



**LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO DE PARÂMETROS
E TENDÊNCIA DE COMPORTAMENTO DA FRENTE DE
CARBONATAÇÃO ACELERADA EM CONCRETOS**

**DANIEL MARCOS VIEIRA QUEIROZ
NICOLLI ZUCHETTI IACOBUCCI**

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA CIVIL



**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO DE PARÂMETROS E
TENDÊNCIA DE COMPORTAMENTO DA FRENTE DE
CARBONATAÇÃO ACELERADA EM CONCRETOS**

**DANIEL MARCOS VIEIRA DE QUEIROZ
NICOLLI ZUCHETTI IACOBUCCI**

ORIENTADOR (A): VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM SISTEMAS
CONSTRUTIVOS E MATERIAIS**

BRASÍLIA / DF: MAIO/2021

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO DE PARÂMETROS E
TENDÊNCIA DE COMPORTAMENTO DA FRENTE DE
CARBONATAÇÃO ACELERADA EM CONCRETOS**

DANIEL MARCOS VIEIRA DE QUEIROZ
NICOLLI ZUCHETTI IACOBUCCI

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

APROVADA POR:

ORIENTADORA: **PROF^a VALDIRENE MARIA SILVA CAPUZZO, D. Sc. (ENC-UnB)**

EXAMINADOR INTERNO: **PROF^a RODRIGO DE MELO LAMEIRAS, D.Sc. (ENC-UnB)**

EXAMINADORA EXTERNA: **ENG^a CIVIL MARA MONALIZA LINHARES PEREIRA, M.Sc.**

Brasília, 20 de maio de 2021.

FICHA CATALOGRÁFICA

QUEIROZ, DANIEL MARCOS VIEIRA; IACOBUCCI, NICOLLI ZUCHETTI

Levantamento Bibliográfico de Parâmetros e Tendência de Comportamento da Frente de Carbonatação Acelerada em Concretos [Distrito Federal] 2021.

xxi, 73p., 297 mm, (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2021)

Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

- | | |
|-------------------------------|---|
| 1. Concreto | 2. Carbonatação |
| 3. Tendência de comportamento | 4. Fatores que interferem na profundidade de carbonatação |

I. ENC/FT/UnB

II. Título (bacharel)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Queiroz, D. M. V.; Iacobucci, N. Z. (2021). Interferência do fluxo direcional de difusão do dióxido de carbono na profundidade da frente de carbonatação.

Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, 73p.

CESSÃO DE CRÉDITOS

NOME DOS AUTORES: Daniel Marcos Vieira de Queiroz e Nicolli Zuchetti Iacobucci

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Levantamento Bibliográfico de Parâmetros e Tendência de Comportamento da Frente de Carbonatação Acelerada em Concretos.

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2021

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Daniel Marcos Vieira de Queiroz

QNM 05 conjunto C casa 7

CEP: 72215-053

Brasília / DF – Brasil

Nicolli Zuchetti Iacobucci

Qs 7 rua 800 lote 6/8 bloco C apt 104

CEP: 71971-540

Brasília / DF – Brasil

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar e de forma especial, à Deus, por nos conceder vida, saúde e todas as condições necessárias para realizar mais um sonho. Pedimos a Ele que nos conceda sabedoria e graça para a excelência no exercício da profissão.

Aos nossos pais e familiares pelo carinho, compreensão e apoio físico e emocional. Sem eles seria impossível chegar aqui.

Peço licença ao Daniel, para fazer um agradecimento especial às minhas irmãs, Nathalia e Giovanna, desde que nasci nunca me vi sozinha, sempre acompanhada das melhores risadas e das melhores vivências, a vida seria sem graça sem vocês. Também agradeço ao meu namorado Lucas Cruz e futuro noivo, pelo apoio incondicional, incentivo e ajuda, me acalmou em momentos de surto e me fortaleceu em dias de incerteza. Com toda certeza do mundo esse futuro diploma também é mérito dele. E gostaria de agradecer as pessoas mais importantes da minha vida, meus pais. Eles sempre estiveram ao meu lado, me ensinaram tudo o que sei, e são a minha maior inspiração de pessoas honestas, trabalhadoras e de caráter que eu já conheci em toda a minha vida, são minhas referências de Cristo na terra, são meu porto seguro e tenho certeza que sempre independente de qualquer coisa estarão ao meu lado. Obrigada por tanto!

Aos nossos amigos que nos propiciaram momentos de descontração em meio às dificuldades e lutas.

À nossa orientadora Valdirene por proporcionar, mais que qualquer um, carinho, paciência e disposição. Existe pouco professor como a senhora, só Deus pode recompensá-la.

À Universidade de Brasília pelo ensino de qualidade e pela estrutura que possibilitou nossa permanência até a etapa final da graduação.

RESUMO

O estudo da frente de carbonatação para concretos e a verificação de como ele se comporta em sua aplicação acontece através de ensaios acelerados, com o controle de variáveis intervenientes. A carbonatação é um tema de relevância por estar associado à durabilidade do concreto. Em 2015, a ISO 1920-12:2015 estabeleceu um padrão de ensaio de carbonatação acelerada, entretanto, grande parte dos estudos que envolvem o assunto, não seguem este padrão, o que dificulta a comparação fidedigna entre os resultados. A falta de padronização diz respeito, geralmente, aos fatores ambientais e aos procedimentos experimentais necessários para a realização de ensaios experimentais. Nesse sentido, este trabalho avaliou a variabilidade que existe nos últimos estudos publicados, no que diz respeito às condições aplicadas para a realização dos ensaios de carbonatação acelerada. Pesquisou-se os trabalhos publicados dos últimos 5 anos, após publicação da ISO 1920-12:2015, a fim de verificar as variâncias de realização dos ensaios. Também foi analisada a tendência do comportamento relacionando a profundidade de carbonatação com aspectos importantes do concreto que influenciam diretamente o seu comportamento. Determinou-se, para concretos convencionais e concretos com agregados reciclados, as relações entre: a profundidade de carbonatação (mm) x relação água/aglomerante; profundidade de carbonatação (mm) x consumo de cimento (kg/m^3); e a comparação entre a profundidade de carbonatação (mm) para ambos os tipos de concreto. Constatou-se que há uma grande diversidade nos tipos de corpos de prova, idade dos ensaios, temperatura, umidade relativa e concentração de CO_2 , comprovando que mesmo com a introdução da ISO 1920-12:2015 ainda há uma variação de métodos de ensaio. A relação entre a profundidade de carbonatação e a relação água/aglomerante acontece de forma linear, ou seja, a relação é diretamente proporcional e quando a relação de água/aglomerante aumenta a profundidade de carbonatação também aumenta. Também foi verificado que quanto maior o consumo de cimento menor a profundidade de carbonatação. E, comparando os resultados entre os dois tipos de concreto, verificou-se que o avanço da profundidade de carbonatação para concretos com agregados reciclados é mais intenso do que para concretos convencionais. Assim, neste trabalho foram avaliados os principais parâmetros de ensaio e outros fatores que interferem na carbonatação.

Palavras-chave: Concreto; Carbonatação; Tendência de comportamento; Fatores que interferem na profundidade de carbonatação.

ABSTRACT

The study of the carbonation front for concretes and the verification of how it behaves in its application occurs through accelerated tests, with the control of intervening variables. Carbonation is a brand theme because it is associated with the durability of concrete. In 2015, the ISO 1920-12: 2015 accelerated carbonation test standard, however, most studies involving the subject do not follow this standard, which makes it difficult to make a reliable comparison between the results. The lack of standardization generally concerns environmental factors and experimental procedures for carrying out experimental tests. In this sense, this work evaluated the variability that exists in the latest published studies, with regard to the conditions applied for the performance of the accelerated carbonation tests. The published works of the last 5 years, after publication of ISO 1920-12: 2015, were researched in order to verify the variances of the tests. The behavior trend was also analyzed, relating the carbonation depth to important aspects of the concrete that directly influence its behavior. For conventional concrete and concrete with recycled aggregates, the relationships between: the depth of carbonation (mm) x water / binder ratio were determined; carbonation depth (mm) x cement consumption (kg / m³); and the comparison between the carbonation depth (mm) for both types of concrete. It was found that there is a great diversity in the types of test, age of the tests, temperature, relative humidity and CO₂ concentration, proving that even with the introduction of ISO 1920-12: 2015 there is still a variation of test methods. The relationship between the carbonation depth and the water / binder ratio happens in a linear way, that is, the relationship is directly and when the water / cement ratio increases, the carbonation depth also increases. It was also found that the higher the cement consumption, the lower the carbonation depth. And, comparing the results between the two types of concrete, it was found that the advance of the carbonation depth for concretes with recycled aggregates is more intense than for conventional concretes. Thus, in this work, the main parameters that interfere with carbonation were taken.

Keywords: Concrete; Carbonation; Behavior trend; Factors that interfere with the depth of carbonation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	IMPORTÂNCIA DO TEMA	1
1.2	MOTIVAÇÃO	2
1.3	OBJETIVO GERAL	2
1.4	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.5	ESTRUTURA DA MONOGRAFIA	3
2	REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1	CONCRETO CONVENCIONAL	5
2.2	DURABILIDADE APLICADA ÀS CONCRETOS	6
2.3	CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS	11
2.4	FATORES INFLUENTES NA CARBONATAÇÃO	21
2.5	RECOMENDAÇÕES DE ISO 1920-12:2015	24
2.6	CONCRETOS CONTENDO AGREGADOS RECICLADOS	25
3	METODOLOGIA	27
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1	PARÂMETROS DE ENSAIOS	31
4.1.1	Temperatura	31
4.1.2	Umidade relativa	32
4.1.3	Utilização de fenolftaleína	34
4.1.4	Concentração de CO_2	34
4.1.5	Idade dos ensaios	37
4.1.6	Tipos de corpos de prova	38
4.2	IMPACTO DA RELAÇÃO ÁGUA E AGLOMERANTE	39
4.2.1	Concreto convencional	39
4.2.2	Concreto com agregados reciclados	42
4.3	IMPACTO DO CONSUMO DE CIMENTO	43
4.3.1	Concreto convencional	43
4.3.2	Concreto com agregados reciclados	46
4.4	COMPARAÇÃO ENTRE OS CONCRETOS CONVENCIONAIS E CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS NA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	47
5	CONCLUSÃO	49

6	REFERÊNCIAS	51
----------	--------------------------	-----------

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Possibilidade de ciclo de degradação de uma estrutura de concreto armado	6
Figura 2	Diagrama de equilíbrio termodinâmico, potencial versus pH, para o sistema Fe - H ₂ O	8
Figura 3	Corrosão generalizada pela carbonatação do concreto e pela ação de íons cloreto	9
Figura 4	Diagrama de equilíbrio termodinâmico, potencial versus pH, para o sistema Fe - H ₂ O	12
Figura 5	Representação esquemática da penetração de CO ₂ por difusão e do processo de carbonatação	13
Figura 6	Exemplificação do uso da fenolftaleína como indicador de pH	14
Figura 7	Fluxograma organizacional das atividades realizadas	27
Figura 8	Modelo de planilha utilizado para elaboração da base de dados	28
Figura 9	Variedade de temperatura em função da quantidade de dados coletados.	30
Figura 10	Variedade de umidade relativa nos dados coletados	31
Figura 11	Utilização da fenolftaleína nos estudos para indicador pH no corpo de prova	33
Figura 12	Variedade de concentração de CO ₂ nos dados coletados	34
Figura 13	Profundidade de carbonatação em concreto para diferentes concentrações	35
Figura 14	Variedade das idades das realizações de ensaios nos dados coletados	36
Figura 15	Variabilidade dos tipos de corpos de prova em função da quantidade de amostras	37
Figura 16	Relação entre relação água/aglomerantes e a profundidade de carbonatação acelerada com 7 dias de exposição ao CO ₂	38
Figura 17	Relação entre relação água/aglomerantes e a profundidade de carbonatação acelerada com 14 dias de exposição ao CO ₂	39
Figura 18	Relação entre relação água/aglomerantes e a profundidade de carbonatação acelerada com 28 dias de exposição ao CO ₂	39
Figura 19	Relação entre relação água/aglomerantes e a profundidade de carbonatação acelerada com 56 dias de exposição ao CO ₂	40
Figura 20	Relação entre relação água/aglomerantes e a profundidade de carbonatação acelerada com 91 dias de exposição ao CO ₂	40
Figura 21	Relação água/aglomerantes em função da profundidade de carbonatação para concreto com agregados reciclados contemplando todas as idades de ensaio	41

Figura 22	Relação entre o consumo de cimento e a profundidade de carbonatação acelerada com 7 dias de exposição ao CO_2	42
Figura 23	Relação entre o consumo de cimento e a profundidade de carbonatação acelerada com 14 dias de exposição ao CO_2	43
Figura 24	Relação entre o consumo de cimento e a profundidade de carbonatação acelerada com 28 dias de exposição ao CO_2	43
Figura 25	Relação entre o consumo de cimento e a profundidade de carbonatação acelerada com 56 dias de exposição ao CO_2	44
Figura 26	Relação entre o consumo de cimento e a profundidade de carbonatação acelerada com 91 dias de exposição ao CO_2	44
Figura 27	Consumo de cimento em função da profundidade de carbonatação para concreto com agregados reciclados contemplando todas as idades de ensaio	46
Figura 28	Comparação de resultados em concreto convencional e concreto contendo agregado reciclado	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Referências de execução dos ensaios nas pesquisas analisadas envolvendo ensaio de carbonatação acelerada	15
----------	--	----

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS, ABREVIACÕES

a/c	Relação água/aglomerantes
CC	Concreto convencional
$D_{\text{máx}}$	Diâmetro máximo
ARC	Agregados Reciclados
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
$CA(OH)_2$	Hidróxido de Cálcio
Ca^{2+}	Cátio de Cálcio
$CaCO_3$	Carbonato de Cálcio
cm	Centímetros
CO_2	Gás Carbônico (Dióxido de Carbono)
CO_3^{2-}	Carbonato de Sódio
CP	Corpo de Prova
CP II F-40	Cimento Portland composto com fíler
ČSN EN	Norma Tchecoslováquia
DF	Distrito Federal
EN	Normas Europeias
FA	Concreto feito com grande quantidade de cinzas volantes
FeO	Óxido de ferro (II)
Fe_2O_3	Óxido de ferro (III)
Fe_3O_4	Óxido de ferro (II, III)
$Fe(OH)_2$	Hidróxido de ferro
$Fe(OH)_3$	Hidróxido de ferro (III)
fck	Resistência característica
Gpa	Giga Pascal (10^9 Pa)
H^+	Cátio de Hidrogênio
H_2O	Água
HCO_3^-	Bicarbonato
ISO	International Organization for Standardization
K	Coefficiente de carbonatação
kg	Quilogramas
LABEST/UnB	Laboratório de Estruturas da Universidade de Brasília (UnB)
LEM/UnB	Laboratório de Ensaio de Materiais da Universidade de Brasília
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
m^3	Metros Cúbicos
mm	Milímetros
MPa	Mega Pascal (106 Pa)
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul
°C	Graus Célsius
OH^-	Hidroxila
PF-I	Projeto Final I
pH	Potencial Hidrogênico
PP	adição de fibras de polipropileno
RC	Traço de referência
RCA	Concreto reciclado
RILEM	

International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials,
Systems and Structures

T Tempo de exposição ao meio de carbonatação em semanas.
UnB Universidade de Brasília
UNE Normatização espanhola
X Profundidade de carbonatação em mm

1 INTRODUÇÃO

1.1 IMPORTÂNCIA DO TEMA

O ramo da construção civil tem, cada vez mais, apresentado inovações e padronizações que elevam o padrão de qualidade das construções, além de possibilitarem maior velocidade de execução. A dosagem do concreto é determinada de modo a permitir sua funcionalidade na estrutura a qual será aplicado, de modo a atender aos requisitos de resistência para sua função na estrutura a qual será aplicado, devendo ser capaz de resistir aos ataques do meio em que será exposto. A durabilidade depende de vários fatores tais como: ambiente em que foram aplicados, materiais e dosagens utilizados, execução e manutenção (NEVILLE, 2016).

Ações externas, tanto de natureza química quanto de natureza física, podem influenciar maleficamente o concreto de forma a gerar danos e comprometer seu funcionamento (NEVILLE, 2016). Por esse motivo, existe uma preocupação com a durabilidade de concreto, sendo este um dos pontos de maior relevância para garantir eficiência durante a sua vida útil.

