agressivos do ar. Esses fatores combinados facilitam o ingresso desses agentes pela matriz porosa do concreto, possibilitando reações deletérias que interferem no desempenho estrutural (MEHTA, P.K.; MONTEIRO, J.M., 2006), nos quais contribuem para o envelhecimento precoce das construções em concreto, fazendo com que níveis de deterioração de edificações seja maiores que aos previstos (MEDEIROS, 2011).

Como a cinética de fluidos acontecem na matriz porosa e que as reações promovem modificações microestruturais, como é o caso da carbonatação (PARK, 2008; SONG; KWON, 2007), analisar os fenômenos deletérios que são promovidos nessa esfera se mostra importante no ponto de vista da durabilidade frente a ataques químicos (DÍAZ-DÍAZ et al., 2013). Visto que o desempenho de materiais cimentícios é determinada pela sua capacidade de transporte de agentes deletérios (HALL; HOFF, 2009), pois a permeabilidade a gás é considerada um indicador confiável para avaliar a durabilidade do concreto (BANTHIA; BIPARVA; MINDESS, 2005).

Tendo em vista que as construções em concreto no Brasil se iniciaram a partir da década de 50, as tecnologias voltadas para o comportamento estrutural ainda eram incipientes. Com isso, as avaliações das características do concreto eram muito subjetivas e comandadas pelo bom senso e experiência do profissional (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011) ou meramente mecânicas, baseadas em resultados joviais apresentados pelos ensaios de resistência compressão dos corpos de prova, sem que haja nenhum conhecimento do comportamento estrutural ao longo do seu envelhecimento (ANDRADE; SILVA, 2008).

A norma NBR 6118 (ABNT, 2014), descreve durabilidade como a capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante. Já para Sarja e Vesikari (1994), o termo em questão é definido como a capacidade de um edifício, componente, estrutura ou produto manter um desempenho mínimo em um determinado tempo, sob a influência de agentes agressivos. É interessante notar que das duas definições apenas uma

delas trata do termo “tempo” que é de extrema importância, pois os mecanismos de degradação atuam de forma gradativa, na qual a ausência do fator tempo faz com que a durabilidade frente a penetração de agentes agressivos não possa ser quantificada.

Dentro do contexto de crescimento das cidades, intensificado nos anos 70, houve um acompanhamento de construções vertiginosas, que, por falta de padrões estabelecidos de durabilidade, resultam, nos dias atuais, em uma crescente necessidade de intervenções e recuperações. Visto que a substituição no sistema estrutural das edificações é inviável, se faz necessário investigar e propor metodologias voltadas para a previsão da durabilidade das construções de concreto em relação a fenômenos deletérios (GULIKERS, 2019; MOLIN; MASUERO; POSSAN, 2016).

O emprego de medidas preventivas orientadas por metodologias de análises dos avanços de efeitos degradantes estruturais podem ser viavelmente econômicas para a conservação do tempo de serviço das estruturas frente a medidas corretivas que podem apresentar valores elevados de até 125 vezes maiores que os empregados em medidas tomadas em fase de projeto (SALES et al., 2014).

As degradações por penetração de agentes agressivos são intensificadas por uma série de fatores como má execução e baixa qualidade dos materiais empregados, tendo influência direta nos custos de operação de manutenção e reparo, uma vez que altos graus de deterioração podem levar a valores de até 35% a 40% em relação ao custo total do empreendimento (GARCÍA-ALONSO et al., 2007; MEHTA; MONTEIRO, 2008; MOLIN; MASUERO; POSSAN, 2016).

Sendo que, o fenômeno que mais contribui para o envelhecimento das edificações é processo de corrosão, que representa o efeito patológico com maiores ocorrências em estruturas (KARI, O. P., PUTTONEN, J., SKANTZ, E., 2014), podendo representar de 14% a 64% dos casos (ARANHA, 1994).

Logo, devem ser adotadas técnicas que contribuam para o monitoramento e controle durante o tempo de serviço das estruturas (ELLINGWOOD, B. R., FRANGOPOL, D. M., 2016), nos quais enfatizem o mecanismo de transporte de gases agressivos por meio poroso, para que seja entendível como se caracteriza os mecanismos de transporte dos agentes agressivos, em especial o CO₂, devido sua contribuição no processo corrosivo.

Desse modo, modelos preditivos numéricos foram desenvolvidos a partir da formulação de (TUUTTI, 1982) nos quais possibilitam prever a penetração do CO₂,

carbonatação, a partir da associação da idade da estrutura com o mecanismo de transporte, viabilizando a avaliação da vida útil em anos e não mais em critérios qualitativos (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

2.2 PROCESSO DE CARBONATAÇÃO

O processo de carbonatação é entendido como a reação físico-química do dióxido de carbono (CO_2) proveniente da atmosfera que, em condições naturais, apresenta concentrações em torno de 0,03% a 1% (PAULETTI; POSSAN; MOLIN, 2007) com os materiais alcalinos do concreto, como o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que carbonata em maior grau, e o aluminossilicato de cálcio hidratado, que carbonata em menor grau (P. WOYCIECHOWSKI, 2013). Outros componentes reagem no processo, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que devido à baixa solubilidade, precipita dentro os poros (Y. FANG, J. CHANG., 2015).

A reação acontece por meio da difusão do gás na matriz poroso do concreto, na qual o dióxido de carbono reage primeiramente com a água presente no interior dos poros para em seguida reagir com os materiais alcalinos. O produto final da reação é a formação de sais de carbonato de cálcio (CaCO_3) insolúvel em água e outros carbonatos em quantidades insignificantes (YLMÉN; JÄGLID, 2013), sendo a formação dos sais diretamente proporcional ao conteúdo de portlandita (HYVERT, 2009).

A diminuição do pH do concreto de 12,6 para valores inferiores a 9, ocasionando ambiente menos alcalino, promove o rompimento da película passivadora das armaduras, mecanismo de proteção química das armaduras, e conseqüentemente a o processo corrosivo (KÖLIÖ et al., 2017; PAPADAKIS; FARDIS; VAYENAS, 1992). Sendo que as fontes primárias do agente agressivo são representadas por 90% referente a emissões do efeito estufa ocasionada por combustíveis fósseis e 5% proveniente da produção de cimento (C. LE QUERE ET AL., 2014; KIM et al., 2017). O efeito da carbonatação é predominante em áreas urbanas, aumentando progressivamente a medida que se distancia da costa, pois a alta umidade do ar resulta na absorção do gás pela água do mar (S.-H. HAN, W.-S. PARK, E.-I. YANG, 2013).

As características afetadas do concreto no processo de carbonatação são inicialmente de cunho químico, como a redução do pH proveniente do consumo dos

materiais alcalinos, fazendo com que as variações das propriedades do concreto sejam visíveis apenas quando a concentração de CO₂ está alta (KOBAYASHI; SUZUKI; UNO, 1994).

2.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A CARBONATAÇÃO

O progresso do agente agressivo na matriz porosa é influenciado por alguns fatores que são classificados como internos e externos. Os principais fatores externos são: concentração de CO₂ no ambiente, umidade relativa do ar e temperatura, já para os fatores internos destaca-se o tipo de cimento empregado no traço, relação água cimento (a/c) e resistência a compressão (FELIX, 2015). Esses termos também podem ser classificados como estáticos, pois são coletados antes que o fenômeno aconteça ou em dado momento residual, fazendo com que os dados de entrada não apresentem variação dinâmica em relação ao tempo. Esses serão discutidos na sequência.

2.3.1 Concentração de CO₂

Sabendo que existirá uma reação entre os compostos hidratados presentes na matriz porosa do concreto com o CO₂ presente na atmosfera, a velocidade efetiva, assim como o ingresso do agente agressivo, será intensificada pela concentração do dióxido de carbono no ambiente, fazendo com que quanto maior for a concentração maior será a velocidade de penetração (CARMONA, 2005).

A concentração do gás no ambiente é intensificada pelo grau de poluição, ou seja, para áreas menos urbanizadas ou valores serão inferiores em contraste com áreas mais urbanizadas, nas quais é estabelecido para ambiente urbano valores em torno de 0,04% variando até 0,3% para áreas industriais (D. VAN GEMERT, 2012). Sendo que nesse ambiente os locais de maior concentração são de grande tráfego de veículos, ambientes internos de garagens e ambientes que existem queima de combustíveis fósseis (MARTINS, C. A. C., 2011).

Saetta e Vitaliani (2004) propõem parâmetros de concentração do gás para diferentes condições, apresentando uma tabela com valores em percentual de CO₂ por ambiente, como é demonstrado na tabela 1.

Tabela 1 - Concentrações de CO₂ por ambiente

Concentração de CO₂	
Ambiente	Concentração (%)
Campo aberto	0,015%
Centro urbano	0,036%
Zona industrial	0,045%
Estábulo Ventilado	0,046%
Estábulo	0,075%
Exaustão veículo motorizado	16,69%
Respiração humana	3,62%

Fonte: SAETTA A. V.; VITALIANI, (2004)

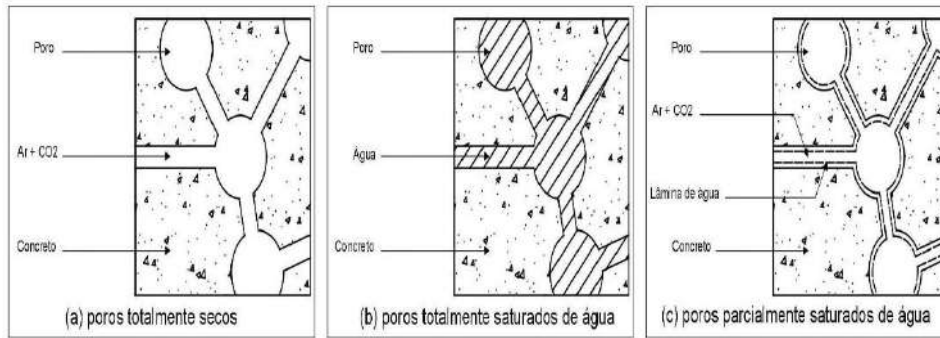
2.3.2 Umidade relativo do ar

A umidade relativa do ar apresenta grande influência no processo de carbonatação por ser responsável pela contribuição da difusividade e transporte do dióxido de carbono para o interior do concreto (SATO; AGOPYAN, 1998). É necessária uma quantidade significativa de água para que o gás possa reagir com os demais reagentes.

No entanto o aumento da umidade relativa não tem direta proporcionalidade para o avanço da carbonatação, pois a reação depende de condições ótimas de umidade, ou seja, caso os valores sejam muito baixos é considerado que os poros são secos e o dióxido de carbono continuará no estado gasoso sem reagir com os álcalis do concreto. Caso os valores sejam muito elevados existirá uma saturação dos poros por água impossibilitando o processo de difusão (SILVA et al., 2019c), conforme é demonstrado pela figura 3.

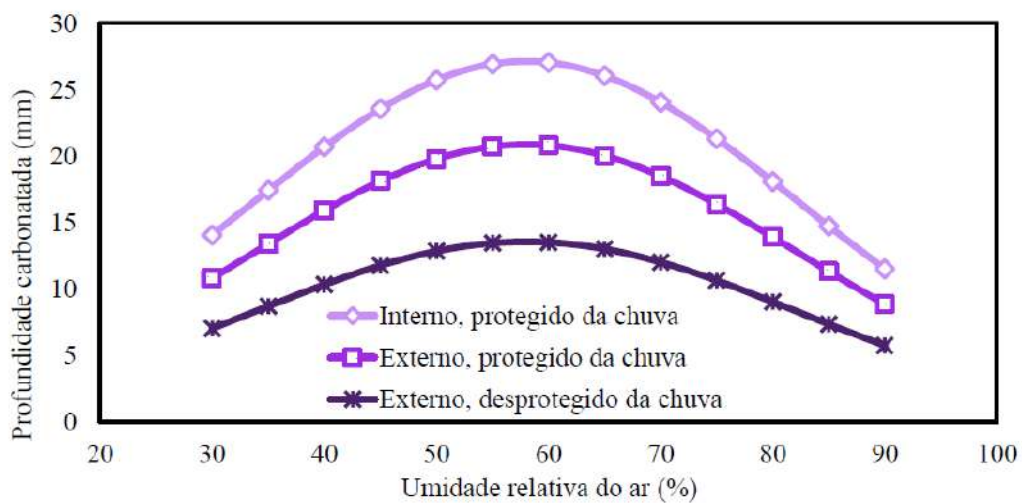
Desse modo vários pesquisadores estipularam intervalos de umidade ótima para o processo de carbonatação, sendo que esses valores podem ser compreendidos entre o intervalo de 50 a 80% (POSSAN, 2010), conforme é descrito na figura 4.

Figura 3 - Ação da água na estrutura porosa



Fonte: Silva, et al., (2019)

Figura 4 - Valores ótimos de umidade relativa



Fonte: Possan (2010)

2.3.3 Temperatura

A temperatura está diretamente ligada com a umidade relativa do ar, podendo promover velocidade da solubilidade de agentes no interior dos poros (DHEILLY et al., 2002), uma vez que o aumento moderado da temperatura possibilita maior mobilidade molecular, acelerando a reação entre os compósitos, em contrapartida com temperaturas que excedem essas condições e acarretam a evaporação da quantidade necessária de água para a dissolução do gás, fazendo com que o processo de carbonatação seja dificultado ou impedido quando atinge temperatura acima de 60° C (LIU, L.; HA, J.; HASHIDA, T.; TERAMURA, 2001).

Já para condições de decréscimos de temperatura ocorrerá congelamento dos líquidos presentes no interior dos poros impedindo o mecanismo de transporte do agente agressivo (TUUTTI, 1982). No entanto as variações de temperatura não exercem influência significativa sob condições ambientais usuais (POSSAN, 2004),

sendo esses valores de temperaturas usuais compreendidos entre 20 e 40 graus (PAPADAKIS, 1991). Logo a temperatura estará atrelada em favorecer a umidade ótima para o transporte do CO₂ na matriz porosa.

Todavia a temperatura também está atrelada com a taxa de transporte dos gases, ou seja, a intensidade da difusão do CO₂ nos poros do concreto é dependente da temperatura, como é descrito pela equação de Arrhenius (FELIX, 2018). A equação 1 descreve a formulação de Arrhenius.

$$k = Ae^{-Ea/RT} \quad (1)$$

Onde

K: Taxa de transporte do CO₂;

A: Constante;

Ea: Energia de ativação para difusão (J/mol).

R: Constante dos gases (J/K mol);

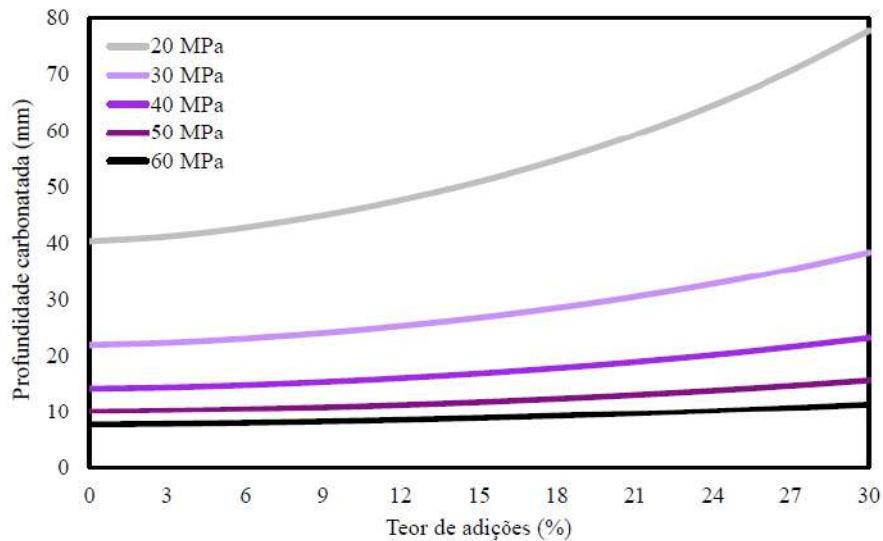
T: temperatura (K).

2.3.4 Cimento

Outro fator influenciador do avanço da carbonatação é o tipo de cimento empregado, uma vez que cimentos sem adição como (CP I) e (CP V) tendem a ter maior resistência ao ingresso do CO₂ do que cimentos com adições, como (PC III) e (PC IV) (GRUYAERT E, VAN DEN HEEDE P, DE BELIE N., 2013), demonstrando inversa proporcionalidade entre a reserva alcalina e a frente carbonatada (POSSAN; FELIX; THOMAZ, 2016).

Entretanto para concretos com elevados valores de resistência a compressão a influência do tipo de cimento se apresenta de forma secundária, ou seja a medida que a resistência a compressão aumenta o teor de adições deixa de influenciar na profundidade de carbonatação (KULAKOWSKI, M. P., PEREIRA, F. M., DAL MOLIN, D. C. C., 2009). Para concretos com valores de compressão superiores a 40 MPa as adições exercem influência insignificante, como é representado graficamente pela figura 5 (E. F. FÉLIX, 2017).

Figura 5 - Variação da profundidade de carbonatação em função do teor de adições e da resistência à compressão



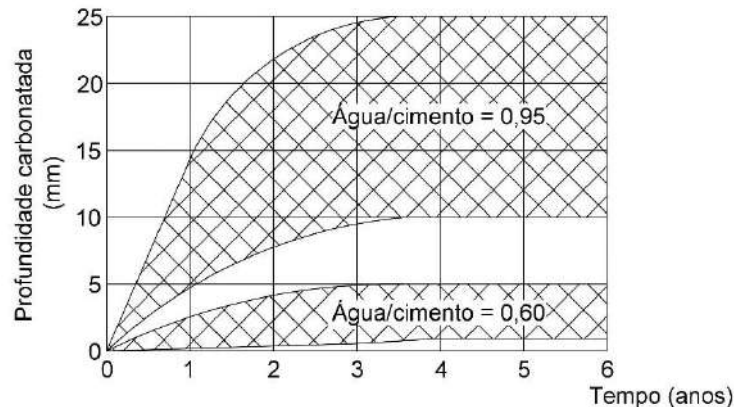
Fonte: Félix (2017)

2.3.5 Relação água/cimento e resistência a compressão

A relação a/c e a resistência a compressão do concreto são fatores que trabalham de forma conjunta, pois as taxas de água empregadas no traço produzem concretos com diferentes resistências mecânicas a depender da quantidade, sendo a relação a/c inversamente proporcional a resistência do concreto (FELIX, 2015).

Outra implicação em relação a esses fatores é que a quantidade de água empregada influencia na porosidade total do concreto, aumentando ou diminuindo a facilidade com que o CO_2 penetra no concreto com o decorrer do tempo, sendo que a produção de concretos com reduzidos valores para a relação a/c permite que as partículas de cimento fiquem mais próximas umas das outras na pasta fresca gerando melhor refinamento dos poros durante a cura (FELIX, 2015). Helene (1999 *apud* SALES et al., 2014) propôs diferentes velocidades de carbonatação para diferentes quantidades de água empregada no traço de concreto conforme a figura 6 demonstrada.

Figura 6 - Variação da profundidade de carbonatação em relação a variação a/c



Fonte: Helene (1999)

2.4 FATORES DINÂMICOS AO PROCESSO DE CARBONATAÇÃO

Ao passo que o avanço de carbonatação progride, existirá modificações promovidas pelo fenômeno que dificultarão ou favorecerão o avanço do agente pela matriz porosa. Tais fatores não são previstos pelas modelagens simples e são responsáveis por parte das inconsistências apresentadas pelas equações determinísticas (RIGO; OLIVEIRA; POSSAN, 2018), sendo elas fatores físico-químico, parâmetros de interação entre o ambiente externo com o ambiente interno do concreto e variações em relação as metodologias de predição (VON GREVE-DIERFELD et al., 2020).

Desse modo, para um melhor entendimento do fenômeno de penetração do CO₂ para o interior do concreto é descrito a seguir demais fatores que alteram a velocidade do avanço da frente carbonatada ao longo do tempo.

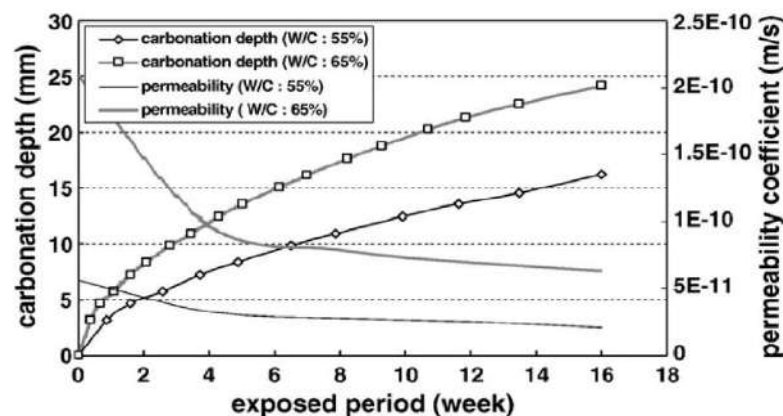
2.4.1 Modificações microestruturais

O ingresso de CO₂ na matriz porosa promove modificações microestruturas no concreto devido à diferença no volume sólido molar dos hidratos e nas fases carbonatadas (SHAH et al., 2018), como o entupimento dos capilares, provendo a diminuição da permeabilidade (NEVILLE, 1997), por conta dos sais de carbonato de cálcio formados pela reação de carbonatação (PHAM; PRINCE, 2014) que apresentam dimensão entre 11% a 14% maiores que os compostos de hidróxido de

cálcio (LAGERBLAD, 2005; MORANDEAU; THIÉRY; DANGLA, 2014), possibilitando a formação de microfissuras, denominadas de microcracking.

O processo de corrosão ocasionado por carbonatação é caracterizado pela presença de fissuras (ROY; POH; NORTHWOOD, 1999) que podem chegar a valores médios de craqueamento microestrutural na ordem de 10-15 μm (AUROY et al., 2015), sendo esse efeito dependente da composição mineralógica empregada na produção do traço, no qual dificulta a retenção de água na matriz porosa (AUROY et al., 2015), demonstrando relação inversamente proporcional entre o avanço do dióxido de carbono e a permeabilidade como defende (SONG; KWON, 2007), representada graficamente pela figura 7.

Figura 7 - Relação entre o avanço da carbonatação e a diminuição da porosidade



Fonte: Song e Kwon (2007)

Contudo as modificações promovidas pelo ingresso do CO_2 são um tanto controversas, pois para concretos produzidos com cimentos sem adição apresentam uma microestrutura mais densa, em contraste com o aumento significativo da permeabilidade para concretos produzidos com cimento adicionados de cinzas e escória (BORGES et al., 2010). Tal aumento da porosidade pode ser justificado pela formação de sílica gel amorfa produzida pela lixiviação de íons de cálcio de C-S-H, quando existe mais a presença de silicato de cálcio hidratado do que de hidróxido de cálcio, tal efeito reduz o volume dos sólidos e é denominado como retração da carbonatação (BORGES et al., 2010). Já a diminuição da porosidade pode ser justificada e limitada quando existe um aumento do volume dos sólidos até o estágio

em que a portlandita carbonata, e depois disso o volume sólido começa a diminuir (SHAH et al., 2018).

Desse modo é possível perceber que o ingresso do dióxido de carbono no concreto promove modificações na microestrutura porosa, que afeta diretamente o comportamento do avanço do agente agressivo em relação ao tempo, ou seja, as afirmações propostas por (MALTE A. PETER, ADRIAN MUNTEAN, SEBASTIAN A. MEIER, 2005) que defende a ideia de porosidade constante durante o curso de carbonatação está devidamente equivocada.

2.4.2 Cura do concreto

Outro fator que tem significativa influência nas modificações microestruturais do concreto é processo de cura, pois o avanço do CO₂ tem menos influencia quando o tempo de cura aumenta (DAS et al., 2012), visto que a cura do concreto pode trazer diferenças de até ± 2 mm sob a frente de carbonatação, pois esse fator promove o refinamento dos poros e, conseqüentemente desaceleração no avanço da carbonatação (KIM et al., 2017). Para concretos produzidos com cimentos que não contenham mais de 30% de cinzas volantes ou 50% de escória, um curto espaço de tempo, como três dias, é suficiente para estabilizar o comportamento da frente de carbonatação (EKOLU, 2016).

Outros fatores são atrelados a resistência a carbonatação atribuída ao efeito de cura como a velocidade do vento e o tempo de exposição a luz solar que a estrutura está submetida, no entanto tais efeitos não podem ser mensurados matematicamente, pois não se sabe o grau de influência direta desses efeitos, visto que eles agem de forma secundária pelo efeito da cura.

2.4.3 Agregados empregados

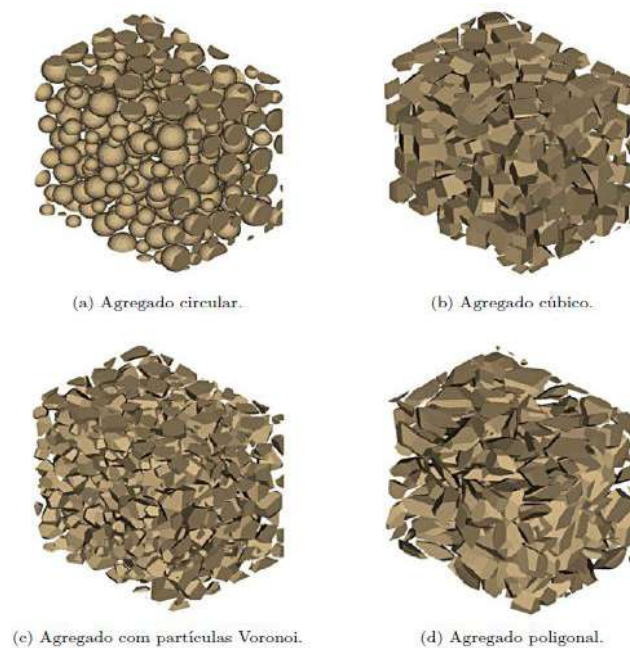
Em função da influência atribuída para a relação água cimento e a resistência a compressão sob o avanço da carbonatação, há certa implicação dos agregados do concreto na frente carbonatada, especificamente, a fração volumétrica e a geometria dos granulares empregados, sendo esses classificados em circular, cúbico, voronoi¹ e poligonal, pois essas formas interferem na cinética macroscópica dos fenômenos de

¹ Formas complexas de representação por modelagem dos agregados que mais se aproxima do real.

transporte garantindo diferenças na profundidade de carbonatação, visto que a utilização de agregados circulares propiciam maior difusividade do gás ao passo que o emprego de agregados do tipo voronoi garantem menores taxas de difusão. Tal condição é ocasionada pelos diferentes índices de vazios que os formatos granulares conferem (LARRARD, T. D.; BARY, B.; ADAM, E.; KLOSS, 2013).