A carbonatação, a depender das condições de umidade e presença de oxigênio, pode ser um exemplo de ataque do meio externo à estrutura em concreto armado. Este fenômeno consiste em uma reação que ocorre no concreto na presença de dióxido de carbono. Ela é influenciada pela dosagem e propriedades dos materiais componentes, adensamento, mistura, ambiente inserido, entre outros (MEIRE, 2017). Em geral, a carbonatação não é considerada como patologia, inclusive traz aspectos importantes para o concreto, como a redução de porosidade, aumentando sua resistência. Porém, vale salientar que também traz a redução de pH e, com essa redução, a armadura se despassiva de forma que quando na presença de umidade pode ocasionar o início de processo corrosivo (RIBEIRO, 2013). Há 40 anos a carbonatação e os seus fatores associados vêm sendo estudados. Porém, há uma dispersão muito grande de padronização de realização de ensaios, existindo recomendações ou normas locais pouco difundidas (PAULETTI, 2007).

Um agravante do efeito da corrosão é a demora em apresentar sinais, o que dificulta a sua identificação e retarda a procura por manutenção. Sendo assim fica clara a necessidade de um estudo baseado nas condições e propriedades do ambiente em que o concreto será

aplicado (RIBEIRO, 2013; MEIRA, 2017).

No ano de 2015 foi publicada a ISO 1920-12:2015, na qual é regulamentado o processo do ensaio de carbonatação, porém não se tem muitos estudos que utilizem essa abordagem e possibilitem uma avaliação mais profunda das informações extraídas dos ensaios de carbonatação em concretos. Dessa forma, esse trabalho avaliou um período pós-publicação da ISO 1920-12:2015, ou seja, de 2016 a 2020. Foi averiguada as condições de ensaio realizadas para 40 estudos mais relevantes, de modo a extrair desses resultados informações que pudessem avaliar se ainda há divergência de condições para execução dos ensaios e qual seria a tendência do comportamento de parâmetros do concreto relacionados com a profundidade de carbonatação.

1.2 MOTIVAÇÃO

A produção deste trabalho foi motivada pela necessidade de padronização entre os ensaios de carbonatação em concreto para criação de um banco de dados e um histórico de resultados baseados na ISO 1920-12:2015, facilitando as avaliações fidedignas e de maneira com que possam ser comparadas. A ISO 1920-12:2015 trata da determinação da resistência à carbonatação do concreto pelo método da carbonatação acelerada. Dentre os principais padrões estabelecidos por esta norma, destaca-se a necessidade da aplicação do fluxo unidirecional de dióxido de carbono.

Por conta de a padronização ter sido estabelecida em norma recentemente, grande parte das publicações encontradas na literatura é baseada em ensaios que não seguem o padrão estabelecido. Espera-se que esta pesquisa contribua para o desenvolvimento científico e tecnológico de estudos relacionados ao concreto, especialmente no que diz respeito à carbonatação acelerada. A elaboração desta monografia faz parte da linha de pesquisa, “Tecnologia, Processos, Componentes e Materiais de Construção”, da área de Sistemas Construtivos e Materiais da Universidade de Brasília (UnB).

1.3 OBJETIVO GERAL

Esta monografia tem como objetivo a avaliação dos parâmetros de ensaio de carbonatação acelerada e outros fatores que interferem nos resultados do comportamento da frente de carbonatação no concreto por meio de dados obtidos nos trabalhos experimentais mais relevantes relacionados à carbonatação acelerada publicados dos últimos cinco anos.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo geral foi obtido pelos seguintes objetivos específicos:

- Analisar o banco de dados referente aos parâmetros de ensaio utilizados para cada um dos estudos em comparação ao prescrito pela ISO 1920-12:2015.
- Avaliar a influência da relação água/aglomerante na profundidade de carbonatação acelerada em concreto convencional e concreto com agregado reciclado.
- Avaliar a influência do consumo de cimento na profundidade de carbonatação acelerada em concreto convencional e concreto com agregado reciclado.
- Analisar comparativamente a profundidade de carbonatação acelerada alcançada em concreto convencional e concreto contendo agregado reciclado.

1.5 ESTRUTURA DA MONOGRAFIA

O conteúdo desta monografia foi dividido em cinco capítulos, conforme apresentado abaixo.

O capítulo 1 consiste na introdução do trabalho. São apresentadas a importância e motivação do tema, bem como os objetivos gerais e específicos deste estudo.

O capítulo 2 apresenta uma breve revisão da literatura em relação ao tema. São apresentados os conceitos básicos em relação às propriedades do concreto, durabilidade de estruturas, o fenômeno de corrosão, a carbonatação e o ensaio de carbonatação acelerada. Por fim, são apresentados os principais resultados esperados do comportamento da profundidade de carbonatação em relação às variáveis que afetam o seu desempenho e um breve resumo acerca de concretos com agregados reciclados.

O capítulo 3 apresenta a metodologia que foi adotada para realizar o banco de dados e a organização para a análise desses resultados. No capítulo 4 encontram-se as análises de resultados e discussões a respeito do tema. O quinto capítulo traz as conclusões obtidas. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no estudo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nesta etapa é feita uma revisão sobre os conceitos encontrados na literatura técnica com relação ao concreto convencional, suas propriedades e durabilidade, mecanismos da carbonatação, os parâmetros relacionados à carbonatação e o ensaio de carbonatação acelerada. Ademais, tem-se como foco analisar a variabilidade dos resultados de ensaios de carbonatação acelerada de concretos convencionais e concretos com agregados reciclados, e realizar uma comparação com os métodos pré-estabelecidos pela ISO 1920-12:2015. Dessa forma, será possível avaliar a tendência de comportamento das variáveis intervenientes que influenciam na profundidade de carbonatação alcançada com os ensaios experimentais acelerados, e verificar se essa análise de comportamento se cumpre conforme o esperado.

2.1 CONCRETO CONVENCIONAL

O concreto é o segundo material mais utilizado pelo ser humano, ficando atrás somente da água. É também frequentemente usado no ramo da construção civil por conta de sua alta resistência mecânica, excelente durabilidade e baixo custo (MAZZA, 2015). Existem vários motivos que elevam a demanda por este material, dentre os quais se destacam sua ampla aplicabilidade, uma maior durabilidade dos componentes e um menor custo (RIBEIRO *et al.*, 2013).

Apesar de apresentar grandes vantagens para aplicação em estruturas, a carbonatação apresenta algumas propriedades que, por vezes, podem restringir sua aplicação. Uma das principais é o fato do concreto ser considerado um material frágil, sendo que quanto maior a sua resistência à compressão maior a sua fragilidade. Além disso, o concreto apresenta baixa resistência à tração e baixa resistência à propagação e abertura de fissuras (AFROUGHSABET; OZBAKKALOGLU, 2015).

De acordo com Nili & Afroughsabet (2012), é importante na ciência de estudo do concreto, verificar as melhorias de suas propriedades no estado endurecido. O estudo se faz necessário por se tratar de uma mistura heterogênea que necessita de análises mais avançadas de forma a garantir o seu desempenho, principalmente relacionados a ambientes agressivos. (MAZZA, 2015).

O concreto desempenha o papel de resistir a diversas solicitações com intensidades diferentes, de acordo com a configuração da estrutura e dos carregamentos. Dentre as propriedades relacionadas ao seu desempenho mecânico, as mais verificadas são a resistência à compressão, à tração e o módulo de elasticidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014). As propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido são avaliadas para que se possam estabelecer relações com o desempenho necessário no ambiente da sua utilização. Além disso, as características do concreto variam em função da dosagem e das propriedades dos materiais aplicados.

2.2 DURABILIDADE APLICADA ÀS CONCRETOS

Durabilidade é definida pela Norma Técnica ABNT NBR 6118:2014 como a “capacidade de uma estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”. Os mecanismos de envelhecimento e deterioração do concreto citados na norma são: lixiviação, expansão por sulfato e reação álcali-agregado, além dos mecanismos relativos à armadura e a agressividade do ambiente. Dessa forma, a principal característica de uma estrutura durável é ser capaz de resistir aos mais variados ataques do ambiente, mantendo sua integridade no que diz respeito aos requisitos de qualidade durante o seu tempo de serviço.

De forma semelhante, a ASTM E632-82:1996 trata a durabilidade do concreto como a capacidade de manter-se em serviço ou utilização, para desempenhar as funções que foram determinadas no projeto durante um período de tempo.

Uma estrutura é durável, quando mantém desempenho necessário para desempenhar a função a qual foi projetada durante o período de vida útil, sob a influência de fatores de degradação (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Para Neville & Brooks (2010), o estudo sobre durabilidade do concreto é essencial para ampliar a capacidade de análise de desempenho do concreto, durante todo o ciclo de vida de uma estrutura. A redução da durabilidade pode ocorrer tanto devido à ação de agentes externos oriundos do ambiente quanto por agentes internos ao concreto.

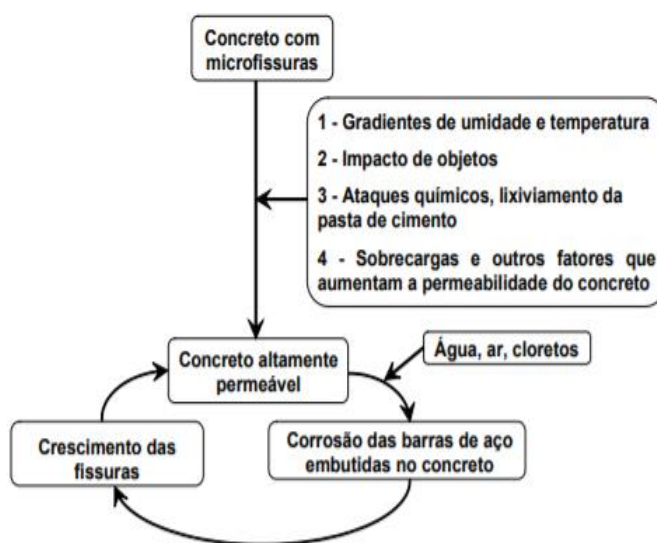
Alguns parâmetros influenciam a durabilidade de uma estrutura de concreto, dentre eles estão: a espessura do cobrimento da armadura, a qualidade da execução e a deformabilidade da estrutura. Para garantir essa condição, é necessária a verificação de

quatro fatores indispensáveis: a composição do concreto, a compactação, a cura e o cobrimento das armaduras (HELENE, 1993).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a realização de reparos em estruturas que obtiveram falha de materiais têm sido muito comuns, trazendo impactos significativos no orçamento total das construções. Estima-se que cerca de 40% dos recursos destinados na indústria de construção civil, é destinada a aplicação de reparos e manutenções de estruturas já existentes.

O agravamento de uma estrutura de concreto geralmente não está relacionada a um único fator, mas também às combinações de causas físicas e químicas. Para qualquer uma dessas causas, a qualidade do concreto, a aplicabilidade da estrutura e o meio em qual está inserida, têm interferências diretas no processo de degradação da estrutura (SILVA, 2007). Uma possibilidade de representação para o ciclo de degradação está apresentada na Figura 1.

Figura 1 - Possibilidade de ciclo de degradação de uma estrutura de concreto armado.



Fonte: MONTEIRO, Notas de aula.

Dentre os problemas que afetam a durabilidade destaca-se a corrosão de armaduras, podendo gerar danos de grande impacto, tanto no quesito econômico quanto pelas dificuldades enfrentadas para realizar recuperação, de modo que funcione em longo prazo (PAULETTI, 2004).

A corrosão pode ser definida como um processo de deterioração da estrutura devido às interações com o meio ambiente. Ocorre normalmente em metais através de reações químicas ou eletroquímicas. Esse processo se deve à tendência que os materiais têm de tomar a forma mais estável, ou seja, de menor energia. Elas podem ou não estar associadas a fenômenos físicos ou mecânicos (MEIRA, 2017; RIBEIRO *et al.*, 2014).

Em geral, as reações de corrosão de origem química não representam grande problema na construção civil. Porque além de se tratar de uma reação de baixa velocidade, os produtos de reação acabam por formar uma camada de proteção, o que ainda desacelera a reação (GENTIL, 1996; HELENE, 1993). Já em termos práticos, a deterioração por oxirredução representa um problema às estruturas por se tratar de um processo espontâneo. O aço naturalmente tende a oxidar, cedendo elétrons, ao passo que o oxigênio presente no concreto recebe elétrons ocasionando um processo de redução (MEIRA, 2017).

A formação de óxidos e hidróxidos acontece dependendo da temperatura e do pH do meio em que a superfície de aço se encontra, sendo os mais comuns: FeO, Fe₂O₃, Fe₃O₄, Fe(OH)₂, Fe(OH)₃, e Fe(OH)₃·3H₂O² (RIBEIRO *et al.*, 2014). Do volume do aço original, a produção de óxidos e hidróxidos ocupam, em aspectos volumétricos, de 3 a 10 vezes o volume do aço, conseqüentemente aumentando as tensões internas do concreto e escalonando o processo de fissuras. (MIRANDA, 2018; HELENE, 1993).

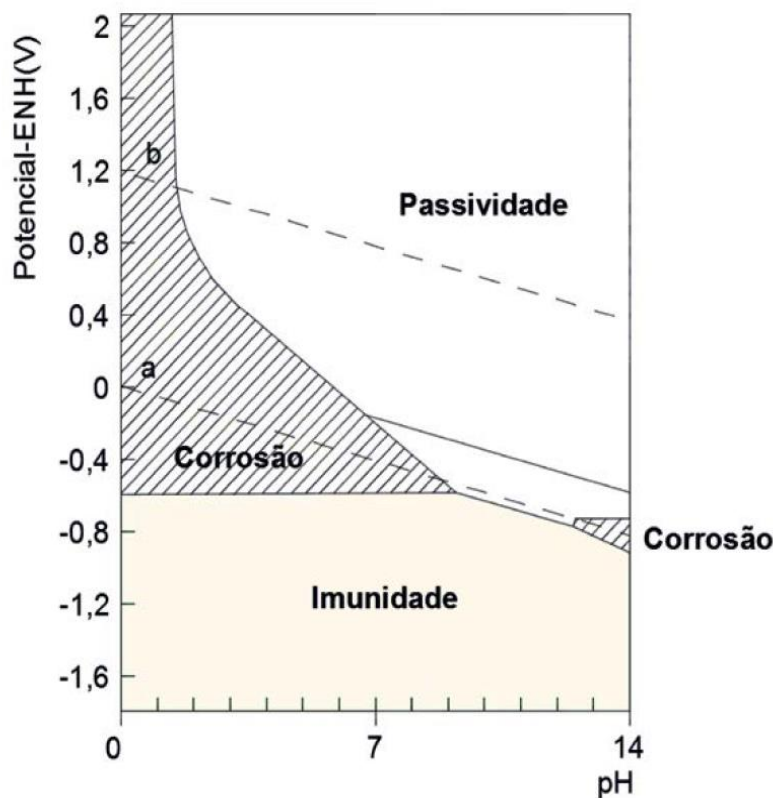
O concreto proporciona proteção para a armadura tanto de maneira física quanto química, separando o aço do meio externo, formando uma capa passiva que protege a armadura (BROOMFIELD, 2007). Essa camada de filme fino, que adere ao aço, é composta por variações de magnetitas, que tem caráter passivo e é chamada de passivação ou proteção química (SILVA, 2007; RIBEIRO *et al.*, 2014).

A alcalinidade proveniente do processo de hidratação do cimento protege a armadura da corrosão até que ocorram alterações químicas ou físicas, que permitam a ação de agentes agressivos externos (HUSSA; ISHIDA, 2010).

A película se forma devido à alta alcalinidade do meio e por causa do potencial eletroquímico que a armadura desempenha. Existem três condições do equilíbrio termodinâmico do metal: corrosão, passivação e imunidade; e baseiam-se no potencial

eletroquímico presente na estrutura e do pH do meio (MEIRA, 2017). Essas condições podem ser relacionadas e assim representadas através do diagrama de Pourbaix, representado na Figura 2.

Figura 2 - Diagrama de equilíbrio termodinâmico, potencial versus pH, para o sistema Fe - H₂O.



Fonte: Pourbaix (1974), com adaptações.

O diagrama de Pourbaix é um instrumento importante utilizado para estudar a corrosão em que expressa os requisitos de equilíbrio termodinâmico do metal (MEIRA, 2017). A região representada por imunidade no diagrama significa uma região onde o metal não sofre corrosão, independentemente do pH do meio em que se encontra. Quando o potencial é menor que -0,6V, o ferro não reage. Já, a região de passividade é onde ocorrem às reações para a formação da película de passivação, depois de formada ela protege a armadura de uma corrosão futura enquanto o pH se mantiver elevado. Abaixo da linha “a” ocorre à redução e acima da linha “b” ocorre oxidação. Nas regiões de corrosão existem as combinações de pH e potenciais que facilitam a ocorrência de corrosão (POURBAIX, 1974).

A película de passivação perde sua estabilidade, e essa camada, não consegue mais agir como camada de proteção, sendo assim, a armadura está suscetível a sofrer ataques do meio e possibilita condições para acontecer corrosão (SILVA, 2007; RIBEIRO *et al.*, 2014). Este processo é considerado danoso à estrutura. Sua manifestação ocorre por meio de manchas superficiais na armadura, seguido por fissuras, destacamentos da camada de proteção do concreto, reduzindo a seção do elemento estrutural, perda de aderência entre a armadura e o concreto, dentre outros danos (RIBEIRO *et al.*, 2014). A corrosão da armadura é uma patologia e certamente causa grandes preocupações, por serem evidentes e difíceis de intervir podendo afetar toda a estrutura do concreto armado (NEVES; BRANCO; BRITO, 2012).