No entanto as consideráveis diferenças dimensionais dos agregados podem garantir características anisotrópicas que alteram o processo de difusão pela perturbação causada na geometria microestrutural, o que justifica que a carbonatação atinge seus valores máximos na mesma zona da fração volumétrica dos agregados que também explicaria porque o coeficiente de variação é maior para agregados altamente anisotrópicos (LARRARD et al., 2012). A figura 8 traz uma esquematização da geometria dos agregados.

Figura 8 - Representação da microestrutura do concreto



Fonte: Larrard et al. (2013)

2.4.4 Condições meteorológicas

É demonstrando que a umidade relativa necessita de estado ótimo para favorecer a progressão do ingresso do dióxido de carbono, estabelecendo valores médios de umidade relativa do ar no qual um dos valores máximos estabelecidos é 80%, sendo superados esse valor existirá o impedimento do ingresso do agente

agressivo por conta da saturação dos poros do concreto, fazendo com que não exista progresso do agente em estados de saturação (HOUST, 1996).

Essa condição é alcançada em estruturas submetidas a incidência de chuvas, fazendo com que exista uma diferença entre o tempo de exposição da estrutura ao meio inserido e o tempo de exposição efetivo ao agente agressivo (SALVOLDI; BEUSHAUSEN; ALEXANDER, 2015). Fazendo com que a profundidade carbonatada com o tempo seja alterada pelos ciclos de molhagem e secagem da superfície do concreto como é demonstrando na equação 2 proposta por (KROPP J., 1995):

$$t_e = t \left(1 - \frac{ToW}{365} \right) \quad (2)$$

Onde

t_e : tempo de exposição efetiva ao avanço da carbonatação (d)

t : é o tempo real de exposição da estrutura (d)

ToW : tempo que a estrutura está submetida a incidência de chuvas (d)

Na qual será contabilizado para tempos de incidência de chuva (ToW) apenas os dias nos quais os valores de incidência pluviométricas são iguais ou superiores a 2,5 mm (CEB - FIB, 2006), pois para valores iguais ou superiores a estes implica na saturação dos poros e, conseqüentemente, o impedimento da dissolução do CO_2 na matriz porosa.

2.4 MODELAGENS DE PREDIÇÃO

Para entender o mecanismo de propagação desse agente agressivo em relação a degradação das estruturas, diversos pesquisadores correlacionaram os fatores mencionados a acima para produzir equações matemáticas que descrevem o fenômeno, uma vez que esse processo está diretamente relacionado ao monitoramento da vida útil das estruturas (FELIX; POSSAN, 2018).

Tais equações são de cunho determinístico e podem ser divididas em formulações tradicionais ou simples, com dados que podem ser retirados em campo, e formulações complexas, nas quais os dados de entrada são de difícil acesso ou são possíveis apenas em análises laboratoriais. Para as equações de nível tradicional

foram analisadas as equações propostas por Vesikari (1988), Bob e Afanna (1993) e Possan (2010).

O modelo proposto por Vesiraki (1998) é baseado na equação proposta por Tuutti, no entanto o que difere os autores é o valor empregado para o coeficiente de difusividade do CO₂, na qual Tuutti usa o coeficiente de difusão do O₂ e Vesikari busca determinar esse valor a partir da relação água/cimento empregada no concreto, o qual se obteve a equação. Sendo K - coeficiente de carbonatação (mm/ano) e ac - relação água/cimento (com limites $0,45 < ac < 0,75$), na qual é atribuído um valor multiplicador de correção igual a 4 para ambientes externos desprotegidos de intempéries. A formulação proposta é descrita na equação 3:

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

A equação proposta Bob e Affana (1993) possui uma interação entre o tipo de cimento, umidade relativa do ar e a concentração de CO₂ disponível no ambiente, demonstrando que esses fatores estão correlacionadas com a resistência a compressão apresentada pelo concreto, ou seja, quando maior for os valores de resistência a compressão, menores serão as interferências geradas pelos demais fatores empregados, justificando as afirmações feitas anteriormente, uma vez que concretos com maiores valores de compressão apresentam baixa relação água/cimento e conseqüentemente um melhor refinamento dos poros, fazendo com que a penetração do gás pela matriz porosa seja dificultada.

A formulação proposta é apresentada na equação 4 e os valores referentes as constantes são descritas nas tabelas 2, 3 e 4.

$$y = 150 \cdot \left(\frac{c \cdot K \cdot d}{f_c} \right) \cdot \sqrt{t} \quad (4)$$

Onde:

c : coeficiente do tipo de cimento;

k : coeficiente dependente da umidade relativa do ar;

f_c : resistência à compressão do concreto (Mpa);

d : coeficiente referente a quantidade de CO₂.

Tabela 2 - Valores para umidade

Umidade Relativa	K
UR ≤ 60	1,0
70 ≤ UR ≤ 75	0,7
80 ≤ UR ≤ 85	0,5
UR > 90	0,3

Fonte: Silva et al. (2019a)

Tabela 3 - Valores para concentração de CO₂

Quantidade de CO₂	D
CO ₂ ≤ 0,03%	1,0
0,03% < CO ₂ ≤ 0,1%	2,0

Fonte: Silva et al. (2019a)

Tabela 4 - Valores para tipo de cimento

Tipo de Cimento	C
Cimento Portland (CP 40 e CP 45)	0,8
Cimento Portland (CP 50 e CP 55)	1,0
Cimento Portland + 15% de adições	1,2
Cimento Portland + 30% de adições	1,4
Cimento Portland + 50% de adições	2

Fonte: Silva et al. (2019a)

A modelagem proposta por Possan (2010) é dependente de diversos fatores que envolvem o processo de degradação, tanto fatores referentes ao concreto como fatores referentes ao meio de exposição, sendo cada fator da formulação é analisado de modo individual, ou seja, apenas um parâmetro específico, na qual se obterá um coeficiente que representa a influência de cada variável no fenômeno. A formulação proposta é descrita na equação 5.

$$y = kc \cdot \left(\frac{20}{f_c}\right)^{Kfc} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[\left(\frac{Kad \cdot ad^3}{40 + f_c} \right) + \left(\frac{KCO2 \cdot CO2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c} \right) - \left(\frac{KRU \cdot (UR - 0,58)^2}{100 + f_c} \right) \right] \cdot Kce \quad (5)$$

Onde:

y = Profundidade de carbonatação (mm); f_c = Resistência média a compressão (MPa); k_c = Fator dependente do cimento; k_{fc} = Fator dependente da resistência à compressão do concreto, função do tipo de cimento; 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; UR = Umidade relativa do ar (0,01%); k_{UR} = Fator dependente da umidade relativa do ar, em função do cimento; CO_2 = Teor de dióxido de carbono no ambiente (%); k_{CO_2} = Fator dependente do teor de dióxido de carbono no ambiente, em função do cimento; k_{ce} = Fator dependente do ambiente de exposição (protegido ou desprotegido), em função das condições de exposição do concreto. Algumas variáveis apresentam valores tabelados como é expresso na tabela 5 e 6.

Tabela 5 - Coeficientes do modelo (a) das características do concreto e das condições ambientais

Tipo de Cimento	Características do concreto			Condições Ambientais	
	Cimento	f_c	Adição	CO_2	UR
	k_c	k_{fc}	K_{ad}	K_{CO_2}	K_{UR}
CP I	19,80	1,70	0,24	18,00	1300
CP II E	22,48	1,50	0,32	15,50	1300
CP II F	21,68	1,50	0,24	18,00	1100
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

Fonte: (SILVA et al., 2019a)

Tabela 6 - Coeficientes do modelo (b) das condições de exposição

Condições de exposição da estrutura	
Proteção à chuva	k_{ce}
Ambiente interno protegido de chuva	1,30
Ambiente externo protegido de chuva	1,00
Ambiente externo desprotegido de chuva	0,65

Fonte: Silva et al. (2019a)

As equações dos modelos discutidos anteriormente podem não descrever de forma precisa o efeito patológico, visto que são modeladas a partir de dados de entrada simplórios sem avaliar as modificações físico-químicas que o concreto sofre ao longo do tempo de exposição ao agente agressivo.

Um exemplo disso é que as equações não preveem a carbonatação de outros compósitos hidratados, mesmo que sejam de pouca influência, visto que existem frentes de carbonatação distintas para CH e C-S-H, levando a falsa ideia que a concentração dos compósitos carbonatáveis não variam no espaço (HILLS et al., 2015).

Outra possível causa da não conformidade apresentada pelas equações é que os métodos tradicionais são baseados em regressão linear que podem assumir observações independentes ou sem correlações entre os dados de entrada que levam a não avaliação dos níveis hierárquicos dos influentes no processo (M.B. SIKKEL, K.T. MACLEOD, F. GORDON, 2013).

Posto as dificuldades de determinação do efeito patológico, Carmona (2005) conclui-se que as inadequações de resultados determinísticos se dão pela falta de consistência teórica, falta de calibração das equações e pouco conhecimento em relação às mudanças de agressividade ambiental em relação às localidades que a estrutura está inserida. Silva et al., (2019a) reforça a afirmação ao demonstrar que para simulações de idades elevadas algumas equações não atendem aos parâmetros

de desempenho mínimo estipulados pela NBR 6118 (ABNT, 2014), descrevendo variações mínimas de 50% em relação aos resultados reais de frente carbonatada. Em relação as dificuldades de mensuração da frente carbonatada são descritos a seguir parâmetros de confiabilidade e intervalos de variação dos valores obtidos para auxiliar nos resultados finais e na tomada de decisão em relação ao avanço do agente agressivo.

2.5 VARIAÇÃO E CONFIABILIDADE DOS RESULTADOS

A profundidade de carbonatação pode apresentar valores diversos em medições atribuídas em pontos distintos de um elemento estrutural. O causador dessa circunstancia é o caráter heterogêneo do concreto, como as diferenças de materiais atribuídos, e suas modificações na microestrutura e nos fenômenos de transporte. As técnicas de inspeção e mensuração da influência proveniente de outros produtos carbonatáveis como C-S-H, C₂S e C₃S, que carbonatam mais rapidamente e apresentam nas primeiras fases da carbonatação concentrações íngremes, fazem com que o processo de carbonatação seja ligeiramente afetado, que após o consumo desses materiais, o CO₂ reage unicamente com o Ca(OH₂) (PETER et al., 2008). Por essas condições é que os valores médios de carbonatação para medições em primeiras idades apresentam altos valores de desvio padrão, podendo concluir que a variabilidade de dados apresentados para as primeiras idades podem atribuir equivocadamente valores que representam aproximadamente de 9% a 11% do cobrimento mínimo de concreto para lajes, vigas e pilares de estruturas de concreto armado, classe 2, de 25 mm e 30 mm, respectivamente (SILVA et al., 2019b).

Lifecon (2003) demonstram que o coeficiente de variação diminui com o aumento da carbonatação, sendo a diminuição gradativa, na qual concretos com menos de 6 meses podem apresentar variação de 25% a 65% em contraste com concretos com idades de 6 a 8 anos que apresentam variações em torno de 10 % a 11% (SILVA et al., 2020). Essa que tal variação pode ser mensurada por modelos formulados como é descrito pela equação 6. Os procedimentos seguintes são propostos pelo projeto Life Cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability (LIFECON).

$$\text{CoV}_{R^{-1}Acc,0} = a \cdot \left(\left(\frac{X_c}{t} \right)^2 \cdot 10^{11} \right)^b \quad (6)$$

Onde

$CoVR^{-1}Acc,0$: Coeficiente de variação (%)

$R^{-1}ACC,0m$: Valor médio da resistência à carbonatação inversa [10-11 m⁵/(s kgCO₂)]

a: Parâmetro de regressão, o valor adotado é = 68,9

b: Parâmetro de regressão, o valor adotado é = -0,22

X_c : Profundidade de carbonatação (m)

τ : Relação entre o tempo de exposição e a concentração de CO₂.

Os valores atribuídos para τ podem ser mensurados pela equação 7:

$$\tau = \sqrt{2 * \lambda C * T} \quad (7)$$

Onde:

λC : concentração de CO₂ no ambiente (%);

T: tempo (s).

O documento do LIFECON prevê um valor adimensional de 1,8 de confiabilidade mínima para estruturas com vida útil de 100 anos, idade idealizada para base de cálculo, afim de avaliar se a idade da estrutura condiz com os valores de profundidade de carbonatação apresentados sob os parâmetros de confiabilidade estabelecidos. Usando para base de cálculo o valor médio de carbonatação, o coeficiente de carbonatação, o valor médio de cobrimento de concreto e a variação do cobrimento de concreto, como é descrito na equação 8:

$$\beta = \frac{(Cc - k\sqrt{t})}{\sqrt{Vcc^2 - (Vk\sqrt{t})^2}} \geq 1,8 \quad (8)$$

Onde:

Cc : Cobrimento de concreto (mm)

$k\sqrt{t}$: Profundidade de carbonatação (mm)

Vcc : Variação do cobrimento de concreto (mm)

$Vk\sqrt{t}$: Variação da profundidade de carbonatação (mm)

3 METODOLOGIA

A tabela 7 traz o cronograma das atividades que foram realizadas na fase experimental do trabalho e serão discutidas de modo discriminativo ao longo do texto.