Os principais fenômenos que iniciam a corrosão do reforço, destruindo o revestimento passivo nas barras de aço são: a carbonatação do concreto de cobrimento e a presença de íons cloretos na estrutura, ou a combinação dos dois processos (HUSSA; ISHIDA, 2010). À medida com que o dióxido de carbono penetra no concreto, as reações químicas ocorrem diminuindo a alcalinidade da solução dos poros e reduzem o pH, comprometendo a estabilidade da película de passivação. Os íons cloretos, penetram no concreto e rompem pontualmente a película (MEIRA, 2017). As duas condições estão representadas na Figura 3.

Figura 3 - (a) Corrosão generalizada pela carbonatação do concreto e (b) Corrosão pontual pela ação de íons cloreto.



Fonte: MEIRA, 2017.

2.3 CARBONATAÇÃO EM CONCRETOS

Uma das funções do concreto é proteger a armadura de processos corrosivos. Essa proteção ocorre tanto fisicamente por isolar o aço de gases externos, quanto quimicamente por conta do elevado pH da solução dos poros que estabiliza a capa passiva e impede a ocorrência da oxirredução na armadura (MEIRA, 2017).

Os custos de manutenção, reparo e reabilitação atrelados a carbonatação em estruturas de concreto, são consideráveis. Para Parrot (1986), seria de melhor eficácia concentrar recursos de modo a desenvolver medidas preventivas que possam diminuir esforços para realizar recuperações ou reparos.

Entende-se por carbonatação como o processo físico-químico de uma série de reações que ocorrem no concreto na presença de CO_2 , reduzindo seu pH e, assim, penetrando na superfície do concreto, através do mecanismo de difusão (NEVILLE; BROOKS, 2010). O dióxido de carbono presente na atmosfera penetra no concreto e se dissolve na estrutura dos poros do concreto formando ácido carbônico, carbonato de cálcio, por meio da reação do CO_2 com os constituintes do concreto (BOSTANCI, Ş. C *et al.*, 2016). O resultado é a redução de permeabilidade por conta do CO_2 nos vazios e o aumento de resistência com o preenchimento dos poros com o $CaCO_3$, que aumenta com o avanço da carbonatação, elevando a resistência do concreto (NGALA; PAGE, 1997). Apesar de não reagir diretamente com a armadura, a carbonatação facilita a ocorrência da corrosão de forma mais propícia.

O mecanismo de difusão ocorre devido a diferença de concentração entre o meio externo e o meio interno do concreto e assim, uma maior concentração de CO_2 no ambiente pode elevar a taxa de carbonatação (HELENE, 1993). A difusão é realizada através de poros capilares interconectados, microfissuras ou bolhas de ar (RICHARDSON, 1988). Sendo assim, quanto maior a facilidade de difusão do CO_2 maior será o avanço na frente de carbonatação.

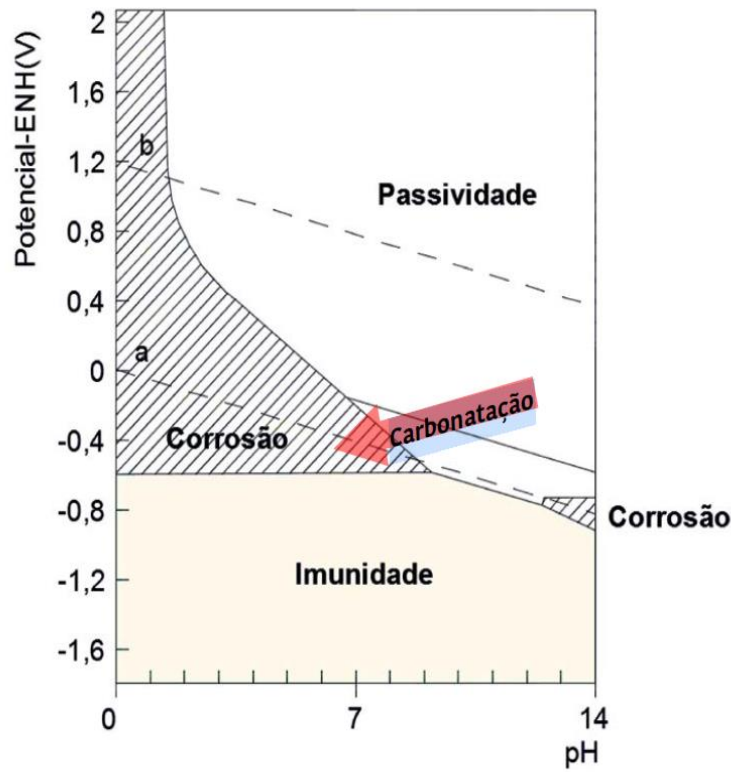
O fenômeno de carbonatação do concreto transcorre de forma natural em estruturas expostas ao dióxido de carbono, que adentra a superfície e com a umidade dos poros, constitui a frente de carbonatação. A presença da umidade é fundamental para a ocorrência de carbonatação, porém também pode ser a causa do impedimento da difusão

do dióxido de carbono. A incidência de chuvas, como por exemplo, satura os poros do concreto, e dificulta a penetração do CO_2 (SILVA, 2007).

Trata-se, portanto, de um processo complexo dependente de muitas variáveis intervenientes, entre elas estão: módulo de finura e relação água/aglomerante, a dosagem de cimento ou adições minerais, as condições de cura, a umidade e concentração de CO_2 no ar, a porosidade, a permeabilidade, a compacidade da pasta de cimento endurecida, a resistência à compressão e a presença de fissuras. Todas, sendo de grande importância para aspectos de durabilidade do concreto, como salienta Mazza (2015). A velocidade de carbonatação aumenta quando se tem um maior teor de CO_2 , o seu transporte ocorre através dos poros presentes na pasta de cimento endurecida e é intensificado especialmente com relações água/cimento elevadas (NEVILLE, 2016).

O fenômeno físico-químico da carbonatação decorre da reação entre os integrantes ácidos do ambiente com o líquido intersticial dos poros do concreto. Conforme o dióxido de carbono penetra no concreto, as reações químicas diminuem a alcalinidade da solução dos poros, interferindo na diminuição do pH para valores próximos de 8 (TUUTTI, 1982). Essa redução prejudica a estabilidade da película de passivação aderente ao aço (MAZZA, 2015). De forma a exemplificar, a introdução da carbonatação no diagrama de Pourbaix demonstra que a região de passivação se transporta para a região de corrosão, conforme representado na Figura 4.

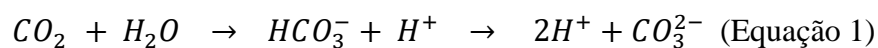
Figura 4 - Diagrama de equilíbrio termodinâmico, potencial versus pH, para o sistema Fe - H₂O.



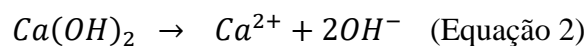
Fonte: Pourbaix (1974), com adaptações.

A espessura da parte da estrutura carbonatada denomina-se profundidade de carbonatação, e pode ser utilizado um indicador químico, que pela mudança de cor identifica a redução de pH, podendo ser visualizada a ocorrência de carbonatação (ANDRADE, 1992).

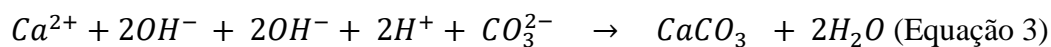
As reações químicas responsáveis pela carbonatação através do hidróxido de cálcio estão descritas nas Equações 2 e 3. Primeiramente, o CO_2 se difunde através dos poros e com a presença de umidade, as reações geram ácido carbônico (SILVA, 2007).



Os cristais de hidróxido de cálcio se dissolvem com a umidade presente nos poros do concreto.

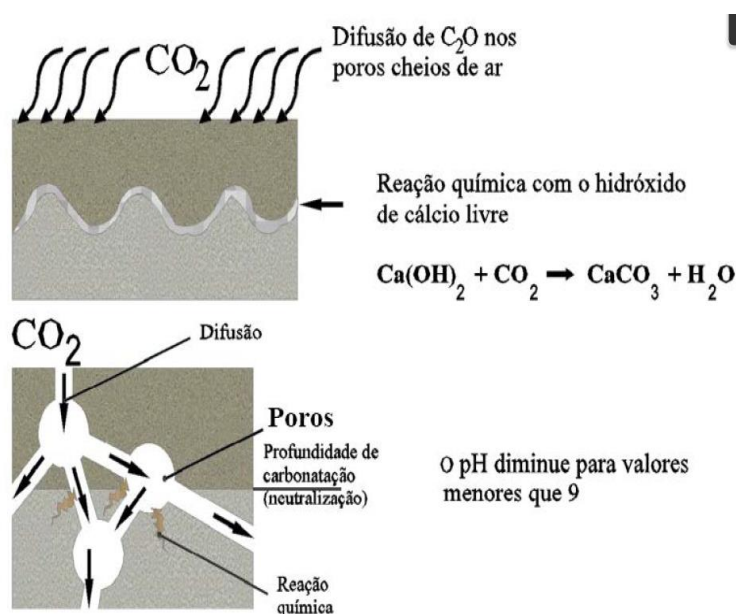


Sendo assim, ocorre a reação do hidróxido de cálcio com o CO_2 , originando como resultado o carbonato de cálcio, reduzindo o pH e também o volume dos poros (SILVA, 2007).



O avanço da carbonatação acontece de fora para dentro e está diretamente relacionada com o alastramento do dióxido de carbono (MEIRE, 2017). As equações acima estão representadas de forma esquemática na Figura 5.

Figura 5 - Representação esquemática da penetração de CO_2 por difusão e do processo de carbonatação.



Fonte: CEB (1984), com adaptações.

Existem várias fórmulas matemáticas para estimar a profundidade de carbonatação em variação ao período de tempo analisado. A equação utilizada com mais frequência nos estudos de carbonatação é a proposição de Verbeck, Apud Fernandez Paris (1973), onde a profundidade de carbonatação obtida experimentalmente é proporcional à raiz quadrada do tempo de exposição (SILVA,2007). Pode-se estimar a velocidade de carbonatação do concreto através do coeficiente de carbonatação (K), através da Equação 4.

$$x = K \cdot \sqrt{t} \text{ (Equação 4)}$$

Onde,

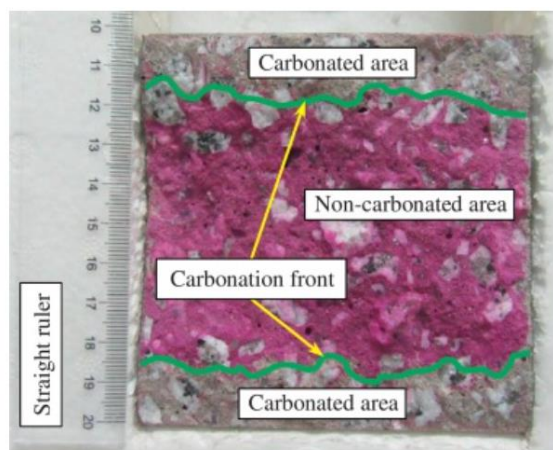
x é a profundidade de carbonatação em mm;

K é o coeficiente de carbonatação (variável dependente do meio e material) em mm/semana^{0,5};

t é o tempo de exposição ao meio de carbonatação em semanas

A profundidade de carbonatação pode ser determinada através de um indicador químico de pH. É o método de determinação mais utilizado, pois é prático e apresenta baixo custo para realização (PAULETTI, 2004). O mais utilizado é a fenolftaleína, porém não há unificação sobre a faixa de pH na qual há a troca de coloração do indicador. Para Neville (2016) para pHs acima de 9,5 a fenolftaleína têm coloração rosa, e indica elevada concentração de Ca(OH)_2 , mas não significa que não há ausência de carbonatação. Forrester (1976) adota pH 10,0, e para valores inferiores a solução fica incolor, e acima, vermelho-carmim. Um exemplo da utilização do indicador de pH, a fenolftaleína pode ser visto na Figura 6.

Figura 6 - Exemplificação do uso da fenolftaleína como indicador de pH.



Fonte: JIANG *et al.*, (2017).

Com a intensificação de estudos a respeito da durabilidade de estruturas de concreto, fez-se cada vez mais necessário a realização de ensaios acelerados em laboratório, de forma que facilite a análise de situações onde não há tempo hábil para esperar a ocorrência de forma natural (MEIRE, 2017). O estudo da frente de carbonatação leva anos,

principalmente porque a exposição de CO_2 em condições naturais é baixa, ou seja, o avanço demora a ser evidenciado, já que os ensaios acelerados reduzem custos de operações de pesquisa. Vários trabalhos acadêmicos relacionados ao tema, mesmo que recentes, utilizam as mais variadas formas de realização de ensaio. Em 40 pesquisas dos últimos cinco anos, foram coletados 1147 amostras de profundidade de carbonatação e todos os padrões de ensaio atrelados a eles. Foram utilizadas formas variadas de realização dos ensaios e é perceptível que é mais utilizada recomendações ou normas locais do que a ISO 1920-12:2015. Essa dispersão de análise está descrita na Tabela 1.

Tabela 1 – Referências de execução dos ensaios nas pesquisas analisadas envolvendo ensaio de carbonatação acelerada.

Autor	Descrição da pesquisa	Ano	Referência de execução dos ensaios
ARIF <i>et al.</i>	Avaliação de desempenho de concreto de cimento contendo pasta de arenito	2018	RILEM CPC-18 (1988)
BRITO <i>et al.</i>	Propriedades estruturais, materiais, mecânicas e de durabilidade e comportamento do concreto de agregados reciclados	2016	LNEC-E391 (1993)
BRITO <i>et al.</i>	Betão estrutural com incorporação simultânea de agregados de concreto reciclado fino e grosso: Propriedades mecânicas, durabilidade e longo prazo	2017	LNEC-E391 (1993)
BRITO <i>et al.</i>	Desempenho de durabilidade de concreto de alto desempenho feito com agregados reciclados, cinzas volantes e sílica ativa densificada.	2018	LNEC-E391 (1993)
BOSTANCI <i>et al.</i>	Escória Portland e concretos de cimento composto: propriedades	2016	*

Tabela 1 – Referências de execução dos ensaios nas pesquisas analisadas envolvendo ensaio de carbonatação acelerada.

Autor	Descrição da pesquisa	Ano	Referência de execução dos ensaios
	de engenharia e durabilidade		
BRAVO <i>et al.</i>	Durabilidade e retração do concreto com CDW como agregados reciclados: Benefícios da incorporação do superplastificante e influência da composição do CDW	2018	LNEC-E391 (1993)
BUCHER <i>et al.</i>	Vida útil do concreto à base de metacaulim exposto à carbonatação Comparação com cimento misturado contendo cinzas volantes, escória de alto-forno e enchimento de calcário	2017	RILEM CPC-18 (1988)
CAREVIC <i>et al.</i>	Modelo para previsão prática da profundidade de carbonatação para concreto de cinza volante de alto volume e concreto agregado reciclado	2019	EN 14630 (2006)
DEMIRHAN <i>et al.</i>	Propriedades frescas e endurecidas de concretos de cimento de calcário Portland auto-consolidantes: Efeito do pó de calcário de alto volume substituído por cimento	2019	*
HE <i>et al.</i>	Análise de modelagem de carbonatação no comportamento de carbonatação de concreto aerado autoclavado com areia	2018	*
JANG <i>et al.</i>	Densificação microestrutural e absorção de CO_2 promovida pela cura de carbonatação do cimento Portland rico em belita	2016	*
JEONG <i>et al.</i>	Avaliação Experimental de Desempenho Térmico e	2017	BS EN 13295: 2004

Tabela 1 – Referências de execução dos ensaios nas pesquisas analisadas envolvendo ensaio de carbonatação acelerada.

Autor	Descrição da pesquisa	Ano	Referência de execução dos ensaios
	Durabilidade de Concretos Termicamente Melhorados		
JIANG <i>et. al.</i>	Investigação experimental sobre carbonatação em concreto danificado por fadiga	2017	*
KIM <i>et. al.</i>	Durabilidade e características reológicas de concreto de escória de alto forno granulado moído de alto volume contendo CaCO ₃ ativador alcalino à base de anidrido	2019	KS F 2596 (2004)
KIM <i>et. al.</i>	Avaliação quantitativa da carbonatação em concreto por meio de ultrassom não linear	2016	ACI Mater J 88: 363-373 (2013)
KUMAR <i>et. al.</i>	Estudos de longo prazo sobre a utilização de resíduos de arenito de quartzo em concreto de cimento	2017	RILEM CPC-18 (1988)
LEE <i>et. al.</i>	Modelo de previsão para a carbonatação de materiais pós-reparo em estruturas carbonatadas RC	2017	KS F 2596
ZHUGUO; SHA	Resistência à carbonatação de cinzas volantes e concreto de geopolímero à base de escória de alto-forno	2018	*
LIU <i>et. al.</i>	Degradação de concreto de cinza volante sob o efeito acoplado de carbonatação e entrada de aerossol de cloreto	2016	GB/T 50082-2009
LIU <i>et. al.</i>	Efeito da carbonatação no ataque físico do sulfato ao	2018	GB / T 50082-2009

Tabela 1 – Referências de execução dos ensaios nas pesquisas analisadas envolvendo ensaio de carbonatação acelerada.

Autor	Descrição da pesquisa	Ano	Referência de execução dos ensaios
	concreto por Na ₂ SO ₄		
MEENA <i>et. al.</i>	Efeito da água residual nas propriedades do concreto	2019	CPC-18 RILEM
MUDULI <i>et. al.</i>	Avaliação de desempenho de concreto incorporando agregados graúdos reciclados e metacaulim: Uma abordagem sistemática	2020	*
PAN <i>et. al.</i>	Estudo de durabilidade de estruturas de concreto considerando a interação de multifatores	2016	GB/T 50082–2009
PENG <i>et. al.</i>	Simulação numérica da profundidade de carbonatação de estruturas de concreto, considerando o processo de carbonatação dependente do tempo e da temperatura.	2018	*
PHAM <i>et. al.</i>	Características de durabilidade do concreto leve emborrachado	2019	fib CEB-FIP (2006)
SAMOUB <i>et. al.</i>	Consequências de uma cura mais longa vedada na secagem, retração, rachaduras e carbonatação do concreto.	2017	*
SARDINHA <i>et. al.</i>	Propriedades de durabilidade do concreto estrutural contendo agregados muito finos de lama de mármore	2016	LNEC-E391 (1993)
SHUI <i>et. al.</i>	Melhoria da resistência à carbonatação do concreto com base em uma estrutura modificada em Layered Double Hydroxides (LDHs):	2018	ISO 1920-12:2015

Tabela 1 – Referências de execução dos ensaios nas pesquisas analisadas envolvendo ensaio de carbonatação acelerada.

Autor	Descrição da pesquisa	Ano	Referência de execução dos ensaios
	Experimentos e análise de mecanismo		
SINGH <i>et. al.</i>	Investigação experimental de concreto sustentável feito com subproduto da indústria de granito	2017	RILEM CPC-18 (1988)
TANG <i>et. al.</i>	Influência da carga axial e da idade da carbonatação na resistência à carbonatação do concreto agregado reciclado	2018	*
TIAN <i>et. al.</i>	Estudo Experimental das Propriedades do Concreto Misturado com Rejeitos de Minério de Ferro	2016	DL/T 5150-2001
TORRES <i>et. al.</i>	Modelo Matemático Simplificado para Carbonatação de Concreto	2017	*
VIEIRA <i>et. al.</i>	Desempenho relacionado à durabilidade do concreto contendo agregados reciclados finos de tijolos triturados e louças sanitárias	2016	LNEC E-391
WANG <i>et. al.</i>	Propriedades interfaciais do concreto agregado reciclado modelado modificado por carbonatação	2016	*
WANG <i>et. al.</i>	Efeitos do estresse e da alta temperatura na resistência à carbonatação do concreto de cinza volante	2017	GB/T 50082

Tabela 1 – Referências de execução dos ensaios nas pesquisas analisadas envolvendo ensaio de carbonatação acelerada.

Autor	Descrição da pesquisa	Ano	Referência de execução dos ensaios
WANG <i>et. al.</i>	Influência das cargas axiais no transporte de CO ₂ e Cl ⁻ nas fases do concreto: Pasta, argamassa e ITZ	2019	GB/T 50082-2009
ZHANG <i>et. al.</i>	Investigação experimental de neutralização de concreto com cinza volante como agregado fino em ambiente de congelamento-degelo	2019	*
ZHANG <i>et. al.</i>	Durabilidade de concreto reforçado com fibra de aço contendo nanopartículas de SiO ₂	2019	*
ZHANG <i>et. al.</i>	Resistência ao cisalhamento da interface entre o concreto autoadensável e o concreto carbonatado	2020	GB/T 50082
ZHAO <i>et. al.</i>	Utilização de resíduos de tijolos de argila como agregados graúdos e finos para a preparação de concreto de agregado leve	2018	GB/T 50082

Fonte: Os autores. *A pesquisa não informou.

Destas referências de execuções de ensaios, destaca-se o texto da RILEM CPC-18 (1988), que menciona a descrição de parâmetros para a medição da profundidade de carbonatação e a RILEM TC 116-PCD (1999), que descreve o pré-condicionamento de corpos de prova. A LNEC-E391 (1993), é também uma das mais citadas, e trata de uma norma espanhola sobre a resistência à carbonatação de betões ativados alcalinamente.

Nota-se que apenas um dos 40 estudos, informaram a utilização da ISO 1920-12:2015. Por muito tempo houve uma carência a respeito de um método a ser seguido. A falta de padronização está presente principalmente aos fatores ambientais, ou seja, umidade relativa, temperatura e concentração do dióxido de carbono e aos procedimentos de ensaio como o tipo, tamanho e forma do corpo de prova, e tempo de realização do ensaio (PAULETTI, 2007).

2.4 FATORES INFLUENTES NA CARBONATAÇÃO

A velocidade em que a frente de carbonatação avança é variável de acordo com diversos parâmetros que podem estar relacionados à composição e microestrutura do concreto ou ao ambiente em que este se encontra (METHA; MONTEIRO, 2014; JIANG *et al.* 2017). Há diversos estudos que mostram essa relação, como os trabalhos Hongke *et al.* (2016) que estudaram a influência da profundidade de carbonatação e a composição do concreto e os trabalhos de Jiang *et al.* (2017) e Carevic *et al.* (2019) que compararam a carbonatação de concretos imersos em meios com diferentes concentrações de CO_2 .

A resistência à compressão em si não está diretamente relacionada à profundidade de carbonatação. Entretanto, alguns fatores que influenciam a resistência mecânica como o tipo de cimento, relação água/aglomerantes e grau de hidratação, que também estão associados à microestrutura do concreto e, conseqüentemente ao processo de carbonatação. Dessa forma, é possível mostrar uma tendência entre a resistência à compressão e a profundidade de carbonatação (METHA; MONTEIRO, 2014 HONGKE *et al.*, 2016).

A permeabilidade do concreto não é só dependente da porosidade, também depende das dimensões, distribuição, forma, tortuosidade e continuidade dos poros. A porosidade é a proporção ocupada pelos poros do concreto (NEVILLE, 2016). A relação água/aglomerantes é um fator que influencia na porosidade, ou seja, quanto menor essa relação menor a quantidade e tamanho dos poros e a sua continuidade. Uma menor porosidade diminui a permeabilidade e a difusividade, que por sua vez diminui a profundidade de carbonatação (SILVA, 2007).

De acordo com Pan (2016), a relação água/aglomerantes também tem um efeito óbvio na taxa de carbonatação do concreto. Esse estudo mostra que, em geral, quanto maior a proporção de água, mais rápida é a taxa de carbonatação.

A relação entre a profundidade de carbonatação e a resistência à compressão foi verificada por Atis (2004). De acordo com o estudo, a menor resistência à compressão está associada a uma menor porosidade, aumentando a carbonatação. Entretanto, o estudo mostra que esse aumento se deve à maior continuidade capilar, não à resistência mecânica.

O consumo de cimento, assim como a relação água/aglomerantes, pode influenciar indiretamente na profundidade de carbonatação. O concreto produzido com maior taxa de cimento em sua composição possui uma pasta de cimento com menor porosidade, o que desfavorece a difusão de CO_2 . Dessa forma, quanto maior o consumo de cimento, maior será sua resistência à carbonatação, como é demonstrado nos estudos (Neville, 2016).

O ambiente em que o concreto se situa também pode influenciar no processo de carbonatação. Para a ocorrência da difusão de CO_2 é necessário níveis adequados de umidade relativa do ar, bem como concentração de CO_2 . A velocidade em que a carbonatação ocorre também pode sofrer pequenas variações de acordo com a temperatura (SAVIJA; LUKOVIC, 2016; NEVILLE, 2016). Visser (2014), Jiang *et al.* (2017) e Carevic *et al.* (2019) estudaram a influência da concentração de CO_2 e a profundidade de carbonatação, obtendo esse mesmo resultado.

Pauletti (2007) fez um estado da arte em relação às pesquisas brasileiras envolvendo carbonatação. De acordo com esse estudo, a concentração de CO_2 é fator bastante relevante para a determinação da profundidade de carbonatação. O levantamento mostrou que os autores dessas pesquisas indicam que os testes sejam feitos com teores de CO_2 inferiores a 20%, pois acreditam que concentrações próximas à saturação poderiam causar mudanças microestruturais que não ocorreriam em concentrações menores.

Existem outros parâmetros que podem influenciar na difusão da frente de carbonatação como a umidade relativa do ar, às solicitações mecânicas e a geometria da peça (HONGKE *et al.*, 2016 WANG *et al.*, 2017).

De acordo com Pauletti (2017), a carbonatação varia com a umidade. Em umidades inferiores a 50% a carbonatação diminui devido a falta de água para dissolver o CO_2 . Por outro lado, umidades elevadas a ponto de saturar os poros também dificultam a difusão.

Pan, H. (2016) mostrou que a tensão aplicada no concreto tem efeito significativo na taxa de carbonatação. De acordo com esse estudo, a tensão de tração facilita a carbonatação do concreto, ao passo que a tensão de compressão a inibe.

A revisão feita por Pauletti (2007) mostrou que a profundidade de carbonatação pode sofrer variações de acordo com o formato e dimensões das amostras. Esse fenômeno possivelmente ocorre devido às sobreposições de vetores de difusão. Miranda (2018) comparou os resultados de carbonatação para concretos em diferentes dimensões de corpos de prova, observando que, de fato, existe essa diferença. Um estudo realizado por Kulakowski (2002) comparou a profundidade de carbonatação em diferentes tipos de corpos de prova. A pesquisa constatou que a profundidade de carbonatação foi cerca de 50% maior em amostras cilíndricas comparadas a amostras prismáticas. A utilização de corpos de prova cilíndricos ou cúbicos é mais conveniente quando se pretende realizar medições em até duas idades de exposição diferentes. Por outro lado, a realização de ensaios com maior variedade de idades é recomendada a utilização de prismas (PAULETTI, 2007).

2.5 RECOMENDAÇÕES DA ISO 1920-12:2015

A ISO 1920-12:2015, é uma forma de regulamentar e avaliar a resistência à carbonatação do concreto, usando o teste de carbonatação acelerada, que realizado sob condições controladas de exposição, utiliza um nível alto de dióxido de carbono ao qual os lados verticais da amostra são expostos. O ensaio de carbonatação acelerada, quando realizado conforme essas recomendações, utiliza corpos de prova cúbicos ou prismáticos. São moldados 2 corpos de prova, se prismáticos, de dimensões 400x100x100 mm e, se cúbicos, de dimensões 100x100 mm.

É realizada uma cura úmida, de 28 dias, nos corpos de prova e, após isso, passam por 14 dias de pré-condicionamento em ambiente laboratorial para estabilizar a umidade interna. Em seguida, os CPs são selados com parafina, para garantir que o fluxo seja unidirecional.

A partir daí, os corpos de prova são colocados numa câmara de carbonatação acelerada. As condições de temperatura para realização do ensaio são fixadas em 22 ± 2 °C para locais de temperatura mais amena, e para locais mais quentes a temperatura é de 27 ± 2 °C.

As condições de umidade relativa, também dependem da região em que o ensaio será realizado e podem ser no intervalo entre 50-70%. A concentração de CO_2 é fixada em $3,0 \pm 0,5\%$. Os corpos de prova permanecem na câmara por um período de 70 dias e são medidas as profundidades da frente de carbonatação aos 56, 63 e 70 dias de exposição.

É utilizada uma solução de fenolftaleína indicadora de pH e um paquímetro digital, com resolução de 0,01 mm, para realizar as leituras. A cada medição é retirada uma fatia de cerca de 5 cm de altura do corpo de prova prismático e em seguida o lado fraturado é selado novamente e o corpo de prova é recolocado na câmara.

A partir da publicação dessas premissas, esperava-se que a necessidade de um ensaio padronizado fosse suprida. É importante salientar que não há ainda uma unificação desses dados. Para Pauletti (2007), acredita-se que por meio da padronização seria possível a criação de uma base de dados em relação à durabilidade, confiáveis, ou seja, que poderiam ser utilizados com segurança para que fosse possível determinar uma estimativa da vida útil de estruturas de concreto armado.

2.6 CONCRETOS CONTENDO AGREGADOS RECICLADOS

O agregado reciclado de concreto (ARC), como são conhecidos, são os agregados originados de materiais de demolição. Esse tipo de agregado é classificado pela NBR 15116:2004 de acordo com a sua origem. Atualmente existe uma tendência de crescentes estudos de agregados dessa natureza devido a sua importância ambiental, como é destacado por Vieira et al, (2015). Sua principal utilização, entretanto, ainda é restrita a obras de pavimentação e em concretos não estruturais (NEVILLE, 2016).

A utilização de agregados reciclados em concreto exige maior utilização de água em sua composição, o que causa maior porosidade na pasta de cimento, além do próprio agregado já possuir maior porosidade. Dessa forma, a difusão ocorre com maior facilidade, o que prejudica o concreto em termos de durabilidade e favorece a ocorrência de carbonatação.

Em contraponto, esse tipo de agregado também é responsável por causar maior alcalinidade no concreto, compensando parte do efeito deletério causado pela porosidade (BRAVO et al., 2018).

Resultados produzidos por diversos estudos como Vieira (2015) e Bravo (2018) apontam que os concretos produzidos utilizando-se ARC apresentam eficiência inferior no que diz respeito à durabilidade, em especial à resistência à carbonatação. Vieira *et al.*, (2015) demonstra que a profundidade da frente de carbonatação avança com maior velocidade quanto maiores os teores de substituição dos agregados naturais por ARC. Silva (2019) utilizaram ARC e analisou o ensaio de carbonatação acelerada, constatando resultados semelhantes.

A utilização de agregados reciclados no concreto influencia outras de suas propriedades. Uma das propriedades que é afetada é a resistência à compressão, por estar relacionada à resistência do concreto que deu origem aos agregados. Além disso, a trabalhabilidade do concreto contendo ARC é diminuída, o que aumenta a demanda por água. Esse mesmo concreto apresenta menor módulo de elasticidade e maior retração (NEVILLE, 2016). Salienta-se que a produção do referido agregado exige maior controle ou tratamento da fonte, uma vez que o material de demolição pode ter sido contaminado ou ter sofrido processos que o torna nocivo ao concreto (NEVILLE, 2016).

Atualmente, os estudos não estão concentrados exclusivamente nas propriedades do material, mas também em comportamentos relacionados à durabilidade (BRITO, 2016). Uma base científica sólida formada nas últimas décadas vem demonstrando a viabilidade do uso de ARC em concreto estrutural, apesar desse uso não ser comum atualmente devido a essas limitações em algumas de suas propriedades como supracitado (VIEIRA et al., 2015) (NEVILLE, 2016).]