Tabela 7 - Atividades da metodologia

Etapa	Ensaio	Fonte
Produção das amostras	Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
	Moldagem e cura	NBR 5738 (ABNT, 2015)
	Consistência por abatimento	NBR NM 67 (ABNT, 1998)
	Compressão de corpo de prova	NBR 5739 (ABNT, 1994)
Mensuração da carbonatação	Indicação da frente carbonatada	Possan (2004) e CPC-18
	Medição por paquímetro	
Verificação dos dados	Variação	Possan 2010, LIFECON 2003 e FIB 34
	Confiabilidade	

Fonte: Próprio autor

3.1 PRODUÇÃO DAS AMOSTRAS

Para analisar o avanço da carbonatação foram produzidas 23 amostras de concretos cilíndricas com proporções de 10 centímetros de diâmetro por 20 centímetros de altura submetidas a cura úmida por imersão durante 28 dias conforme as orientações descritas na NBR 5738 (ABNT, 2015). Já para o ensaio de consistência foi adotado as prescrições estabelecidas pela NBR NM 67 (ABNT, 2009) e para o ensaio de resistência a compressão seguiu-se as prescrições conforme estabelece a NBR 5739 (ABNT, 2007).

A dosagem adotada para a produção dos corpos de prova foi a prescrita pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), que tem como metodologia o uso das informações de massa específica, granulometria e diâmetro máximo dos agregados como base para alcançar a resistência desejada. O consumo dos materiais e a proporção de traço em quilos é descrita na tabela 8.

Para produção do traço foi utilizado o cimento do tipo CII-E-32, por ser amplamente utilizado na região, e adotado como resistência mecânica, após 28 dias de cura, a resistência à compressão de 30MPa para um abatimento de 30 ± 10 mm, no entanto a resistência alcançada foi de 29,3 MPa.

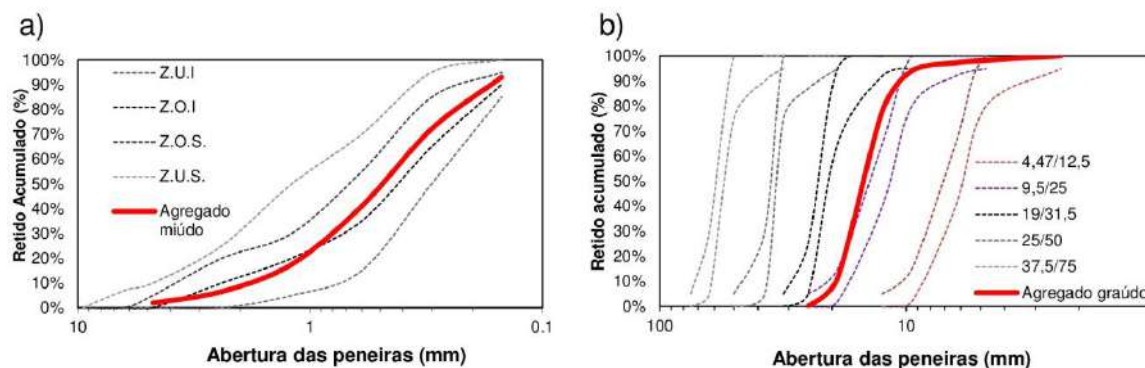
Tabela 8 - Consumo em kg/m³ dos materiais utilizados para a fabricação das amostras

TRAÇO	Cimento	Areia	Brita	Água
1:1,52:2,36:0,47				
Kg	24,45	37,16	57,7	11,5

Fonte: próprio autor

O agregado miúdo empregado para a produção das amostras foi areia quartzosa que apresentou, após caracterização, módulo de finura (MF) de 2,38. Para os ensaios granulométricos a areia foi seca e peneirada, sendo utilizado na produção das amostras apenas o material passante na peneira 4,75. Já para o agregado graúdo foi empregado brita comum de origem basáltica, na qual foi seca até constância de massa e após o ensaio de granulometria apresentou dimensão máxima característica de 6,3mm. A distribuição granulométrica dos agregados, tanto miúdo como graúdo, pode ser observado pela curva granulométrica apresentada na figura 9 que seguiu as orientações de caracterização conforme é estabelecido na NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Figura 9 - Distribuição granulométrica dos agregados



Fonte: próprio autor

3.2 MENSURAÇÃO DA CARBONATAÇÃO

Após a produção das amostras as mesmas foram carbonatadas em condição natural em ambiente externo sem proteção contra as intempéries durante quatro intervalos distintos de 14, 28, 56 e 84 dias, na qual após passado o período estimado as amostras foram submetidas a medição da frente de carbonatação. Para a mensuração foi empregado a solução de fenolftaleína, como indicador ácido-base, nas concentrações de 1% de fenolftaleína, 70 de álcool e 29% de água destilada. A solução apresenta pH de viragem em torno de 9, na qual em ambiente ácido a solução

se apresenta incolor e em ambiente com pH superiores ao ponto de viragem se apresenta na cor rosa carmim. Para que as diferenças pH sejam estabelecidas entre as áreas do corpo de prova, a solução é aspergida na face fraturada diametralmente da amostra de concreto para que haja diferença colorimétrica.

Na ausência de normas brasileiras para a mensuração do fenômeno, foram adotadas as orientações metodológicas de (POSSAN, 2004) e CPC – 18 (RILEM RECOMMENDATIONS, 1988), que faz uso do paquímetro para medir em milímetros a distância entre a superfície da amostra e a tonalidade rosa carmim. Além dos critérios adotados, foi estabelecido que as medições seriam realizadas apenas nas laterais das amostras, dispensando as bases e evitando as arestas, contabilizado 40 medições, sendo 20 medições de cada lado com distância de 1 cm entre elas. A figura 10 e 11 descreve a metodologia de medição.

Figura 10 - Marcação para medição



Fonte: próprio autor

Figura 11 - Medição da profundidade de carbonatação



Fonte: próprio autor

3.3 CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE

O ensaio experimental de carbonatação natural foi realizado entre agosto e novembro de 2018, no núcleo de tecnologia indústria do Ceará (NUTEC) na cidade de Fortaleza. O ambiente é caracterizado como atmosfera urbana. Foram registrados nesse período os valores médios das variações climáticas como temperatura e umidade relativa do ar. Os valores médios estão expressos na tabela 9 e foram obtidos no site de dados climáticos Climatempo.

Tabela 9 - Valores médios das intempéries

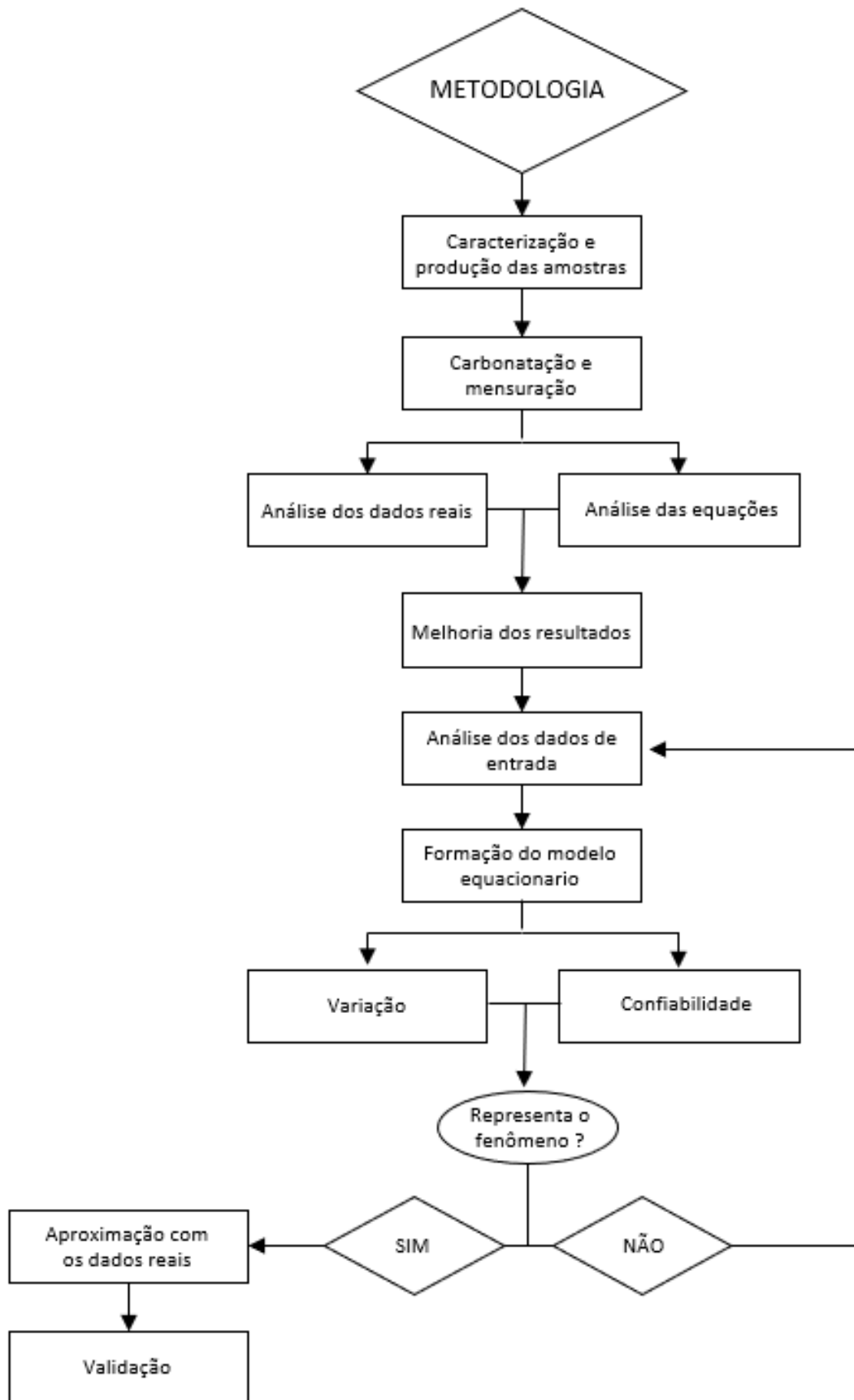
Parâmetro	Meses de exposição (2018)			
	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
Umidade relativa (%)	72	72	69	70
Temperatura (°C)	26,5	26,5	27,5	27,5

Fonte: próprio autor

3.4 VERIFICAÇÃO DOS DADOS

Para a verificação da confiabilidade das equações foi equiparado os resultados reais com os obtidos por modelagem de predição, afim de verificar o grau de distanciamento apresentado e suas implicações para conclusões de dados preditivos. Para que a atribuição matemática seja possível foram documentadas as características de traço, de resistência a compressão e as características do ambiente durante o período de exposição, como umidade do ar e temperatura. A figura 12 mostra o fluxograma das etapas metodológicas.

Figura 12 - Fluxograma das atividades



Fonte: Próprio autor

3.5 MODELAGEM

Mediante as descrições realizadas sobre os parâmetros estáticos e dinâmicos é possível afirmar que ambos tratam sobre as condições de transporte do CO₂, uma vez que o tipo de cimento, agregado empregado, condições de cura e temperatura estão atrelados a área de reação e quantidade dos materiais reagentes no processo de carbonatação. Logo, como boa parte dos pesquisadores concordam quanto aos efeitos da umidade e da temperatura, será analisado modelos preditivos que descrevem o termo de difusão.

Para que essa análise seja possível, algumas etapas serão adotadas seguindo as prescrições do fluxograma, como: 1º observar como as modelagens apresentam o arranjo formulado em relação ao termo de difusão, 2º qual a relação dos dados estáticos com os dados dinâmicos na formação desse parâmetro e promover uma equação prévia. 3º estabelecer as condições de contorno e constantes de ajuste dos dados de entrada e promover uma equação definitiva, 4º correlacionar a modelagem definitiva com os dados reais obtidos, afim de propor melhorias e verificar a eficiência da modelagem proposta em relação aos dados reais e outras equações de predição.

4 RESULTADOS E DISCUÇÕES

4.1 ETAPA 1 – ANÁLISE DOS ARRANJOS MATEMÁTICOS

Parte das equações de carbonatação propostas seguem a configuração que todos os parâmetros são interligados, demonstrando dependência conjunta para que seja possível estimar o fenômeno, como é expresso pela equação 9 proposta por (TA et al., 2016), equação 10 proposta por (HYVERT et al., 2010), equação 11 proposta por (EKOLU, 2018), equação 12 proposta por (CEB - FIB, 2006) e equação 13 proposta por (LIFECON, 2003).

$$D_{CO_2} = D^{28}_{CO_2} \cdot f(RH) \cdot f(T) \cdot f\left(\frac{S+G}{C}\right) \cdot f\left(\phi, \frac{w}{C}, FA\right) \cdot f(T_c) \quad (9)$$

$$X_c(t) = \sqrt{\frac{2P_0}{\varphi_p \left(CH_i + \frac{CSH_i}{n+1} \cdot \left(\frac{P_0}{P_{atm}} \right)^n \right) RT \left(1 - \alpha CSH_i \cdot \left(\frac{P_0}{P_{atm}} \right)^n \right)} \frac{D_0}{\cdot t}} \quad (10)$$

$$d_{(f,t)} = e_h \cdot e_s \cdot e_{co} \cdot cem(F_{c(t)})^g \cdot \sqrt{t} \quad (11)$$

$$X(t) = \sqrt{2k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R^{-1}_{ACC,0} + \varepsilon_t) \cdot C_s \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)} \quad (12)$$

$$X_C = \sqrt{2 \cdot k_{RH} \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R^{-1}_{ACC,0} + \varepsilon_t) \cdot \Delta C_s \cdot \sqrt{t} \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^w} \quad (13)$$

As equações promovem como elementos primordiais para o avanço da carbonatação os seguintes fatores descritos na tabela 10.