3 METODOLOGIA

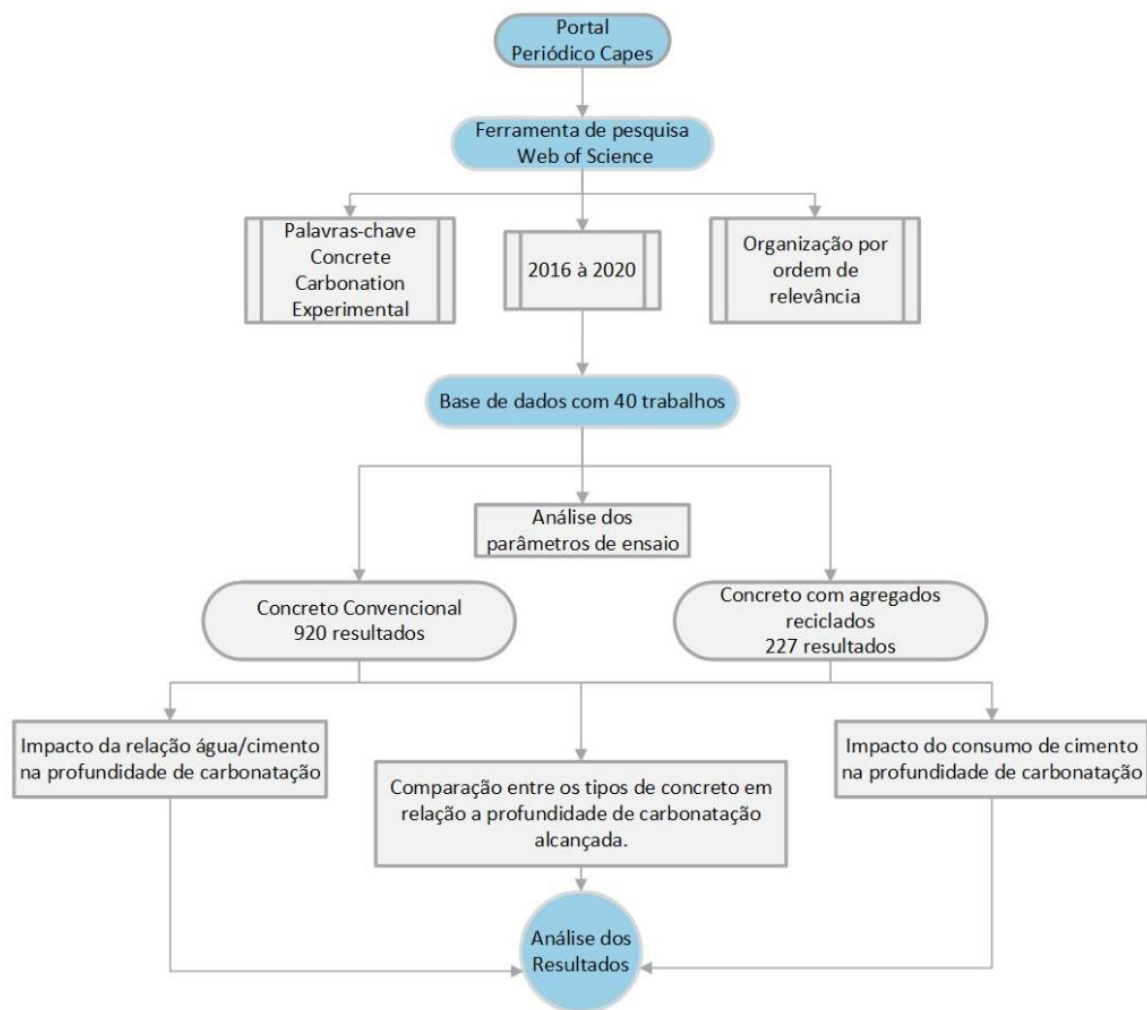
Para alcançar os objetivos propostos, realizou-se uma revisão sistemática exploratória, seguindo o modelo de Teoria do Enfoque Meta Analítico – TEMAC – desenvolvido por Reggio di Calabri (2017), que utiliza o critério de impacto de revistas e artigos para escolha do material a ser utilizado. Tem como seu principal objetivo fazer combinações de base de dados de relevância, de modo que apresente uma base confiável. O enfoque meta-analítico possibilita gerar características de maneira simultânea para que se obtenham os melhores autores, revistas e artigos, e também as linhas mais pesquisadas e abordagens utilizadas (MARIANO *et al.*, 2011). Neste trabalho adaptou-se o enfoque meta analítico para que assim pudesse ser utilizado os trabalhos de relevância sobre a carbonatação acelerada em concreto, de maneira que fossem selecionados os trabalhos publicados após a vigência da ISO 1920-12:2015. Foram realizados 6 passos, descritos a seguir, do enfoque para chegar a lista de trabalhos que compõem a base de dados avaliada:

- Foi escolhido o portal e a ferramenta de pesquisa para a realização do trabalho: Portal Periódico Capes e a Ferramenta Web of Science.
- Realizou-se a pesquisa sobre o tema, usando como filtro as palavras-chaves: Concrete, Carbonation e Experimental.
- Limitou-se o espaço temporal dos últimos 5 anos, após a publicação da ISO 1920-12:2015, ou seja, dos anos de 2016 a 2020.
- Identificaram-se as revistas mais utilizadas no contexto estudado.
- Organizou-se os trabalhos por ordem de relevância.
- Coletou-se os dados para alimentação do banco de dados através de planilha.

Após a coleta, foram excluídos da seleção os artigos que não estavam relacionados com a pesquisa. A pesquisa abrangeu 388 artigos. Foram excluídos da seleção os artigos que não estavam relacionados com a pesquisa, restando apenas 40 artigos para compor o banco de dados. Desses 40 artigos, foram coletados 1147 resultados, sendo eles 920 a respeito de concreto convencional e 227 a respeito de concreto com agregados reciclados.

O desenvolvimento da metodologia que foi realizada está apresentado na Figura 5, e será posteriormente detalhado.

Figura 7 - Fluxograma organizacional das atividades realizadas.



Fonte: Os autores.

A análise das condições de ensaios foi realizada para os 1147 resultados, pois a ISO 1920-12:2015 prescreve os parâmetros independentemente dos tipos de concreto. Posteriormente, optou-se por separar o grupo de concretos convencionais do grupo de concretos com agregados reciclados, para não ter qualquer tipo de dado ou análise disfarçada, visto que se espera um comportamento mais intenso da profundidade de carbonatação para concretos com agregados reciclados.

A planilha foi montada no software Excel e foram coletados os parâmetros para a análise posterior. O modelo de planilha utilizado para a coleta de dados está representado na figura 8.

Figura 8 - Modelo de planilha utilizado para elaboração da base de dados.

Titulo da pesquisa	Autores	Titulo da fonte	Data de publicação	Ano da publicação	Página inicial	Página final	DOI	Total de citações	Descrição	CC / ARC
Relação a/c	Consumo de cimento (kg/m³)	Temperatura (°C)	UR (%)	CO2 (%)	Tipo de CP	Dimensão CP (mm)	Tempo Carbonatação (dias)	Prof Carbonatação (mm)	Indicador de carbonatação	Referência de execução do ensaio

Onde,

CC/ARC – Tipo de concreto estudado (CC para concreto convencional e ARC para concreto contendo agregado reciclado);

CP – Corpo de prova;

UR – Umidade Relativa;

Fonte: Os autores.

A partir da montagem do banco de dados, foi feito um levantamento geral da variabilidade dos parâmetros de ensaio adotados nos diferentes estudos, comparando-os com as recomendações da ISO 1920-12:2015. Os parâmetros verificados foram: em relação à temperatura, umidade relativa, indicador da profundidade de carbonatação, concentração de CO₂, idades de ensaio e tipos de corpos de prova.

Em seguida, estudou-se o comportamento da relação água/aglomerantes em função da profundidade de carbonatação. Para concretos convencionais, optou-se por analisar as idades de exposição de 7, 14, 28, 56 e 91 dias, por serem a maioria dos dados amostrais coletados e, assim, permitir melhor análise da dispersão de pontos. A fim de diminuir possíveis erros sistemáticos, foram excluídas as amostras que apresentassem resultados destoantes do padrão observado. Separadamente, foi realizada a mesma análise para concretos contendo agregados reciclados. Devido a um número reduzido de amostras, os resultados para concreto com agregados reciclados foram verificados sem considerar a diferença de idade dos ensaios.

De forma similar estudou-se o comportamento do consumo de cimento e a profundidade de carbonatação para concretos convencionais. O comportamento também foi verificado para as idades de exposição de 7, 14, 28, 56 e 91 dias de ensaio. Para resultados em concreto contendo agregado reciclado, a análise foi feita separadamente desconsiderando a diferença de idade dos ensaios.

Finalmente, foi feita uma comparação da profundidade de carbonatação entre o concreto convencional e o concreto produzido com agregado reciclado (ARC). A média da

profundidade de carbonatação foi medida separadamente em amostras de concreto convencional e concreto contendo agregado reciclado. O estudo foi analisado para as idades de exposição de 3, 7, 14 e 28 dias de forma conjunta. Também foram excluídos do cálculo da média os resultados destoantes devido às condições de ensaio.

O projeto final 1 continha uma metodologia com cronograma experimental. Devido a não abertura dos laboratórios da Universidade de Brasília – UnB – por conta da Pandemia associada ao Covid-19 optou-se pela mudança de abordagem para a realização de um levantamento bibliográfico.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PARÂMETROS DE ENSAIO

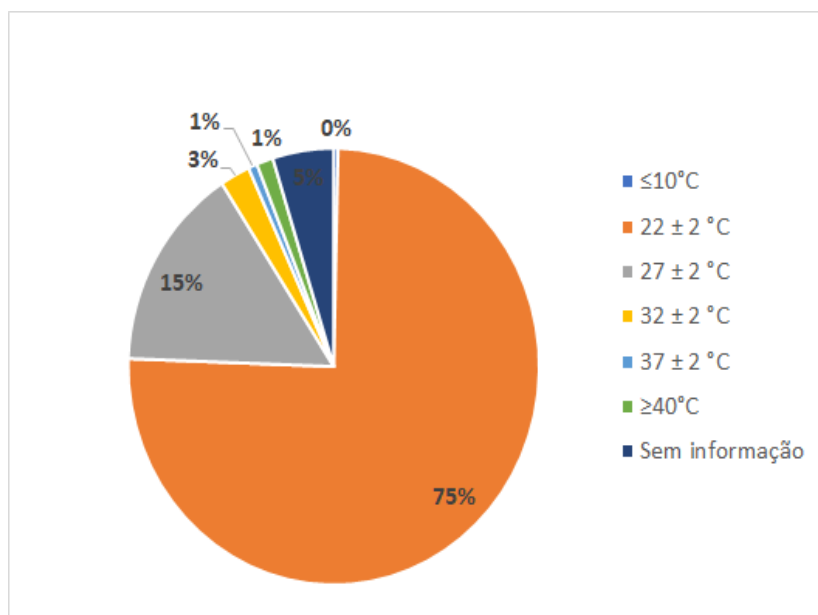
Foram analisados 1147 resultados relativos ao banco de dados de 40 pesquisas. A planilha demonstrada na Figura 8 foi devidamente preenchida, item a item, com as informações pré-estabelecidas. Nesse tópico serão analisados os parâmetros relativos aos ensaios da profundidade de carbonatação, para verificar a sua variabilidade.

Para que fosse feita uma análise mais nítida, foram propostos alguns gráficos para assim auxiliar no entendimento de forma visual das conclusões proposta nessa etapa.

4.1.1 Temperatura

Para a análise da variabilidade de temperaturas utilizadas nos ensaios de carbonatação acelerada, os 1147 dados coletados referentes às condições de ensaio foram representados de forma gráfica para verificação seguem apresentados na Figura 9.

Figura 9 - Variedade de temperatura em função da quantidade de dados coletados.



Fonte: Os autores.

Constatou-se que 90% dos espécimes das pesquisas utilizadas foram submetidos a

temperaturas recomendadas pela ISO 1920-12:2015 (22 ± 2 °C ou 27 ± 2 °C) e 10% ou utilizam temperaturas distintas ou não foram informadas na pesquisa. Consequentemente, cabe confirmar, que 75% dos ensaios foram realizados em locais de temperatura mais amena, tendo em vista que a maior amostragem foi para 22 ± 2 °C.

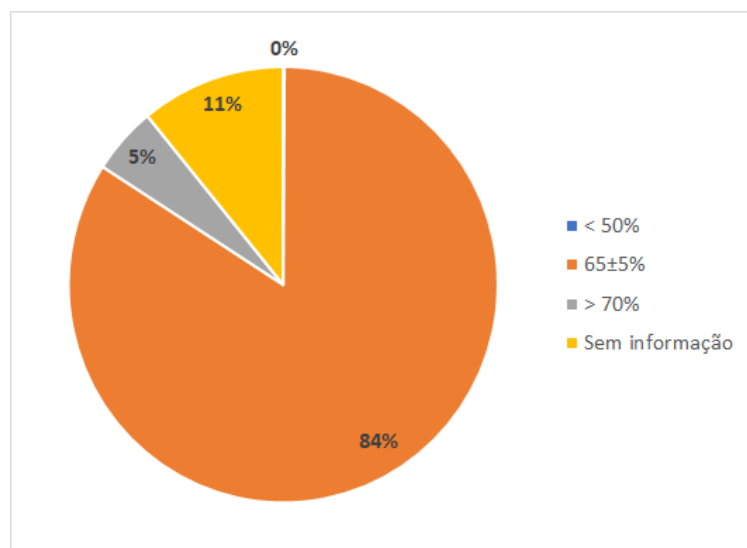
Tuutti (1982) considera a temperatura um fator importante a ser considerado, por ser responsável pela mobilidade das moléculas e facilitar o transporte de substâncias. De maneira frequente, altas temperaturas aumentam a solubilidade de substâncias, e em temperaturas baixas, o congelamento impede que o transporte dessas substâncias não ocorra.

De acordo com Papadakis *et al.* (1991), para o parâmetro de temperatura nas condições realizadas para ensaios de concreto na frente de carbonatação acelerada, entre 20°C e 40°C exerce pouca influência no processo, já que o processo é monitorado pelo nível de difusão do CO_2 . Entretanto, a temperatura não pode ser desvalorizada, visto que pode ser relacionada na taxa de corrosão da armadura (PAULETTI, 2004). Ainda existem estudos em que os ensaios foram realizados em condições de temperatura que não seguem o padrão proposto pela ISO 1920-12:2015.

4.1.2 Umidade Relativa

Para verificação do nível de variabilidade das condições de ensaios referentes a umidade relativa, também foi feita análise de forma gráfica para verificação que segue na Figura 10 a seguir.

Figura 10 - Variedade de umidade relativa nos dados coletados.



Fonte: Os autores.

O resultado é satisfatório, visto que 84% dos resultados utilizam índices de umidade relativa indicadas pela ISO 1920-12:2015. Valores esses, que permitem a ocorrência da carbonatação. O valor de umidade relativa de $65\pm 5\%$ é indicado pela norma, para áreas de localização com temperaturas mais quentes. Contrabalançando este fato com a análise feita para o item de temperatura, as conclusões não se encaixam. Desta forma, por mais que uma maioria dos ensaios utilize intervalos de valores padronizados pela ISO 1920-12:2015, é possível notar que há falta de harmonia entre os resultados encontrados.

Segundo autores como Verbeck Apud ACI 201.2R¹ (1992) e Roy et al. (1999) a melhor taxa de umidade para que propicie a ocorrência de carbonatação é entre 50 e 75%. Para umidade relativa menor que 25%, a carbonatação, é considerada mínima, sem qualquer alteração perceptível, pois é necessária a presença de água para que o CO_2 se dissolva e para que as reações químicas possam acontecer. Para uma umidade relativa maior do que 75%, a penetração do dióxido de carbono se

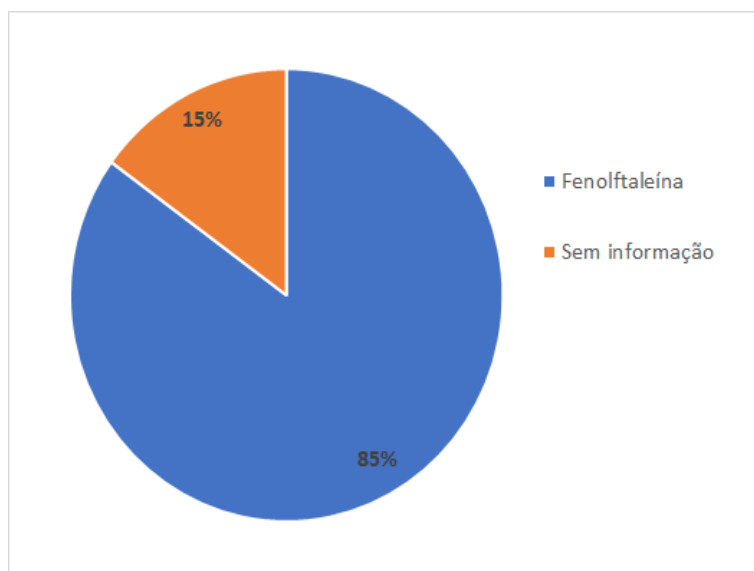
restringe, pois com muita umidade a difusão de CO_2 é limitada, e sabe-se que a profundidade de carbonatação está diretamente ligada a capacidade dessa difusão.

A velocidade de carbonatação dependerá de condições como umidade relativa e temperatura, visto que, essas variáveis influenciam na existência de vapor d'água ou saturação dos poros do concreto (KASMIERCZAK, 1995).

4.1.3 Utilização de fenolftaleína

A fenolftaleína é utilizada como indicador de pH. O uso deste produto é muito comum por ser de fácil acesso e de custo reduzido. Dos estudos verificados, aqueles que não fazem o uso de fenolftaleína, não descreveram, no decorrer do trabalho, qual foi o mecanismo utilizado para fazer a verificação do avanço da frente de carbonatação. A metodologia de medição da profundidade de carbonatação nos ensaios é representada na figura 11.

Figura 11 - Utilização da fenolftaleína nos estudos para indicador de pH no corpo de prova.

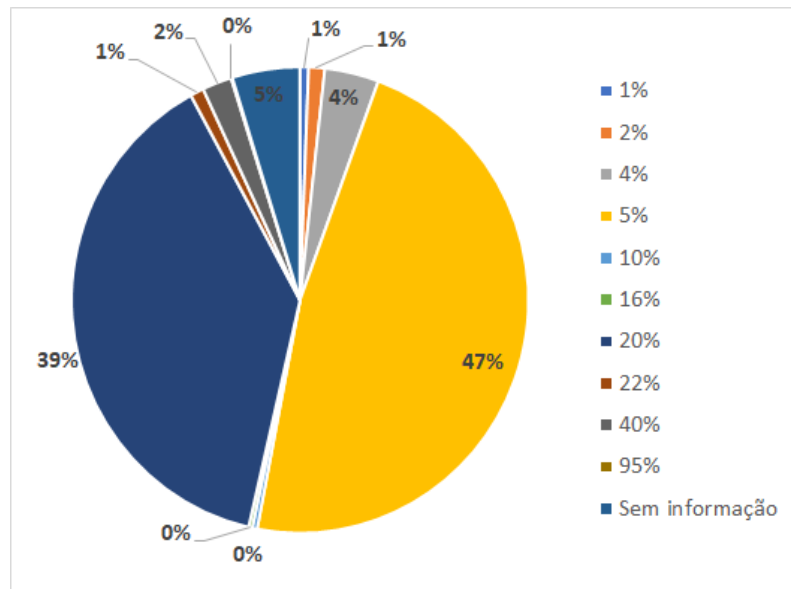


Fonte: Os autores.

4.1.4 Concentração de CO_2

Dos trabalhos coletados foi analisada a dispersão de dados quando se trata do nível de concentração de CO_2 e os resultados estão expressos na Figura 12.

Figura 12 - Variedade de concentração de CO_2 nos dados coletados.



Fonte: Os autores.

Constatou-se que a maioria das pesquisas utilizaram concentrações de 5% de (47% das amostras) ou 20% (39% das amostras) de CO_2 . A recomendação da ISO 1920-12:2015 é que a concentração usual de CO_2 seja de $3,0 \pm 0,5\%$. Esse valor de referência não foi encontrado em nenhum dos resultados do banco de dados.

A concentração de CO_2 é de extrema importância para o avanço da profundidade de carbonatação. Segundo alguns autores, Sanjuán & Olmo (2001) e Roy et al. (1999, é importante se atentar na realização de ensaios acelerados ao fato de que o aumento da concentração percentual de CO_2 pode distorcer os resultados encontrados, levando a análises e conclusões equivocadas.

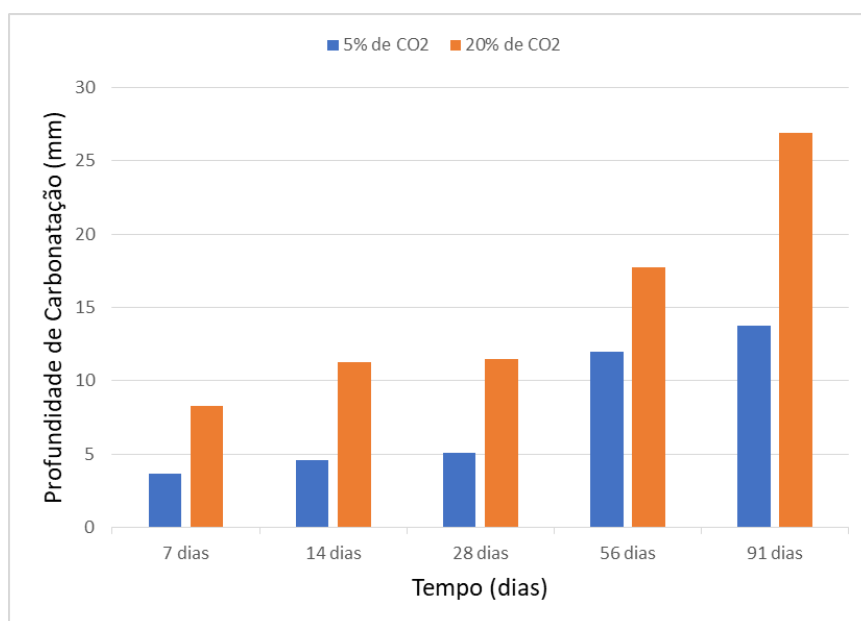
Apesar de subentender que valores mais altos dessa exposição fariam com que a profundidade de carbonatação tivesse maiores avanços, alguns autores trazem essa informação provando o ponto contrário. Foi constatada a possibilidade da ocorrência de profundidades de carbonatação inferiores para teores altos de dióxido de carbono, como apresentado por Abreu (2004), Sanjuán & Olmo (2001), em seus estudos. Sendo assim, nota-se a necessidade de um estudo mais a fundo para essas verificações.

Ressalta-se, também, que o controle da concentração nas câmaras de carbonatação

acelerada é complexo devido à dificuldade de medição. Assim, é possível que alguns dos resultados encontrados na literatura estejam equivocados.

Também foi realizada a análise da profundidade de carbonatação em amostras com concentração de CO_2 nos teores de 5% e 20% separadamente. Dessa forma, calculou-se a média das profundidades de carbonatação nas amostras de 7, 14, 28, 56 e 91 dias de ensaio. Os resultados estão representados na Figura 13.

Figura 13 - Comparação da média da profundidade de carbonatação para 5% e 20% de concentração de CO_2 para 7, 14, 28, 56, 91 dias de ensaio.



Fonte: Os autores

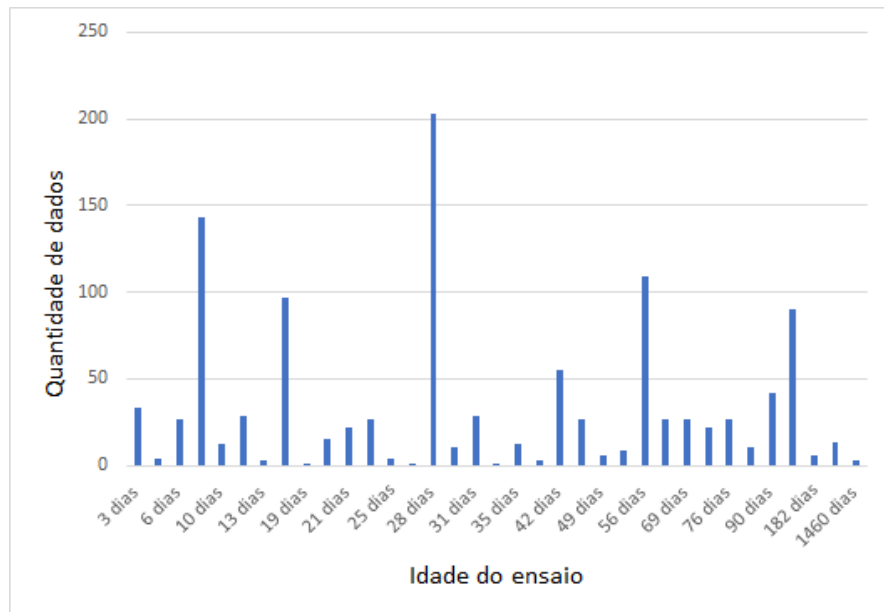
Os resultados obtidos mostraram um aumento da profundidade de carbonatação com o aumento do tempo de ensaio. Além disso, em todas as idades de ensaio, a profundidade de carbonatação foi maior para concentração de 20% do que de 5% de CO_2 .

4.1.5 Idade dos ensaios

Para a realização de ensaios de carbonatação acelerada, conforme passam os dias, é estabelecida algumas idades de exposição para a verificação do avanço da frente de carbonatação. As idades dos ensaios coletados para o banco de dados são muito

diversas. A ISO 1920-12:2015 prescreve uma avaliação das profundidades de carbonatação nas idades de exposição de 56, 63 e 70 dias de exposição. A maior parte dos dados foram analisados nas idades de exposição de 7, 28 e 56 dias. Os resultados podem ser conferidos na Figura 14.

Figura 14 - Variedade das idades de exposição das realizações de ensaios nos dados coletados.



Fonte: Os autores.

Percebe-se que, em geral, as idades dos ensaios analisadas nos estudos não seguem um padrão normativo. Entretanto, as idades de exposição mais frequentes são de 7, 14, 28, 56 e 91 dias.

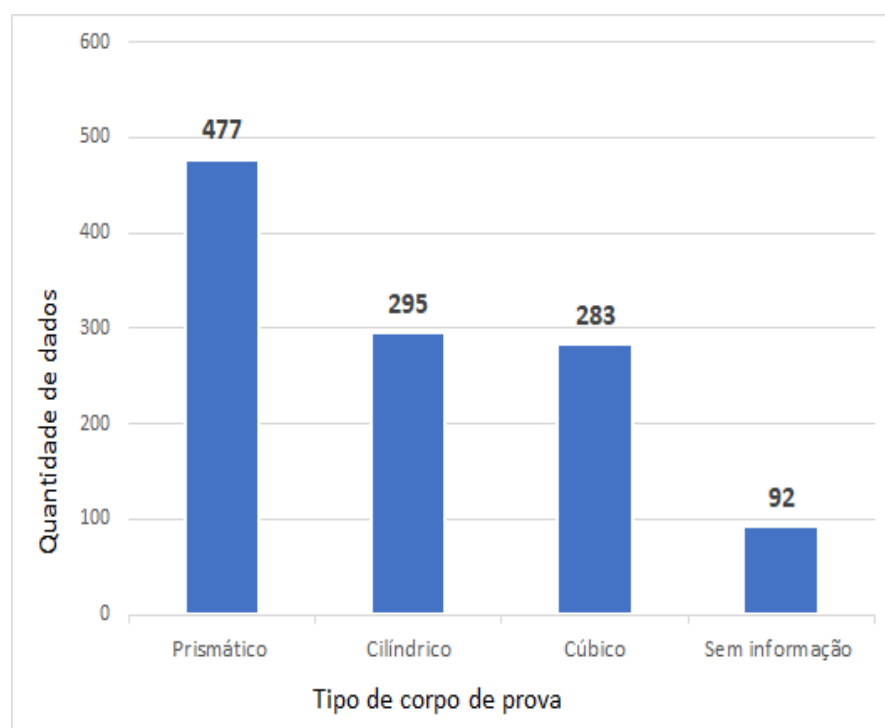
Destaca-se a importância de realizar o ensaio em idades de ensaio mais avançadas, de forma que a profundidade de carbonatação seja avaliada em mais de uma idade de ensaio. Essa estratégia permite verificar a carbonatação até a sua estabilização e impede conclusões e resultados errôneos e precipitados.

4.1.6 Tipos de corpo de prova

Para ensaios de carbonatação acelerada, o tipo e a forma do corpo de prova, também tem se mostrado um importante parâmetro a ser considerado. Têm-se constatado em algumas análises, cenários que para as mesmas condições de ensaio aplicadas a corpos de provas diferentes, obtêm-se também resultados diferentes (MIRANDA, 2018).

A variabilidade de geometrias dos corpos de prova utilizados nas pesquisas que compõem o banco de dados criado neste estudo está representada graficamente na Figura 15 a seguir.

Figura 15 - Variabilidade dos tipos de corpos de prova em função da quantidade de amostras.



Fonte: Os autores.

Os tipos de corpos de prova recomendados pela ISO 1920-12:2015 são do tipo prismático ou cúbico, que correspondem a 760 dos 1147 dados analisados. Essa variabilidade também pode ocasionar imprecisões em estudos comparativos. Levantamentos realizados por Kulakowski (2002) e por Miranda (2018) constataram

que a profundidade de carbonatação é maior em amostras cilíndricas do que em amostras prismáticas devido à sobreposição de vetores de difusão de CO_2 . De acordo com Pauletti (2007) cada uma dessas geometrias podem apresentar vantagens em diferentes tipos de levantamento.

4.2 IMPACTO DA RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTES

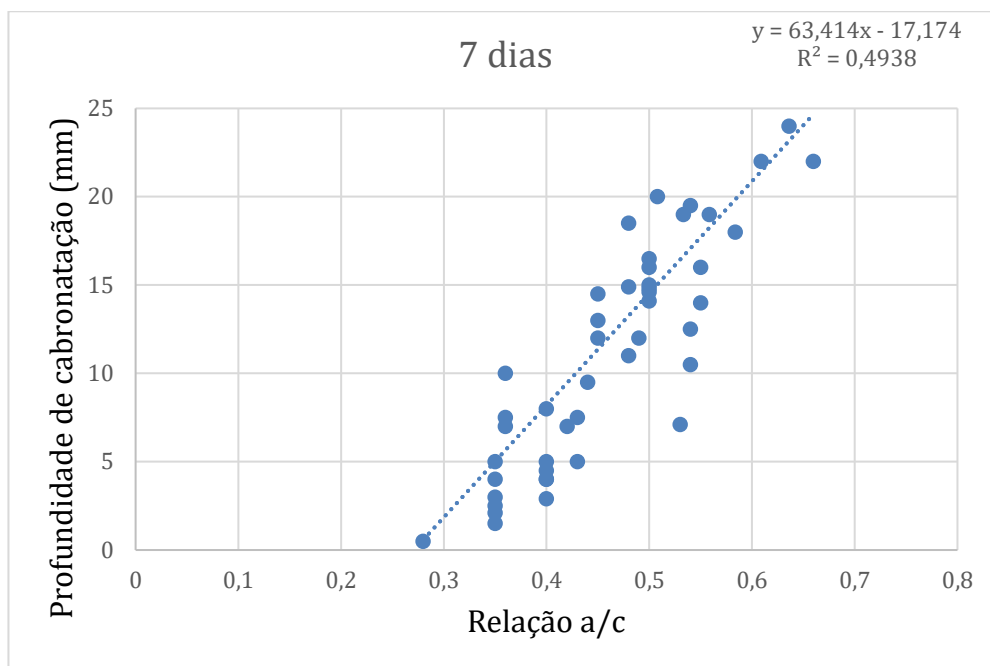
4.2.1 Concreto convencional

O avanço da frente de carbonatação está diretamente relacionado com a facilidade que o CO_2 encontra para difundir-se. Quanto maior a permeabilidade de materiais cimentícios, maior a penetração de CO_2 (BERTOS et al., 2004). A relação água/aglomerantes é responsável pelo tamanho dos poros e também por sua continuidade. Quando essa relação é alta, a continuidade dos poros capilares é reduzida, podendo até serem desconectados (SILVA, 2007).

Kobuku & Nagataki (1989) verificaram que para relações água/aglomerante mais elevadas (acima de 0,60), com um tempo de exposição natural de um ano de CO_2 , já é possível colher dados referentes a profundidade na frente de carbonatação. Contudo, para concretos com relações água/aglomerante menores (inferiores a 0,50), para determinar a profundidade de carbonatação pode levar até 20 anos.

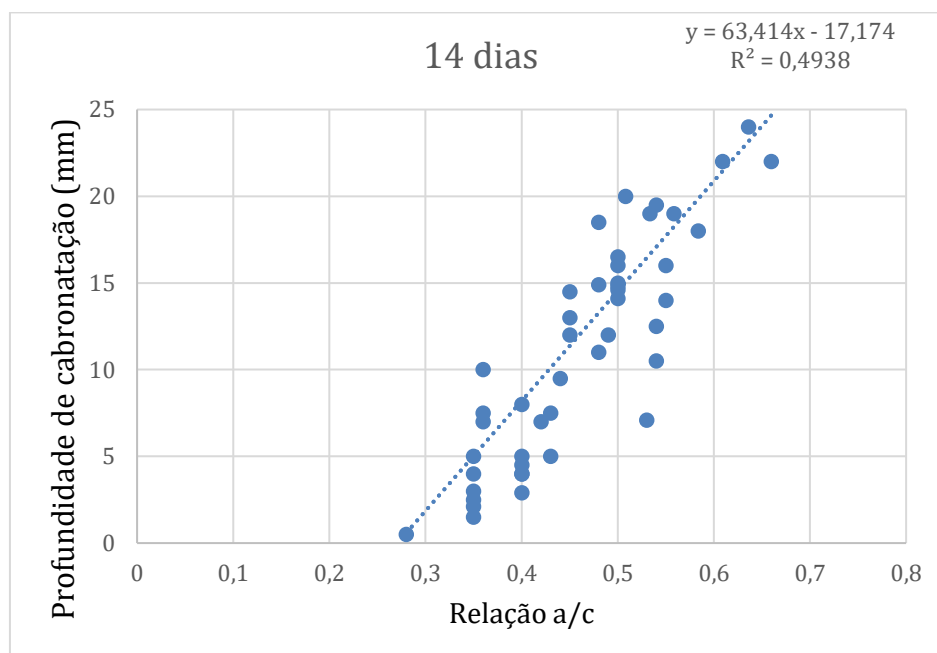
Foi realizada uma análise da relação água/aglomerantes em função da profundidade de carbonatação para que fosse possível avaliar qual seria a tendência de comportamento para variados tipos de concretos convencionais. A análise foi filtrada para idades de ensaio com um campo amostral mais significativo e estão representados a seguir nas Figuras de 16 a 20.