Tabela 10 - Termos das modelagens

MODELO	PARÂMETROS ADOTADOS
Van-Loc Ta (2016)	Difusão do CO ₂ , umidade relativa, temperatura, área de contato, tipo de cimento, porosidade e relação A/C
Hyvert (2010)	Teor de reagentes, volume de pasta de concreto, pressão atmosférica, pressão do CO ₂ , constante ideal dos gases, temperatura, difusão do CO ₂ e porosidade
Ekulo (2018)	Umidade relativa, fator de abrigo, concentração de CO ₂ , resistência a carbonatação e tipo de cimento
FIB (2010)	Umidade relativa, parâmetro de execução e regressão, resistência a carbonatação, termo de erro, concentração de CO ₂ e termo meteorológico
LIFECON (2003)	Umidade relativa, influência de execução, fator do teste do método, resistência a carbonatação, termo de erro, concentração de CO ₂ e termo meteorológico

Fonte: próprio autor

Analisando as equações propostas é possível afirmar algumas condições sobre a influência dos termos estabelecidos, como é descrito por Ta et al. (2016) que afirma que a concentração molar dos constituintes carbonatados é diretamente proporcional ao teor de cimento, ou seja o tipo de cimento desempenha função de área de contato e reação.

Já Ekulo (2018) afirma que o modelo proposto não pode ser aplicado para concretos com resistência compressão inferiores a 20MPa. Desse modo pode-se estabelecer a partir das equações que os fatores primordiais no processo de carbonatação são aqueles atrelados a poro pressão e cinética de transporte. Logo o termo de difusividade deve conter os seguintes fatores: temperatura, área de contato, tipo de cimento, porosidade, teor de reagentes, pressão atmosférica e pressão de CO₂. Os demais fatores como fator de regressão, fator do teste do método e termo de erro serão contabilizados como variações dos valores obtidos. Conseqüentemente, uma formulação genérica que representa o termo de difusão pode ser descrita conforme a equação 14.

$$D_{CO_2} = f(\Delta T) * f(A_{reação}) * f(\emptyset) * f(P) * f(R) \quad (14)$$

Onde:

$f(\Delta T)$ = Função da temperatura

$f(A_{reação})$ = Função da área de reação

$f(\emptyset)$ = Função da porosidade

$f(P)$ = Função da pressão do CO₂

$f(R)$ = Função dos reagentes

4.2 ETAPA 2 – RELAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA NA FORMAÇÃO DO PARÂMETRO

4.2.1 Coeficiente de difusão do CO₂

Pela falta de descrições precisas sobre o transporte dióxido de carbono na matriz porosa será usado como parâmetro de análise a equação proposta por (R. J. MILLINGTON, 1959), na qual a difusão do agente é calculado em função do coeficiente de difusão do CO₂ no ar conforme a equação 15.

$$D_{CO_2} = D^0_{CO_2} * \emptyset^k * (1 - S)^g \quad (15)$$

Onde:

$D^{\circ}_{CO_2}$: Coeficiente de difusão do CO_2 no ar

\emptyset : Porosidade.

S: Nível de saturação do concreto.

k e g: São constante adimensionais.

4.2.2 Porosidade

Na equação 15 é perceptível que o coeficiente de difusão está sob função da porosidade na qual dispõe de um fator potencial, k. Como Song; Kwon (2007) afirmou inversa proporcionalidade entre a carbonatação e a porosidade, sendo que ambas são dependentes do tempo, é possível afirmar que existe uma variação da porosidade em relação ao tempo (MI; PAN; SHEN, 2019). Logo o termo da porosidade é considerado variável, pois o avanço da carbonatação promove modificações microestruturais que afetam as condições de permeabilidade do dióxido de carbono (CUI et al., 2015).

Para se analisar esse fator, será levado em consideração a equação 16 descrita (PAPADAKIS; FARDIS; VAYENAS, 1992) que descreve a porosidade da seguinte maneira.

$$\varepsilon_0 = \frac{wc * \frac{\rho_c}{\rho_w}}{1 + wc * \frac{\rho_c}{\rho_w} + \frac{a}{c} * \frac{\rho_c}{\rho_a}} \quad (16)$$

Onde:

wc: relação água cimento

a/c: relação agregado cimento

ρ_w : densidade da água

ρ_c : densidade do cimento

ρ_a : densidade do agregado

Já para descrever a porosidade em concretos carbonatados Park (2008) estabelece uma formulação dependente apenas da relação água/cimento, como demonstração a equação 17. No entanto a equação não apresenta a diminuição da

porosidade em relação ao tempo, ou seja, apresenta apenas o estado de estagnação de porosidade.

Para descrever essas variações em relação ao tempo, será utilizado a condição de contorno estabelecida por Silva et al. (2019b) no qual afirma que o processo de carbonatação apresenta constância no avanço a partir de 980 dias, logo, a variação máxima de porosidade deve ser realizada nesse intervalo conforme descreve a equação 18. Sendo que, para estruturas com idades mais avançadas que 980 dias o valor de porosidade adotada será a máxima estabelecida pela equação 17.

$$\varepsilon_{carb} = (0,93 - 3,95 * 0,94^{(100 * a/c)}) * \varepsilon_0 \quad (17)$$

$$\varepsilon_{carb}(t) = \varepsilon_0 - \left[(\varepsilon_0 - \varepsilon_{carb}) * \frac{t}{980} \right] \quad (18)$$

Para que a porosidade contribua no o processo de carbonatação, ele deve ser convertido em um fator de permeabilidade dinâmica em relação tempo sob o efeito de uma força capilar, poro pressão, pois o coeficiente de difusividade do CO₂ depende da pressão parcial do dióxido de carbono (HYVERT et al., 2010). O fluxo de poro pressão pode ser descrito conforme (PRUESS; OLDENBURG; MORIDIS, 1999) na equação 19.

$$\vec{F}_i = k * P \quad (19)$$

Onde:

K: fator de permeabilidade

P: pressão do gás CO₂

Desse modo, pode-se descrever que o fator de permeabilidade do termo de difusão pode ser descrito conforme a equação 20.

$$k = \frac{\varepsilon_{carb}(t)}{\varepsilon_0} \quad (20)$$

4.2.3 Pressão do CO₂

Para expressar a pressão exercida pelo gás carbônico será utilizado a equação do transporte de gases fornecida por (PETER A. CLAISSE, 2014), no qual, pode ser manipulada em função apenas da pressão como descreve a equação 21.

$$P = \frac{nRT}{V} \quad (21)$$

Onde:

P: pressão do gás CO₂ (atm.)

n: número de mols do gás

R: constante ideal dos gases 0,082 atm.L/mol.K

T: temperatura (K)

V: volume do gás (L)

O termo V pode ser considerado constante do gás, sendo empregado o valor de 22,4L, logo o único termo variável da equação é apenas a temperatura.

Existe algumas condições de contorno em relação a temperatura e a carbonatação como o aumento duplicado da frente carbonatada para temperaturas de 20C° a 40C° (T. MORI; SHIROYAMA; KAMIMURA, A. YODA., 1972) e decréscimo de 30% quando a temperatura varia entre 60C° a 100C° (DROUET et al., 2019).

Porém temperaturas superiores a 50°C nunca foram registradas, podendo assim desconsiderar a queda dos 30% após os 60°C, admitindo uma curva linear para o efeito da temperatura conforme demonstra a equação 22. Tal função pode ser acoplado na equação 21 para que as condições de contorno sejam estabelecidas. Como o termo de temperatura da equação 21 está em Kelvin, será feito um ajuste para adapta os valores encontrados em Celsius conforme a equação 23.

$$y_{(carb)} = 0,0167T_{kelvin} - 4,5591 \quad (22)$$

$$T_{kelvin} = T_{celcius} + 273 \quad (23)$$

Como o termo de condição de contorno leva o fator de temperatura e esse termo existe na própria equação 21, é possível juntar ambos em um só fator cominando na equação 24:

$$T_{kelvin(carb)} = 0,0167 * T_{celcius}^2 + 4,5591 * T_{celcius} \quad (24)$$

Já para o número de concentração molar do gás carbônico será utilizado a lei dos gases ideias e a lei de Boyle-Charles, conforme a equação 25.

$$n_{CO_2} = \frac{V * p}{R * T} \quad (25)$$

Onde:

p: Pressão atmosférica (1atm)

Por fim, juntando todos os termos, é apresentado que a pressão do gás de CO₂ exercida em favor do processo de carbonatação terá alguns fatores cancelados como, volume do gás carbônico e constante ideal dos gases, sendo expresso apenas em função da temperatura e da pressão atmosférica como descreve a equação 26.

$$P = (0,0167T_{\text{celcius}} + 7 * 10^{-16}) * p \quad (26)$$

Onde:

T_{celcius}: temperatura (C°)

4.2.4 Grau de absorção do CO₂

Mesmo que haja pressão e canal eficientes para a penetração do gás, só haverá carbonatação quando o CO₂ reagir com os compósitos cimentícios carbonatáveis (JUNG SH., 2003), em especial o hidróxido de cálcio e o silicato de cálcio hidratada, como foi tratado anteriormente. Logo a profundidade de carbonatação está atrelada a concentração molar desses agentes como demonstra (PAPADAKIS, 2000) através da equação 27.

$$X_c = \sqrt{\frac{2D[CO_2]_0t}{[CH] + 3[CSH]}} \quad (27)$$

No entanto, quantificar as concentrações de CH e CSH se torna inviável devido a quantidade de variáveis envolvidas no processo, logo se torna mais simplificado tratar da capacidade de absorção do CO₂ no tempo em relação ao grau de hidratação e a concentração molar dos materiais carbonatáveis de forma conjunta (YANG; SEO; TAE, 2014), como descreve a equação 28.

$$a_{CO_2}(t) = a_h(t) * M_{ct}(t) * M_{CO_2}(t) \left(\frac{g}{cm^3} \right) \quad (28)$$

Onde:

a_h(t): É o grau de hidratação da pasta de cimento no tempo

M_{ct}(t): é a concentração molar dos constituintes carbonatáveis

M_{CO₂}: peso molecular do CO₂ (44g/mol)

Com o aumento da frente carbonatada implica em uma maior formação de sais de carbonato de cálcio, é possível afirmar um aumento da concentração molar dos constituintes carbonatáveis com o avanço da idade do concreto, nos quais as variações implicam em uma aumento de concentração de apenas 0,56% no intervalo de 1 à 40 anos e decréscimo de 0,11% de 40 a 100 anos (YANG; SONG; SONG, 2013). A obtenção da concentração molar está diretamente ligada com a quantidade de cimento empregado e pode ser expressa pela equação 29:

$$M_{ct}(t) = \left[\left(1 * 10^{-5} * \frac{t}{365} \right) + \left(0,0019 * \frac{t}{365} \right) + 8,0081 \right] * C * 10^{-6} \text{ (mol/cm}^3\text{)} \quad (29)$$

Onde:

C: quantidade de cimento em (k/cm³)

Já para o termo de hidratação Cha SW (1999) demonstrou que o grau de hidratação sofre modificações ao longo do tempo, no qual seu comportamento gráfico se caracteriza como uma parábola que tende a um valor último, (a_{∞}), que é influenciado pela relação água/cimento empregada no traço como descreve a equação 30 e 31:

$$a_h(t) = \frac{t}{2+t} * a_{\infty} \quad (30)$$

$$a_{\infty} = \frac{1,031 * a/c}{0,194 + a/c} \quad (31)$$

4.2.5 Área de contato

A área de contato da reação deve ser delimitada para justificar e minimizar a gama de variações dos valores de profundidade de carbonatação, pois tanto para condições de ensaio acelerado quanto para naturais os resultados exibem variações significativas (CAREVIĆ; IGNJATOVIĆ; DRAGAŠ, 2019; HUANG et al., 2012).

Essa variação é possivelmente causada pela distribuição aleatória dos agregados graúdos, fazendo com que a penetração do CO₂ pela matriz porosa apresente trajetória tortuosa (JIANG et al., 2019) e lenta devido a maior densidade do agregado em relação a pasta de cimento endurecida (J.D. HAN, 2012). Essa afirmação é reforçada pelos resultados apresentados por (DE WEERDT et al., 2019; OMIKRINE METALSSI et al., 2012) que mostrou que a profundidade de carbonatação

tende a ser menos dispersa em argamassas, ou seja, materiais cimentícios sem agregado graúdo.

No entanto, como a distribuição dos agregados é aleatória se torna difícil analisar as variações causadas. Para que esse efeito seja minimizado e sabendo que o concreto é um material heterogêneo e multifásico, será tratado com área de reação apenas os pontos com ausência de agregado graúdo (JIANG et al., 2019). Para a base de cálculo, será usado a quantidade do agregado graúdo, pois possui impacto no processo de carbonatação (RUAN; PAN, 2012), uma vez que a profundidade de carbonatação diminui com o aumento da quantidade e densidade dos agregados graúdos (RUAN; PAN, 2012). A área de reação pode ser descrita conforme a equação 32.

$$A_{reação} = \frac{P_t - P_b}{P_t} \quad (32)$$

Onde:

Pt: peso do traço

Pb: peso da brita

Os termos tratados para a composição dos fatores interferentes na difusividade do CO₂ estão de acordo com as afirmações feitas por (YANG; SEO; TAE, 2014), no qual é dito que a difusividade do dióxido de carbono no concreto é afetada pelas proporções de mistura, grau de hidratação do cimento, saturação dos poros e temperatura. Logo, a difusividade do CO₂ pode ser descrita previamente conforme descreve a equação 33.

$$D_{CO_2} = P * k * A_{reação} * a_{CO_2} (atm . g/cm^3) \quad (33)$$

Para que as unidades sejam ajustadas a formula pode ser reescrita de acordo com a equação 34.

$$D_{CO_2} = 9,86 * fck * 10^3 * \sqrt{\frac{0,98}{9,66} * P * k * A_{reação} * a_{CO_2}} (mm/s) \quad (34)$$

4.3 ETAPA 3 – AJUSTES E CONDIÇÕES DE CONTORNO

Como foi dito anteriormente será utilizado algumas condições de contorno para que a equação seja coerente com os dados reais. Para isso utilizou-se como

base as equações de Bob e Affana (1993) e Possan (2010), pois, como afirmou Silva et al. (2020) a interpolação simples entre as duas equações fornece resultados satisfatórios. Logo as modificações referentes a resistência a compressão, grau de interferência da difusividade e demais constantes presentes serão modeladas tendo como base essas formulações.

4.3.1 Resistência a compressão

Ambas as equações tratam o termo como um divisor, ou seja, quanto maior o seu valor, menor será a frente carbonatada, demonstrando inversa proporcionalidade. Uma interpolação simples entre os resultados de carbonatação das simulações de Bob e Affana (1993) e Possan (2010) para varrições entre 20MPa e 40MPa forneceram um decréscimo da frente carbonatada em 46%. Desse modo, com o termo de resistência a compressão já está presente na equação, basta fazer com que ele esteja de acordo com as condições de decaimento. Assim a influência da resistência a compressão na frente de carbonatação pode ser expressa conforme a equação 35.

$$K_{fck} = -0,027 * fck + 1,54 \quad (35)$$

Onde:

Fck: Resistência a compressão em (MPa)

Teor de CO₂ no ambiente

Como a concentração de CO₂ no ambiente está atrelado com o próprio fator de difusividade o mesmo deve ser integrado junto a esses fatores, ou seja, dentro da raiz quadrada. Para esse termo, será utilizado a tabela de concentração apresentada por (SAETTA A. V.; VITALIANI, 2004). Logo, o teor de dióxido de carbono pode ser expresso de cordo com a equação 36.

$$K_{CO_2} = \sqrt{CO_2} \quad (36)$$

Desse modo, o termo de difusividade de carbonatação pode ser reescrito como demonstra a equação 37.

$$D_{CO_2} = (-266,22 * fck + 15,18 * 10^3) * \sqrt{\frac{0,98}{9,66} * P * k * A_{reação} * a_{CO_2} * CO_2} \quad (mm/s) \quad (37)$$

4.3.2 Ajustes

Para que o coeficiente de difusividade até aqui estimado possa apresentar consistência em relação a frente carbonatada será realizado uma análise comparativa em relação aos resultados de carbonatação referentes a interpolação simples entre a equação 4 e 5 para 980 dias em uma umidade ótima de 58%, no qual apresenta carbonatação ótima de 7,43 mm para o intervalo estimado. Analisando os fatores isoladamente na equação de Possan (2010), Equação 5, é possível afirmar que o termo de difusividade apresenta influência de 33% no resultado final, sendo os demais termos e constantes intensificadores do coeficiente de difusividade. Para que a condição de 33% de influência no processo possa ser atendida no termo de difusividade apresentado pela equação 37 a mesma será acrescida de um termo intensificador e será reescrita de acordo com a equação 38.

$$D_{CO_2} = 163,1362 * \left[(-266,22 * f_{ck} + 15,18 * 10^3) * \sqrt{\frac{0,98}{9,66} * P * k * A_{reação} * a_{CO_2} * CO_2} \right] \quad (38)$$

Esse termo deve ser um posicionado junto a equação de Possan (2010) como substituinte do fator de difusividade apresentado pela formulação e analisar se essa interação apresenta consistência em relação aos dados reais.

4.4 ETAPA 4 – CORRELAÇÃO COM OS DADOS REAIS OBTIDOS DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

A análise dos dados reais de profundidade de carbonatação no intervalo de 14, 28, 56 e 84 dias apresentaram valores não homogêneos, ou seja, a variação em mm dos intervalos não é igual entre si. Esse comportamento pode ser justificado pelas diversas frentes carbonatadas apresentadas ao longo das 40 medições. Para que esse desvio seja minimizado uma nova média foi realizado dispensando resultados fora do intervalo de desvio padrão, com é apresentado pela tabela 11, 12, 13 e 14.

Tabela 11 - Profundidade de carbonatação 14 dias

14 DIAS			
MED.	mm	MED.	mm
1	0	21	1,1
2	0,7	22	0,6
3	0,7	23	0
4	0,8	24	1,1
5	1,2	25	0,7
6	0,9	26	0,9
7	0,6	27	0,7
8	1,5	28	0,5
9	1,3	29	0,9
10	1,1	30	1
11	0,8	31	0,5
12	1,1	32	0
13	0,9	33	0,4
14	0,8	34	0,8
15	0,6	35	1,2
16	2,2	36	1,9
17	1,9	37	0,8
18	0,4	38	0,5
19	0	39	2,1
20	0,7	40	0
MÉDIA (mm)		0,8475	
DESVIO (mm)		0,534783835	
NOVA MÉDIA (mm)		0,81	

Fonte: próprio autor

Tabela 12 - Profundidade de carbonatação 28 dias

28 DIAS			
MED.	mm	MED.	mm
1	0,9	21	0,9
2	1,6	22	1,9
3	0,8	23	2,3
4	0,5	24	0,6
5	1,1	25	0,5
6	1,1	26	0,8
7	0,7	27	1,3
8	1,8	28	1,8
9	1,8	29	1,2
10	0,6	30	0,4
11	0,7	31	1,2
12	1,4	32	1,1
13	1,5	33	1,8
14	1	34	1
15	1	35	1,9
16	2,1	36	1,8
17	0,9	37	0,9
18	1,3	38	0,8
19	0,8	39	0,8
20	0,9	40	1,1
MÉDIA (mm)		1,165	
DESVIO (mm)		0,482467615	
NOVA MÉDIA (mm)		1,030769231	

Fonte: próprio autor

Tabela 13 - Profundidade de carbonatação 56 dias

56 DIAS			
MED.	mm	MED.	mm
1	3,6	21	1,6
2	1,5	22	1,8
3	1,4	23	2,8
4	1,6	24	2,1
5	1,8	25	3,8
6	2,2	26	1,6
7	1,6	27	1,8
8	1,6	28	3,1
9	1,5	29	1,7
10	1,4	30	2,5
11	1,6	31	1,6
12	1,8	32	1,9
13	2,5	33	1,8
14	1,6	34	1,8
15	3,3	35	1,7
16	4,4	36	1,8
17	1,9	37	1,6
18	1,3	38	1,4
19	2,1	39	1,4
20	0,3	40	1,9
MÉDIA (mm)		1,9675	
DESVIO (mm)		0,756104325	
NOVA MÉDIA (mm)		1,739393939	

Fonte: próprio autor

Tabela 14 - Profundidade de carbonatação 84 dias

84 DIAS			
MED.	mm	MED.	mm
1	2,5	21	0,8
2	2,1	22	5,4
3	0,9	23	2,6
4	1,4	24	1,7
5	1,7	25	2,1
6	2,8	26	2,4
7	3,8	27	3,8
8	3,6	28	2,4
9	3	29	2,3
10	2,7	30	3,5
11	3,4	31	2,3
12	2,7	32	3,1
13	4,2	33	2,3
14	3,6	34	2,2
15	4	35	3,2
16	2,3	36	2,1
17	3,1	37	3,4
18	2,4	38	3,5
19	2,1	39	1,8
20	3	40	2,7
MÉDIA (mm)		2,7225	
DESVIO (mm)		0,89818915	
NOVA MÉDIA (mm)		2,737931034	

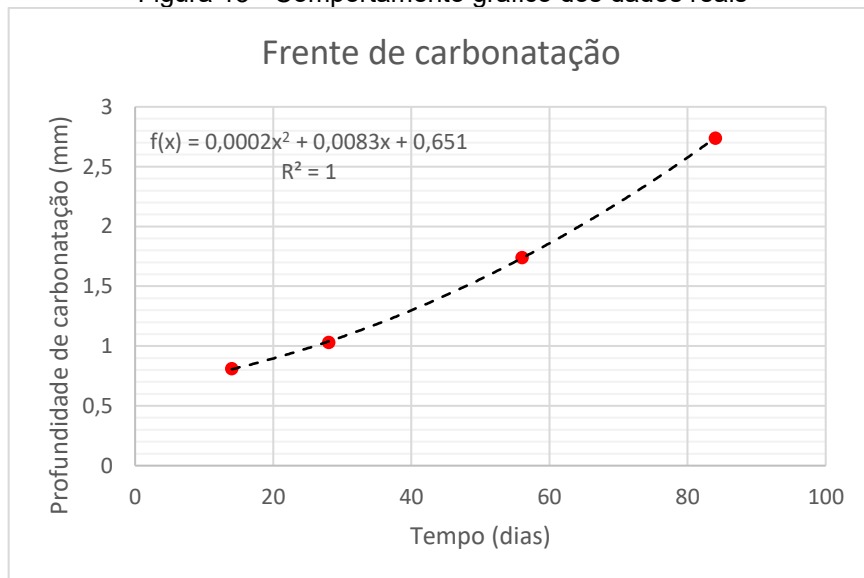
Fonte: próprio autor

Observando os valores obtidos é possível verificar que o comportamento inicial do avanço de agente agressivo se comporta de modo polinomial, ou seja, tende a um crescimento contínuo. No entanto essa afirmativa não é verdadeira devido ao processo de carbonatação ser caracterizado como um processo potencial, tendendo a uma estabilidade, devido à redução de permeabilidade e formação de sais de carbonato na matriz porosa. Esse crescimento contínuo apresentado pode ser justificado pela carbonatação de materiais como C_2S e C_3S que reagem mais rapidamente, porém a quantificação do intervalo no qual o comportamento gráfico da frente carbonatada é polinomial ainda é desconhecido.

Esse comportamento apresentado nas idades iniciais descreve o comportamento de carbonatação em 3 fases devido o comportamento polinomial inicial e o comportamento potencial subsequente, sendo esses trechos caracterizados

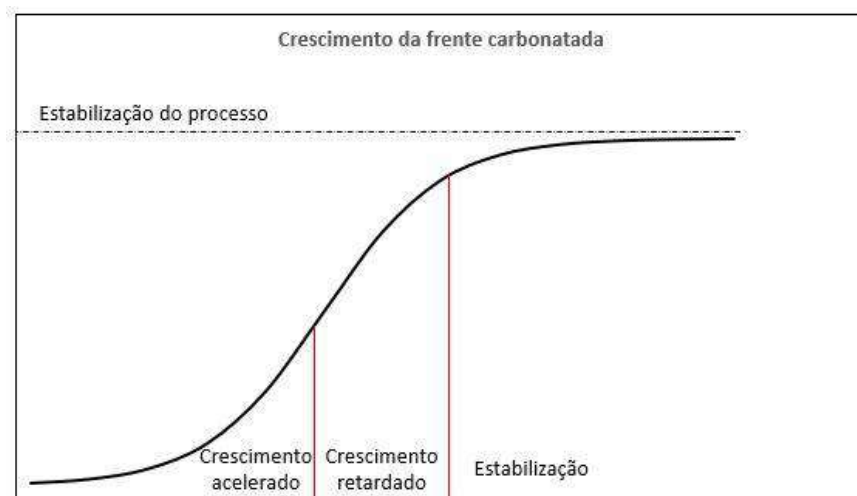
como crescimento acelerado, crescimento retardado e estabilização. Essas modificações de crescimento são decorrentes das diferenças de área de reação e grau de hidratação apresentadas entre o cobrimento do concreto e demais fases do seu interior. O comportamento gráfico dos dados reais e o comportamento hipotético das três fases podem ser observados na Figura 13 e 14. Já na figura 15 é possível observar que a frente de carbonatação ocorreu nas zonas sem brita, ou seja, na pasta de concreto.