Figuras 16 - Relação entre relação água/aglomerantes e a profundidade de carbonatação acelerada com 7 dias de exposição ao CO_2 .



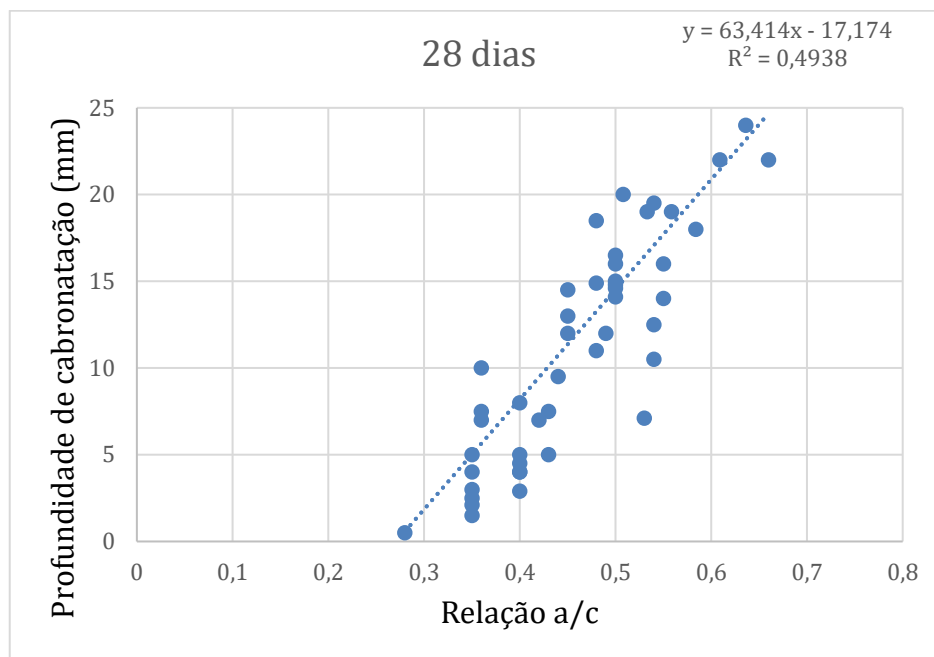
Fonte: Os autores.

Figuras 17 - Relação entre relação água/aglomerantes e a profundidade de carbonatação acelerada com 14 dias de exposição ao CO_2 .



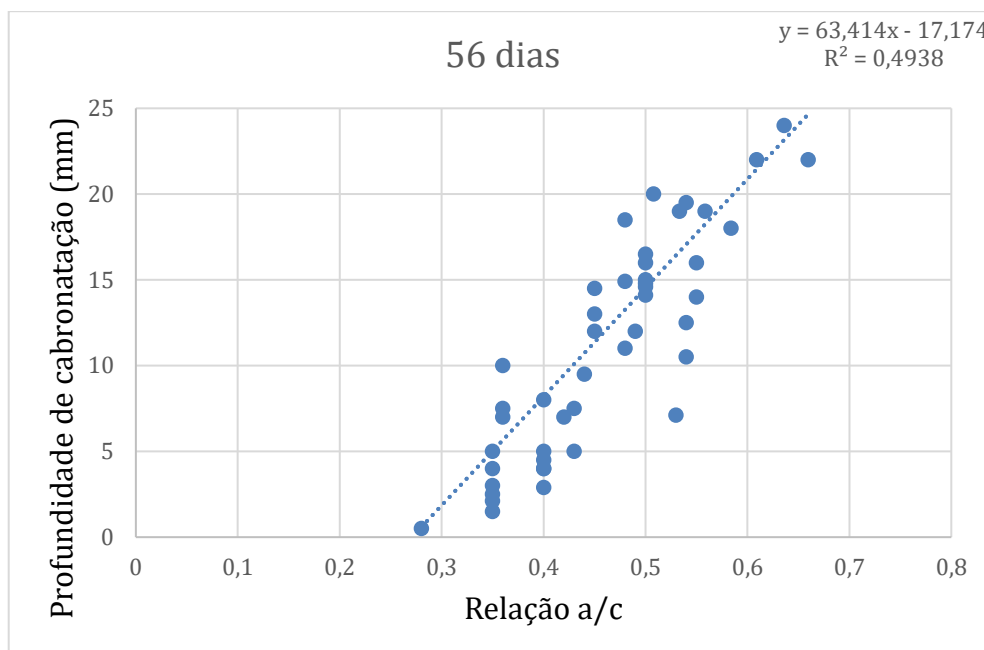
Fonte: Os autores.

Figura 18 - Relação entre relação água/aglomerantes e a profundidade de carbonatação acelerada com 28 dias de exposição ao CO_2 .



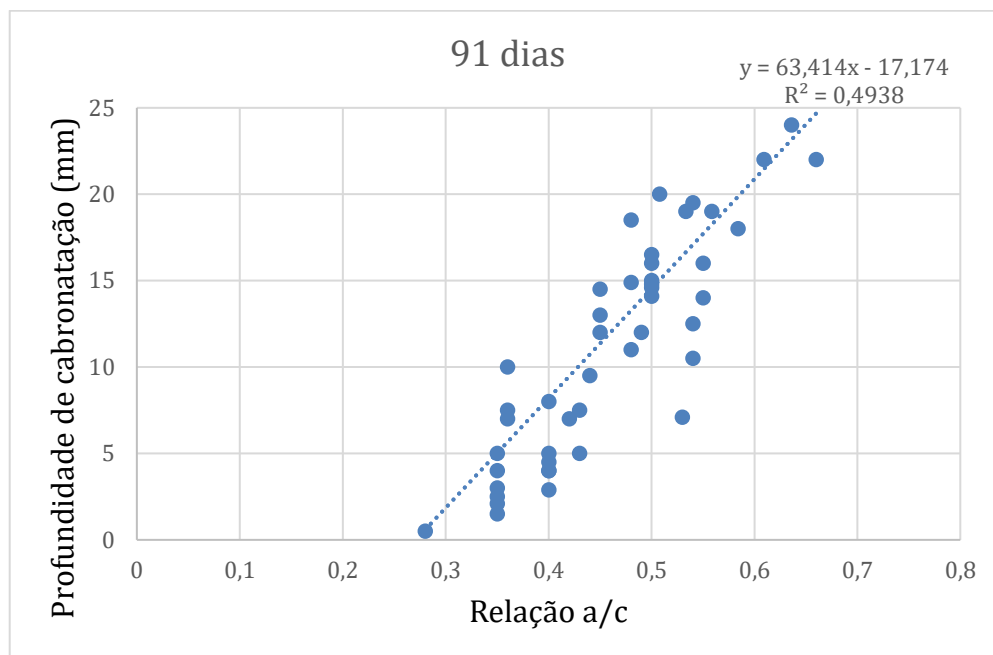
Fonte: Os autores.

Figura 19 - Relação entre relação água/aglomerantes e a profundidade de carbonatação acelerada com 56 dias de exposição ao CO_2 .



Fonte: Os autores.

Figura 20 - Relação entre relação água/aglomerantes e a profundidade de carbonatação acelerada com 91 dias de exposição ao CO_2 .



Fonte: Os autores.

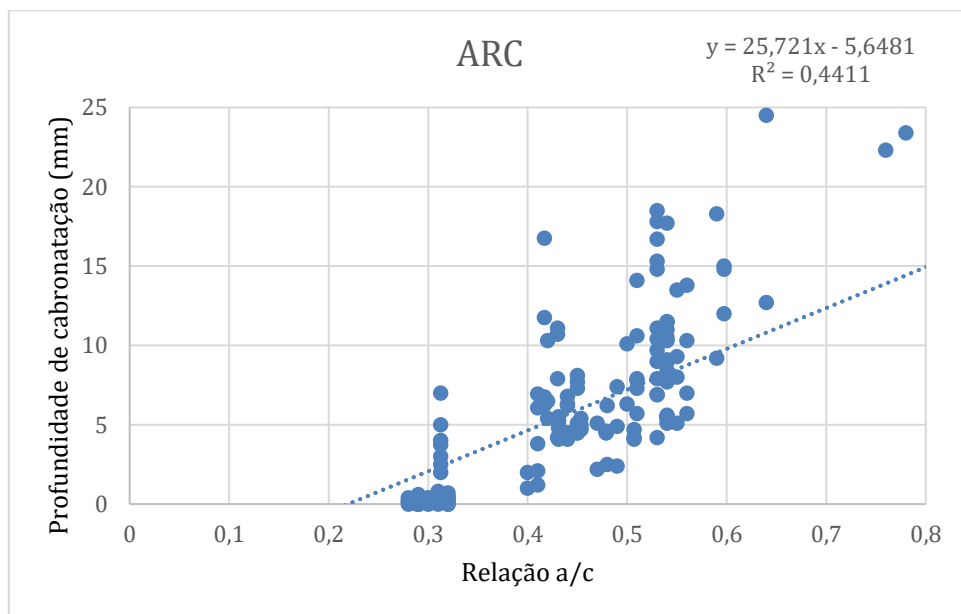
É possível observar que a tendência dos pontos apresenta um comportamento linear, de grandeza diretamente proporcional. Quanto maior a relação água/aglomerantes maior a profundidade de carbonatação. Foi inserido um fator de ajuste “R²” para verificar quão próximos os dados estão da linha de regressão ajustada. A tabela de dados apresenta uma dispersão muito grande de tipos de concretos, com diferentes adições, desta forma, o ajuste é consideravelmente satisfatório, confirmando nossas análises.

O resultado encontrado está de acordo com conclusões de outros pesquisadores, como, Bostanci *et al.* (2016) que analisou diferentes corpos de prova carbonatados com traços de concretos distintos, e constatou que a profundidade de carbonatação aumentou significativamente conforme o aumento da relação água/aglomerantes para cada corpo de prova.

4.2.2 Concreto com agregados reciclados

Para os concretos com agregados reciclados, o número de resultados é um valor significativamente menor. Foi realizada a análise da tendência da relação água/aglomerantes em relação à profundidade de carbonatação para constatar o mesmo comportamento independente do tipo de concreto. O resultado está expresso na Figura 21 a seguir.

Figura 21 - Relação água/aglomerantes em função da profundidade de carbonatação para concreto com agregados reciclados contemplando todas as idades de ensaio.



Fonte: Os autores.

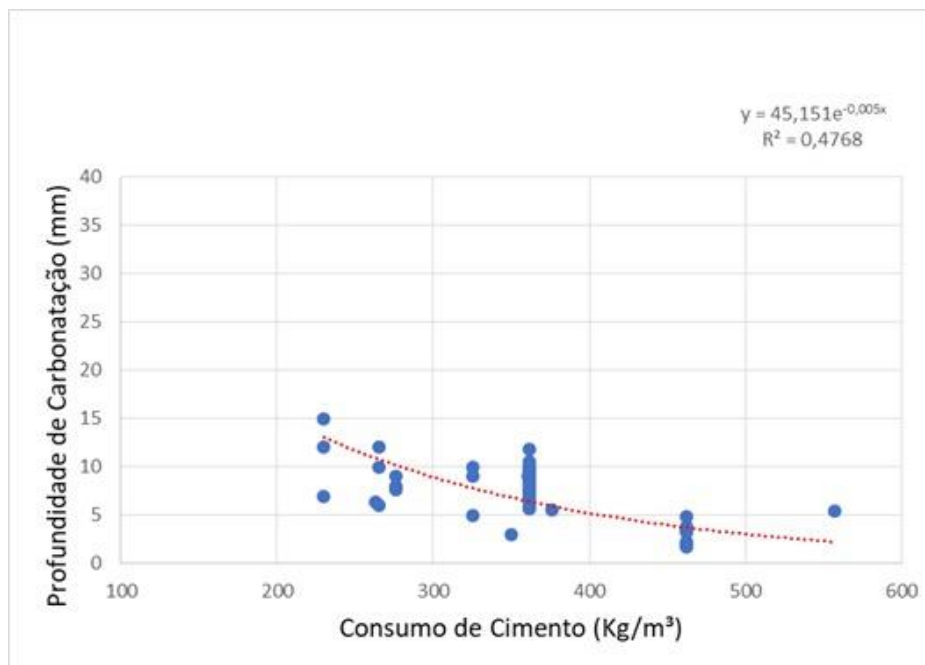
Pode-se constatar que o comportamento da profundidade de carbonatação do concreto no que se refere à relação água/aglomerantes independe da utilização de agregado reciclado.

4.3 IMPACTO DO CONSUMO DE CIMENTO

4.3.1 Concreto convencional

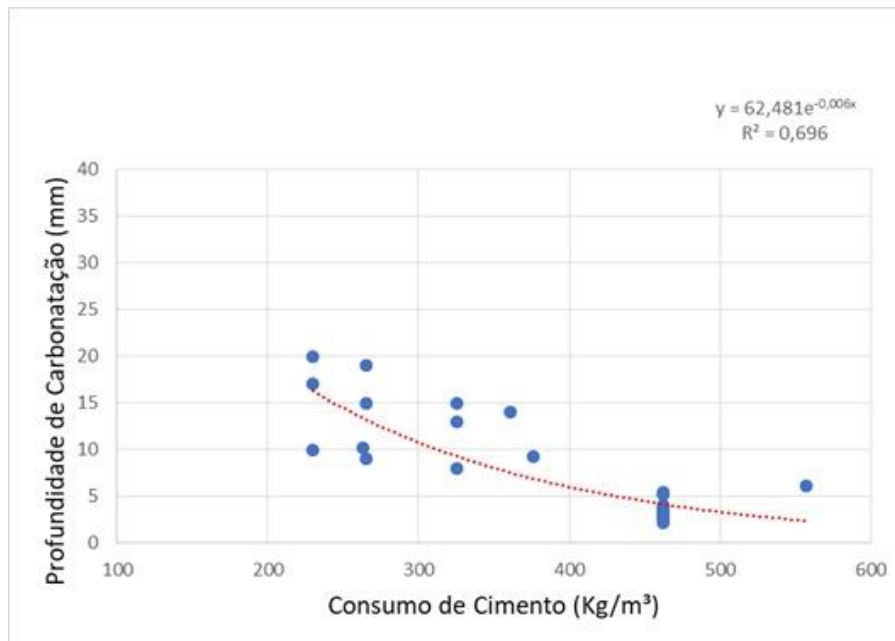
Verificou-se o impacto do consumo de cimento na profundidade de carbonatação do concreto. Para isso, utilizaram-se apenas os dados de experimentos que utilizaram concreto convencional com ou sem adições. A análise foi feita para corpos de prova submetidos a 7, 14, 28, 56 e 91 dias de exposição à carbonatação acelerada. Os resultados são apresentados a seguir nos gráficos das Figuras 22 a 26.

Figura 22 - Relação entre o consumo de cimento e a profundidade de carbonatação acelerada com 7 dias de exposição ao CO_2



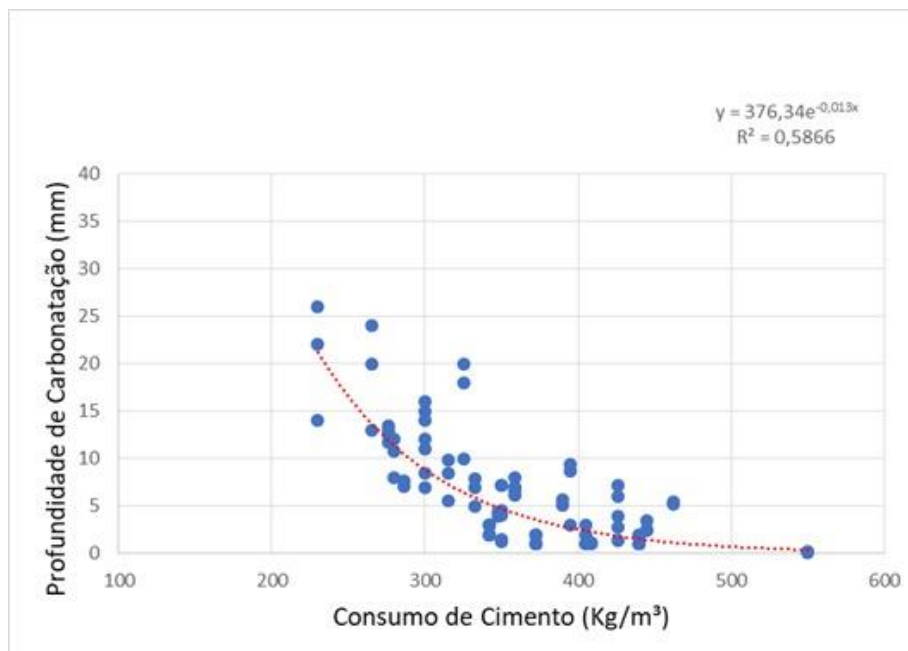
Fonte: Os autores.