Figura 13 - Comportamento gráfico dos dados reais



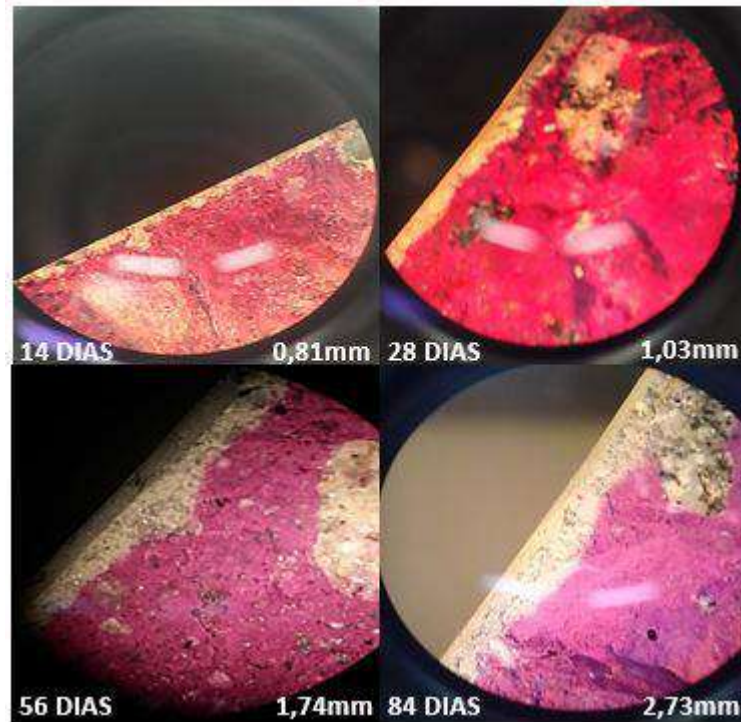
Fonte: próprio autor

Figura 14 - Crescimento hipotético da carbonatação



Fonte: próprio autor

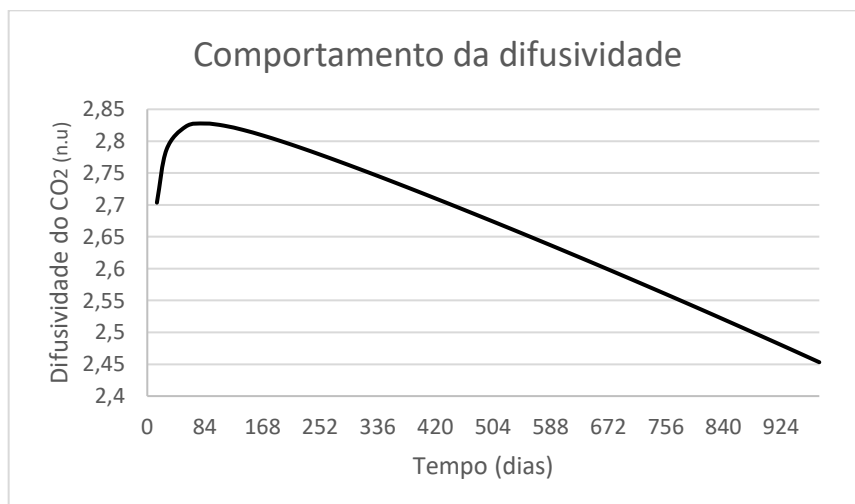
Figura 15 - Frente de carbonatação vista por microscópio



Fonte: próprio autor

Esse comportamento de crescimento acelerado também é apresentado no termo de difusividade modelado desse trabalho, demonstrando certa coerência com o comportamento gráfico da carbonatação para idades iniciais. A figura 16 mostra que até 84 dias a difusividade apresenta crescimento contínuo, sendo que logo após esse período a difusividade é descrita por uma queda do seu valor, os valores superiores a 84 dias foram alcançados por meio de modelagens preditivas. Já tabela 15 apresenta os valores discriminados de difusividade para o intervalo de análise proposto.

Figura 16 - Comportamento gráfico do termo difusivo



Fonte: próprio autor

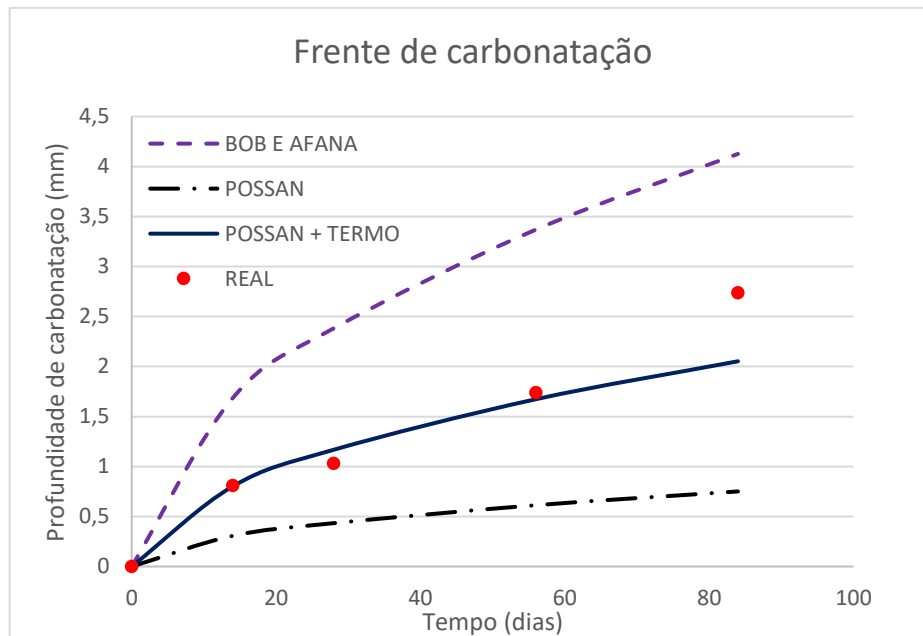
Tabela 15 - Valores discriminados de difusão

DIFUSIVIDADE DO MODELO			
14 (dias)	28 (dias)	56 (dias)	84 (dias)
2,703565	2,786632	2,822845	2,827667

Fonte: próprio autor

Visto essas condições, o termo de difusividade modelado foi posto como substituinte do termo difusivo da equação de Possan (2010) e analisado graficamente, juntamente com as outras duas formulações, sua representatividade em relação aos dados reais dos intervalos propostos, conforme descreve a figura 17.

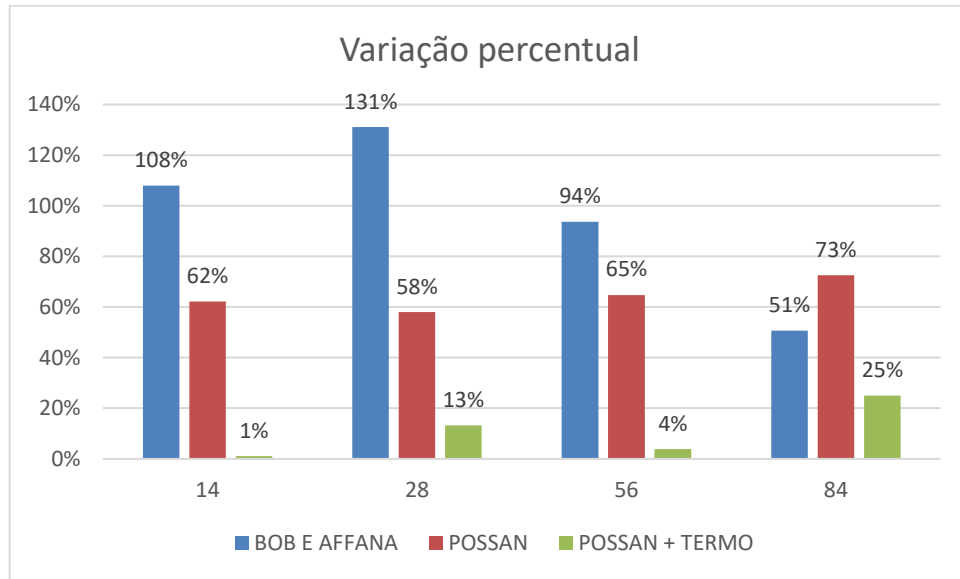
Figura 17 - Comparação dos dados reais e modelos empregados



As equações postas para comparação apresentam certo distanciamento dos dados reais, até o termo de carbonatação modelado e posto junto a equação de Possan apresenta variação, na qual os valores reais podem ser próximos, abaixo ou acima do modelo proposto, demonstrando não homogeneidade ao longo do intervalo.

Desse modo o grau variação das modelagens se mostra imprevisível em relação aos dados reais, ou seja, mesmo que todas as equações modeladas e o próprio fenômeno de carbonatação tenha comportamento potencial tendendo a uma estabilidade, é improvável dizer que o processo de carbonatação pode ser descrito de forma precisa pela reescrita de uma equação qualquer por um valor constante que se aproxime do valor real. A figura 18 demonstra a variação percentual dos resultados formulados em relação aos dados reais.

Figura 18 - Variação das modelagens em relação aos dados reais



No entanto, mesmo com as variações apresentadas, o modelo disposto do termo de difusividade não apresenta variações discrepantes em relação aos resultados reais, tendo apenas o resultado referente aos 84 dias fora do intervalo de desvio padrão proposto para os dados reais.

Nesse caso, os valores da equação de Possan, juntamente com o termo de difusividade, apresenta as menores variações entre os modelos, tendo a sua comutação máxima compreendida em 25% em comparação com a variação mínima de 51% apresentada por Bob e Affana (1993), podendo representar de modo satisfatório a frente carbonatada para o intervalo proposto e condições de exposição.

5 CONCLUSÃO

Foi observado que o termo de difusividade atrelado a penetração de CO₂ pela matriz porosa sofre modificações ao longo do tempo no qual apresenta um aumento gradativo até 84 dias e sofre decaimento após esse intervalo, sendo caracterizado como um termo dinâmico. Esse parâmetro demonstrar forte influência nos resultados das frentes carbonatadas modeladas e pode ser reescrito a partir de fatores como pressão do dióxido de carbono, modificações de porosidade, grau de absorção de CO₂ e área de contato.

O termo modelado pode ser vinculado com equações existentes, equação de Possan, para uma representação mais satisfatória do fenômeno, tendo variações menos impactantes para os resultados finais frente as demais equações analisadas. Os resultados até aqui apresentados possuem limitações em relação ao intervalo analisado e deve ser verificado, em trabalhos futuros, a eficiência da modelagem para concretos de diferentes proporções de água/cimento, diferentes valores de resistência à compressão e submetidos a diferentes agressividades atmosféricas.

REFERENCIAS

ABNT. NBR NM 248 - Agregados - Determinação da composição granulométrica. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 6, 2003.

ABNT. NBR 5739 - Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 14, 2007.

ABNT. NBR NM 67 Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, n. 2, 2009.

ABNT. NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 225, 2014.

ABNT. NBR 5738 Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, p. 8, 2015.

ANDRADE, T.; SILVA, A. J. DA C. E. Considerações sobre durabilidade, patologia e manutenção das estruturas. **Tecomat – Tecnologia da Construção e Materiais Ltda**, v. 25, p. 1–14, 2008.

ARANHA, P. M. Contribuição ao estudo das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado na região Amazônica. **Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre, 1994.**

AUROY, M. et al. Impact of carbonation on unsaturated water transport properties of cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 74, p. 44–58, 2015.

BANTHIA, N.; BIPARVA, A.; MINDESS, S. Permeability of concrete under stress. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 9, p. 1651–1655, 2005.

BENÍTEZ, P. et al. Carbonated structures in Paraguay: Durability strategies for maintenance planning. **XVI INTERNATIONAL CONFERENCE ON BUILDING PATHOLOGY AND CONSTRUCTIONS REPAIR**, v. 11, n. June, p. 60–67, 2018.

BORGES, P. H. R. et al. Carbonation of CH and C-S-H in composite cement pastes containing high amounts of BFS. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 2, p. 284–292, 2010.

C. LE QUERE ET AL. Global carbon budget. **Earth Syst. Sci. data** **6**, p. 235–263, 2014.

CAREVIĆ, V.; IGNJATOVIĆ, I.; DRAGAŠ, J. Model for practical carbonation depth prediction for high volume fly ash concrete and recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 213, p. 194–208, 2019.

CARMONA, T. G. Modelos de previsão de despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação. **Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, 2005.**

CEB - FIB. **Bulletin 34 - Model code for service life design**. [s.l: s.n.].

CHA SW. Modeling of hydration process and analysis of thermal and hygral stresses in hardening concrete. **[PhD Dissertation]South Korea: Seoul National University**, 1999.

CUI, H. et al. Experimental study on effects of CO₂ concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 522–527, 2015.

D. VAN GEMERT. Contribution of concrete-polymer composites to sustainable construction and conservation procedures. **Restoration of Buildings and Monuments**, v. 18, p. 143–150, 2012.

DAS, B. B. et al. Some studies on the effect of carbonation on the engineering properties of concrete. **The Indian Concrete Journal**, v. 86, n. 3, p. 7–12, 2012.

DE WEERDT, K. et al. Effect of carbonation on the pore solution of mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 118, n. February, p. 38–56, 2019.

DHEILLY, R. M. et al. Influence of storage conditions on the carbonation of powdered Ca(OH)₂. **Construction and Building Materials**, v. 16, n. 3, p. 155–161, 2002.

DÍAZ-DÍAZ, F. et al. Embedded NMR sensor to monitor compressive strength development and pore size distribution in hydrating concrete. **Sensors (Switzerland)**, v. 13, n. 12, p. 15985–15999, 2013.

DROUET, E. et al. Carbonation of hardened cement pastes : Influence of temperature. **Cement and Concrete Research**, 2019.

E. F. FÉLIX. Análise paramétrica da carbonatação em estruturas de concreto armado via Redes Neurais Artificiais. **revista ALCONPAT**, p. 16, 2017.

EKOLU, S. O. A review on effects of curing, sheltering, and CO₂ concentration upon natural carbonation of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 127, p. 306–320, 2016.

EKOLU, S. O. Model for practical prediction of natural carbonation in reinforced concrete: Part 1-formulation. **Cement and Concrete Composites**, 2018.

ELLINGWOOD, B. R., FRANGOPOL, D. M. Introduction to the state of the art collection: risk-based lifecycle performance of structural systems. **Journal of Structural Engineering**, v. 142, p. 1, 2016.

FELIX, E. F. DESENVOLVIMENTO DE SOFTWARE PARA A ESTIMATIVA DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO, VIDA ÚTIL E CAPTURA DE CO₂ DE ESTRUTURAS DE CONCRETO EMPREGANDO RNA'S. **Trabalho de conclusão de curso - UNILA Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Centro Interdisciplinar de Tecnologia e Infraestrutura**, 2015.

FELIX, E. F. Modelagem da Deformação do Concreto Armado Devido à Formação dos Produtos de Corrosão. p. 162, 2018.

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

GARCÍA-ALONSO, M. C. . et al. Corrosion behaviour of new stainless steels reinforcing bars embedded in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 1463–1471, 2007.

GRUYAERT E, VAN DEN HEEDE P, DE BELIE N. Carbonation of slag concrete: effect of the cement replacement level and curing on the carbonation coefficient—effect of carbonation on the pore structure. **Cement and Concrete Composites**, 2013.

GULIKERS, J. Predicting residual service life of concrete infrastructure: a considerably controversial subject. **MATEC Web of Conferences**, v. 289, p. 08002, 2019.

HALL, C.; HOFF, W. D. **Water transport in brick, stone and concrete**. 2. ed. London: [s.n.].

HILLS, T. P. et al. Statistical analysis of the carbonation rate of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 72, p. 98–107, 2015.

HOUST, Y. F. The role of moisture in the carbonation of cementitious materials. **Int. J. Restoration Buildings Monuments**, v. 2, p. 49–66, 1996.

HUANG, Q. et al. Numerical analysis of the effect of coarse aggregate distribution on concrete carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 27–35, 2012.

HYVERT, N. Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton. **(Ph.D. Thesis) Toulouse University**, 2009.

HYVERT, N. et al. Dependency of C-S-H carbonation rate on CO₂ pressure to explain transition from accelerated tests to natural carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 11, p. 1582–1589, 2010.

J.D. HAN. Damage mechanism and service life prediction of cementitious materials under loading carbonation coupling effects. **Thesis (PhD), Southeast University, P.R. China**, 2012.

JIANG, Z. L. et al. Statistical analysis of concrete carbonation depths considering different coarse aggregate shapes. **Construction and Building Materials**, v. 229, p. 116856, 2019.

JUNG SH. Diffusivity of carbon dioxide and carbonation in concrete through development of gas diffusion measuring system. **[PhD Dissertation] South Korea: Seoul National University**, 2003.

KARI, O. P., PUTTONEN, J., SKANTZ, E. Reactive transport modelling of long-term carbonation. **Cement and Concrete Composites**, v. 54, p. 42–53, 2014.

KIM, T. K. et al. Performance Based Evaluation of Carbonation Resistance of Concrete According to Various Curing Conditions from Climate Change Effect. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 11, n. 4, p. 687–700, 2017.

KOBAYASHI, K.; SUZUKI, K.; UNO, Y. Carbonation of concrete structures and decomposition of C-S-H. **Cement and Concrete Research**, v. 24, 1994.

KÖLIÖ, A. et al. The corrosion rate in reinforced concrete facades exposed to outdoor environment. **Materials and Structures**, v. 50, p. 1–16, 2017.

KROPP J. Relations between transport characteristics and durability. **RILEM report 12, performance criteria for concrete durability**. London: **E&FN Spon**, p. 97–137, 1995.

KULAKOWSKI, M. P., PEREIRA, F. M., DAL MOLIN, D. C. C. Carbonation-induced reinforcement corrosion in silica fume concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 1189–1195, 2009.

LAGERBLAD, B. Carbon dioxide uptake during concrete life cycle - State of the art. **Cement and Concrete Research**, v. CBI 2005:2, p. 47, 2005.

LARRARD, T. D.; BARY, B.; ADAM, E.; KLOSS, F. Influence of aggregate shapes on drying and carbonation phenomena in 3d concrete numerical samples. **Computational Materials Science**, v. 72, p. 1–14, 2013.

LARRARD, T. DE et al. Influence de la forme des granulats dans un VER de béton numérique sur la cinétique de séchage et de carbonatation atmosphérique. **XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry**, 2012.

LIFECON. Life Cycle Management of Concrete Infrastructures for Improved Sustainability. 2003.

LIU, L.; HA, J.; HASHIDA, T.; TERAMURA, S. Development of a co2 solidification method for recycling autoclaved lightweight concrete waste. **Journal of materials science letters**, p. 1791–1794, 2001.

M.B. SIKKEL, K.T. MACLEOD, F. GORDON, L. BY S. ET AL. Late Sodium Current Inhibition Reverses Electromechanical Dysfunction in Human Hypertrophic Cardiomyopathy. **Circulation** **128**, v. 10, 2013.

MALTE A. PETER, ADRIAN MUNTEAN, SEBASTIAN A. MEIER, M. B. Modelling and simulation of concrete carbonation: competition of several carbonation reactions. **Berichte aus der Technomathematik**. - Bremen: **Universität Bremen**. Document, v. 0503, 2005.

MARTINS, C. A. C. Estimativa da Profundidade de Carbonatação do Concreto com Uso de Redes Neurais. **Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UNICAP, Recife.**, 2011.

MEDEIROS, M. H. F. DE. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1. ed. [s.l.] Ibracon, 2011. p. 37.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. DE O.; HELENE, P. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: **Concreto: ciência e tecnologia**. [s.l.: s.n.]. v. 1p. 773–

808.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, J.M. **Concrete, Microstructure, Properties and Materials**. 3. ed. New York, NY, USA: [s.n.].

MEHTA, P. K. .; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. **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**, v. 229, p. 116925, 2019.

MOLIN, D. C. C. D.; MASUERO, A. B.; POSSAN, E. Contribuição à Previsão da Vida Útil de Estruturas de Concreto. In: KAZMIERCZAK, C. DE S. (Ed.). . **Avaliação de Desempenho de Tecnologias Construtivas Inovadoras: Materiais e Sustentabilidade**. 1º ed. Porto Alegre: [s.n.]. p. 223–270.

MORANDEAU, A.; THIÉRY, M.; DANGLA, P. Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 153–170, 2014.

NEPOMUCENO, A. A. Comportamiento de los morteros de reparacion frente a la carbonatacion y a la penetracion de cloruros en estructuras de hormigon armado dañadas por corrosion de armaduras: estudio mediante la tecnica de resistencia de polarizacion. **Tesis (Doctoral) - Universidad Politecnica de Madrid, Madrid**, 1992.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. [s.l: s.n.].

OMIKRINE METALSSI, O. et al. Consequences of carbonation on microstructure and drying shrinkage of a mortar with cellulose ether. **Construction and Building Materials**, v. 34, p. 218–225, 2012.

P. WOYCIECHOWSKI. Model of concrete carbonation. **Scientific Notebooks - Buiding 157, CD-ROM**, 2013.

PAPADAKIS, V. G. Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. **ACI Materials Journal**, 1991.

PAPADAKIS, V. G. Effect of supplementary cementing materials on concrete resistance against carbonation and chloride ingress. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 2, p. 291–299, 2000.

PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. Effect of Composition, Environmental Factors and Cementlime Motor Coating on Concrete Carbonation. **Materials and Structures**, v. 25, p. 293–304, 1992.

PARK, D. C. Carbonation of concrete in relation to CO₂ permeability and degradation of coatings. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 11, p. 2260–2268, 2008.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; MOLIN, D. C. C. D. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Revista ambiente contruido**, p. 7–20, 2007.

PETER A. CLAISSE. **Transport Properties of Concrete Measurement and Applications**. 1. ed. Oxford: [s.n.].

PETER, M. A. et al. Competition of several carbonation reactions in concrete: A parametric study. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 12, p. 1385–1393, 2008.

PHAM, S. T.; PRINCE, W. Effects of Carbonation on the Microstructure of Cement Materials: Influence of Measuring Methods and of Types of Cement. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 8, n. 4, p. 327–333, 2014.

POSSAN, E. CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA CARBONTAÇÃO DO CONCRETO COM ADIÇÃO DE SÍLICA ATIVA EM AMBIENTE NATURAL E ACELARADO. **Dissertação (mestrado em engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul**, 2004.

POSSAN, E. Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano. **Tese (Doutorado em engenharia civil) - programa de pós-graduação em engenharia civil - PPGEC/UFRGS, Porto Alegre**, n. June 2010, 2010.

POSSAN, E.; FELIX, E. F.; THOMAZ, W. A. CO₂ uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, n. 1, p. 1–9, 2016.

PRUESS, K.; OLDENBURG, C.; MORIDIS, G. TOUGH2 User's Guide. **Report LBNL-43134**, n. September, p. 210, 1999.

R. J. MILLINGTON. Gas Diffusion in Porous Media. **Science**, 1959.

RIGO, E.; OLIVEIRA, C. E. DE; POSSAN, E. Aplicação de modelagem matemática para fins de previsão de vida útil de estruturas de concreto sujeitas à ação de CO₂. **3º Simpósio paranaense de patologia das construções - 3ºSPPC**, n. May, p. 245–256, 2018.

RILEM RECOMMENDATIONS. CPC-18 Measurement of hardened concrete carbonation depth. **TC56-MHM HYDROCARBON MATERIALS TC56-MHM MATRIAX HYDROCARBON** CPC-18, 1988.

ROY, S. K.; POH, K. B.; NORTHWOOD, D. O. Durability of Concrete–Accelerated Carbonation and Weathering Studies. **Cement and Concrete Research**, v. 34, p. 597–606, 1999.

RUAN, X.; PAN, Z. Mesoscopic simulation method of concrete carbonation process. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 8, n. 2, p. 99–110, 2012.

S.-H. HAN, W.-S. PARK, E.-I. YANG. Evaluation of concrete durability due to carbonation in harbour concrete structures. **Constr. Build. Mater**, v. 48, p. 1045–1049, 2013.

SAETTA A. V.; VITALIANI, R. V. Investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures. Part I: theoretical formulation. **Cement and Concrete Research**, v. 34, 2004.

SALES, A. et al. **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. 1. ed. Rio de Janeiro: [s.n.].

SALVOLDI, B. G.; BEUSHAUSEN, H.; ALEXANDER, M. G. Oxygen permeability of concrete and its relation to carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 85, p. 30–37, 2015.

SARJA, A.; VESIKARI, E. Durability Design of Concrete Structures. **RILEM Technical Committee 130-CLS, RILEM Report 14**, 1994.

SATO, N. M. N.; AGOPYAN, V. ANÁLISE DA POROSIDADE E DE PROPRIEDADES DE TRANSPORTE DE MASSA EM CONCRETOS. [S.I: s.n.], 1998.

SCHMITT, G. A., ET AL. Global needs for knowledge dissemination, research, and development in materials deterioration and corrosion control. **The World Corrosion Organization, New York, USA.**, 2009.

SHAH, V. et al. Changes in microstructure characteristics of cement paste on carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 109, n. September 2017, p. 184–197, 2018.

SILVA, M. et al. Eficiência dos modelos de predição da evolução da carbonatação. **Congresso Brasileiro do Concreto - CBC**, v. 61, n. 1, 2019a.

SILVA, M. D. S. et al. Avanço da carbonatação em concretos para idades iniciais. **II Simpósio Brasileiro sobre reabilitação das construções - SBREB II**, 2019b.

SILVA, M. DE S. et al. REDUÇÃO DA CARBONATAÇÃO NATURAL EM CONCRETOS COM PROTEÇÃO ACRÍLICA. **15º Congresso internacional de patologias y recuperación de estructuras**, 2019c.

SILVA, M. DE S. et al. LIMITAÇÕES NO AVANÇO DO PROCESSO DE CARBONATAÇÃO. **CBPAT - Congresso Brasileiro de Patologia das construções**, p. 1239–1246, 2020.

SONG, H.; KWON, S. Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 909–915, 2007.

T. MORI, K.; SHIROYAMA, K.; KAMIMURA, A. YODA. On carbonation of Portland blast-furnace slag cement concrete. **General Meeting Cement Association of Japan**, 1972.

TA, V. L. et al. A new meta-model to calculate carbonation front depth within concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 129, p. 172–181, 2016.

TAFFESE, W. & SISTONEN, E. Machine learning for durability and service-life assessment of reinforced concrete structures : Recent advances and future directions. **Automation in Construction**, v. 77, p. 1–14, 2017.

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

VON GREVE-DIERFELD, S. et al. **Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC.** [s.l: s.n.]. v. 53

Y. FANG, J. CHANG. Microstructure changes of waste hydrated cement paste induced by accelerated carbonation. **Constr. Build. Mater**, v. 6, p. 360–365, 2015.

YANG, K. H.; SEO, E. A.; TAE, S. H. Carbonation and CO₂ uptake of concrete. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 46, p. 43–52, 2014.

YANG, K. H.; SONG, J. K.; SONG, K. IL. Assessment of CO₂ reduction of alkali-activated concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 39, p. 265–272, 2013.

YLMÉN, R.; JÄGLID, U. Carbonation of Portland Cement Studied by Diffuse Reflection Fourier Transform Infrared Spectroscopy. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 7, n. 2, p. 119–125, 2013.

YOON, I. S.; ÇOPUROĞLU, O.; PARK, K. B. Effect of global climatic change on carbonation progress of concrete. **Atmospheric Environment**, v. 41, n. 34, p. 7274–7285, 2007.