Figuras 23 - Relação entre o consumo de cimento e a profundidade de carbonatação acelerada com 14 dias de exposição ao CO_2



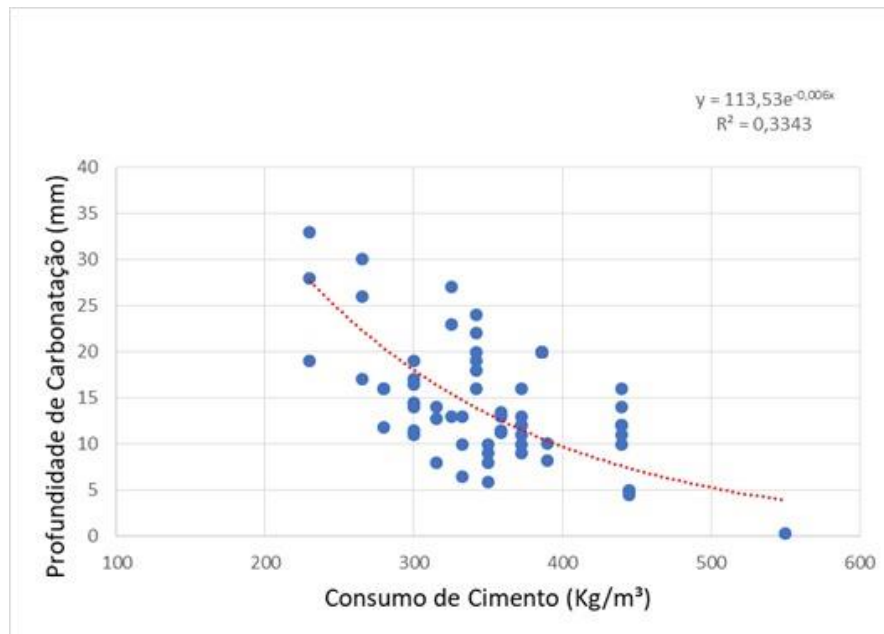
Fonte: Os autores.

Figura 24 - Relação entre o consumo de cimento e a profundidade de carbonatação acelerada com 28 dias de exposição ao CO_2 .



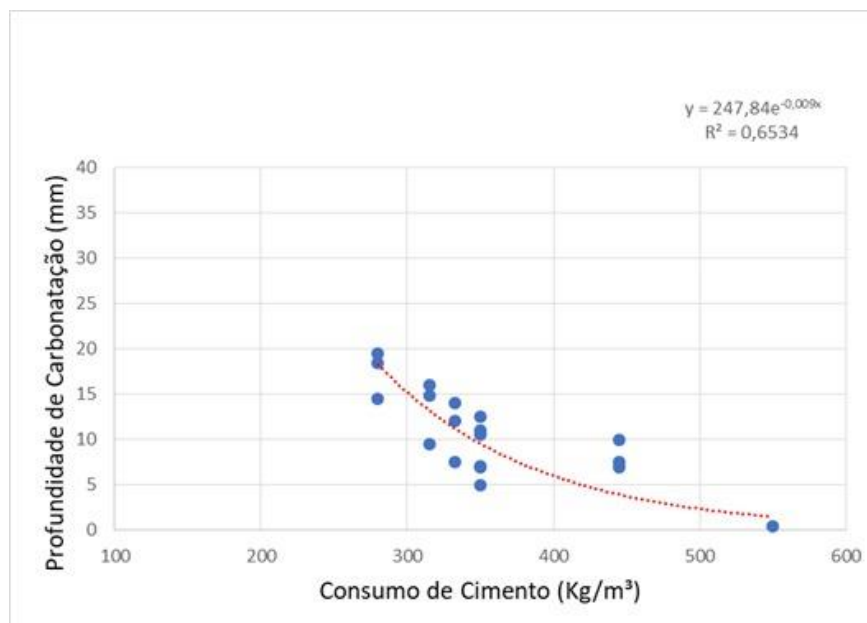
Fonte: Os autores.

Figura 25 - Relação entre o consumo de cimento e a profundidade de carbonatação acelerada com 56 dias de exposição ao CO_2 .



Fonte: Os autores.

Figura 26 - Relação entre o consumo de cimento e a profundidade de carbonatação acelerada com 91 dias de exposição ao CO_2 .



Fonte: Os autores.

Observou-se que, de fato, a profundidade de carbonatação diminui com o aumento do consumo de cimento. Além disso, percebeu-se uma tendência exponencial em

todos os gráficos.

O consumo de cimento afeta diretamente a microestrutura do concreto. Concretos com maior consumo de cimento, para uma mesma relação água/aglomerante, tendem a apresentar menor porosidade. A menor porosidade reduz a difusividade do material, diminuindo a profundidade de carbonatação. Foi inserido um fator de ajuste “R²” para verificar quão próximos os dados estão da linha de regressão ajustada. A tabela de dados apresenta uma dispersão muito grande de tipos de concretos, com diferentes adições, desta forma, o ajuste é consideravelmente satisfatório, com exceção para o tempo de exposição de 56.

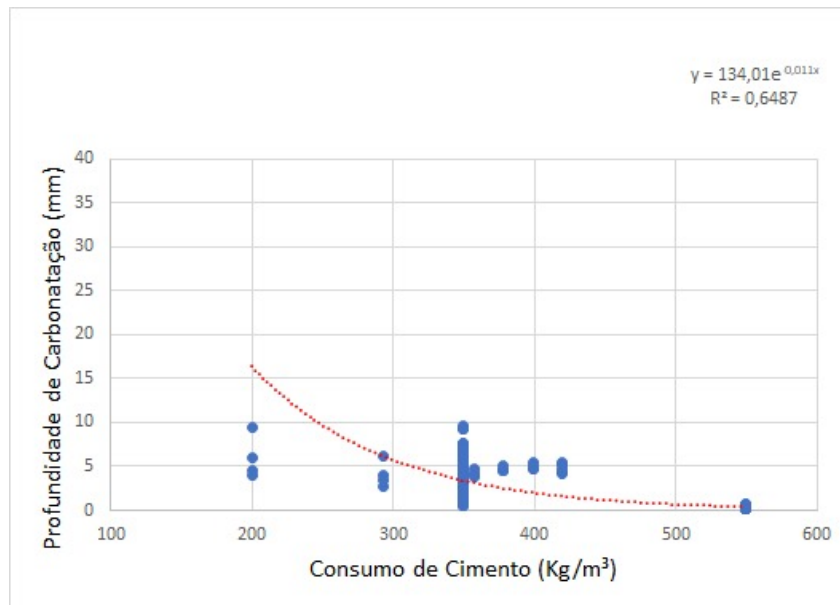
A frente de carbonatação também pode ser influenciada pelo teor e tipo de cimento. Para concretos com maior quantidade de $Ca(OH)_2$ a tendência é reduzir o avanço da frente de carbonatação devido a maior reserva alcalina. Já cimentos como CP III ou CP IV tendem a carbonatar mais devido à reserva alcalina.

4.3.2 Concreto com agregados reciclados

A análise do consumo de cimento e a profundidade de carbonatação também foi feita para concreto produzido com agregado reciclado. Pela quantidade reduzida de amostras desse tipo de concreto, a análise não considerou a diferença de idade de ensaio dos espécimes.

Devido ao número reduzido de pesquisas envolvendo concreto contendo agregado reciclado, não foi possível realizar a análise para os mesmos 7, 14, 28, 56 e 91 dias. Apesar disso, foi possível verificar uma tendência semelhante em uma análise com todos os pontos., independente da idade de exposição. Esta análise é apresentada no gráfico da figura 27.

Figura 27 – Consumo de cimento em função da profundidade de carbonatação para concreto com agregados reciclados contemplando todas as idades de ensaio.



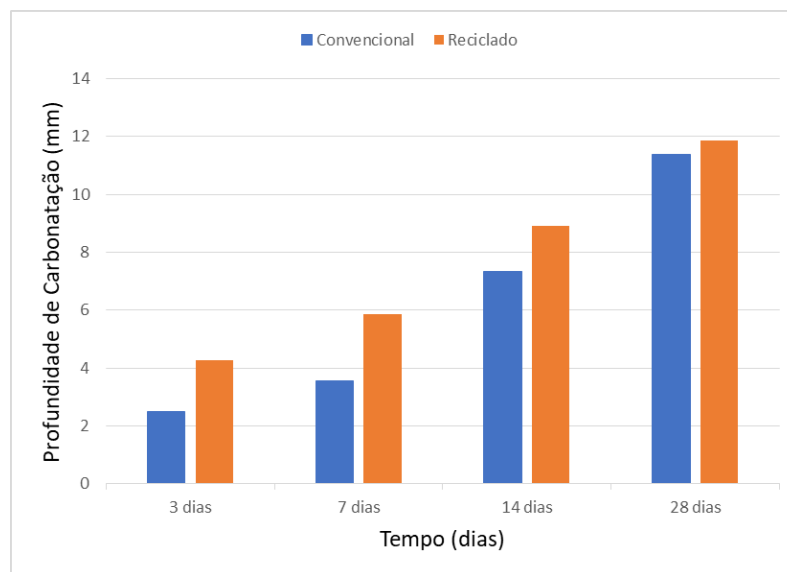
Fonte: Os autores.

Verifica-se que o comportamento para o concreto contendo agregado reciclado foi similar ao concreto convencional. A profundidade tende a decrescer exponencialmente com o aumento do consumo de cimento.

4.4 COMPARAÇÃO ENTRE CONCRETOS CONVENCIONAIS E CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS NA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

Comparou-se a profundidade de carbonatação em concreto convencional e concreto contendo agregado reciclado, filtrando os resultados do banco de dados para concretos com concentração de CO_2 em 20% e relação água/aglomerantes em $0,5 \pm 0,1$. A Figura 28 a seguir apresenta a média da profundidade de carbonatação dos resultados contidos no banco de dados para as idades de ensaio de 3, 7, 14 e 28 dias e para os dois tipos de concreto.

Figura 28 - Comparação de resultados da profundidade de carbonatação em concreto convencional e concreto contendo agregado reciclado.



Fonte: Os autores.

Verificou-se que a carbonatação ocorre de forma diferente em concreto contendo agregado reciclado. Para todos os dias analisados percebeu-se que a frente de carbonatação, para ensaios nas mesmas condições, avança com maior velocidade em concretos contendo agregado reciclado. Essa tendência se deve à maior porosidade do concreto contendo agregado reciclado e a dupla zona de transição que são responsáveis por facilitar a difusão de CO_2 .

Esse resultado foi visto em outros trabalhos, como nos de Vieira (2015) e Bravo (2018). Vieira *et al.* (2015) demonstra que a profundidade da frente de carbonatação avança com maior velocidade quanto maiores os teores de substituição dos agregados naturais por ARC.

5 CONCLUSÃO

Este capítulo apresenta as principais conclusões obtidas na pesquisa. O enfoque do estudo foi fazer um levantamento dos resultados sobre os ensaios de carbonatação acelerada encontrados na literatura, a fim de verificar tendências do concreto perante a variação dos parâmetros. Foram utilizados, para isso, 40 dos trabalhos experimentais mais relevantes produzidos nos últimos cinco anos em que esse ensaio foi aplicado.

O levantamento indicou que boa parte dos trabalhos, mesmo tendo sua publicação posterior à vigência da ISO 1920-12:2015 - norma internacional que prescreve o ensaio de carbonatação acelerada -, não seguem as recomendações normativas. Parâmetros de ensaio como concentração de CO_2 , idade dos ensaios e tipos de corpos de prova que, de acordo com a literatura, são variáveis relevantes no que diz respeito à carbonatação, apresentam muita variação entre as pesquisas, o que dificulta estudos comparativos de resultados. Por outro lado, a temperatura e umidade relativa não apresentam grande variabilidade. Além disso, a medição da profundidade de carbonatação utilizando fenolftaleína foi a mais utilizada.

Nos estudos analisados, a profundidade de carbonatação foi maior em ensaios realizados sob concentração de CO_2 de 20% comparado aos que foram realizados com a concentração de 5%. A relação água/aglomerantes é um fator relevante para a resistência à carbonatação do concreto, e existe uma tendência crescente e linear da profundidade da frente de carbonatação com o aumento dessa relação. A mesma tendência foi observada tanto para concreto convencional quanto para concreto contendo agregado reciclado (ARC). A profundidade de carbonatação, em média, aumenta com o aumento da idade do ensaio, tanto para o concreto convencional quanto para o concreto contendo ARC.

Observou-se que, tanto para o concreto convencional quanto para o concreto contendo ARC, a profundidade de carbonatação segue uma tendência decrescente e exponencial, de acordo com o aumento do consumo de cimento. Em média, a profundidade de carbonatação tende a ser maior em concreto contendo agregado reciclado (ARC) comparado ao concreto convencional. Essa diminuição se deve à maior porosidade e à dupla zona de transição quando se trabalha com concreto

contendo ARC.

A realização do estudo permitiu verificar como os parâmetros de ensaio e fatores relacionados à composição do concreto influenciam no avanço da frente de carbonatação. Além disso, permitiu verificar o quanto essas variáveis variam em as pesquisas. Essas conclusões deixam clara a necessidade de padronização dos ensaios a fim de facilitar a comparação de resultados entre estudos.

REFERÊNCIAS

_____. NBR 6118: **Projetos de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. TC 116-PCD: permeability of concrete as a criterion of its durability: tests for gas permeability of concrete. (RILEM Recommendation TC 116-PCD). *Materials and Structures*, v. 32, p. 174-179, Apr. 1999.

ABREU, A. G. **Estudo da corrosão da armadura induzida por carbonatação em concretos com cinza volante**. 2004. 212 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

AFROUGHSABET, V; OZBAKKALOGLU, T. **Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers** – *Journal ELSEVIER:Construction and Building Materials* – Volume 94 – 30 de setembro de 2015, pg 73-82.

ALEXANDRIDOU, C.; ANGELOPOULOS, G. N.; COUTELIERIS, F. A. - **Mechanical and durability performance of concrete produced with recycled aggregates from Greek construction and demolition waste plants** – *Journal of Cleaner Production* 176 (2018) 745 – 757.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E632-82; **Standard practice for developing accelerated tests to aid prediction of the service life of building components and materials**. 1996.

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

ARIF, M., GUPTA, V., CHOUDHARY, H., KUMAR, S., & BASU, P. (2018). **Performance evaluation of cement concrete containing sandstone slurry**. *Construction and Building Materials*, 184, 432–439.

ATIS, C.D. (2004). **Carbonation-Porosity-Strength Model for fly ash concrete**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, p. 91-94.

BEHFARNIA, K.; ROSTAMI, M. - **Mechanical Properties and Durability of Fiber Reinforced Alkali Activated Slag Concrete** – *American Society of Civil Engineers* (2017).

BOSTANCI, Ş. C., LIMBACHIYA, M., & KEW, H. (2016). **Portland slag and composites cement concretes: engineering and durability properties**. *Journal of Cleaner Production*, 112, 542–552. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.070

BRAVO, B.; BRITO, J.; PONTES, J.; EVANGELISTA, L. - **Durability performance of concrete with recycled aggregates from construction and demolition waste plants** – *Journal ELSEVIER: Construction and Building Materials* 77 (2015) 357–369.

BRAVO, M., DE BRITO, J., EVANGELISTA, L., & PACHECO, J. (2018). **Durability and shrinkage of concrete with CDW as recycled aggregates: Benefits from superplasticizer's incorporation and influence of CDW composition**. *Construction and Building Materials*, 168, 818–830.

BROOMFIELD, JP. **Corrosion of steel in concrete**. 2nd edn. Taylor and Francis, London and New York. (2007).

BUCHER, R., DIEDERICH, P., ESCADEILLAS, G., & CYR, M. (2017). **Service life of metakaolin-based concrete exposed to carbonation**. *Cement and Concrete Research*, 99, 18–29.

CALABRIA, REGGIO (2017). **Economy, Business and Uncertainty: ideas for a European and Mediterranean industrial policy?** XXVI Congresso Internacional AEDEM -International Conference

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

CEB. **Durability of concrete structures**. CEB Bulletin D' Information.n. 152. Copenhagen.

DE BRITO, J., FERREIRA, J., PACHECO, J., SOARES, D., & GUERREIRO, M. (2016). **Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete**. *Journal of Building Engineering*, 6, 1–16.

DEMIRHAN, S., TURK, K., & ULUGERGER, K. (2019). **Fresh and hardened properties of self consolidating Portland limestone cement mortars: Effect of high volume limestone powder replaced by cement**. *Construction and Building Materials*, 196, 115–125.

GENTIL, V. *Corrosão*. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996. 345 p.

HÄRDTL, R.; SCHIESSL, P.; WIENS, U. **Limits of pozzolanic additions with respect to alkalinity and corrosion protection of reinforcement.** In: DURABILITY OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE, 1994, Vienna. Proceedings... Vienna: RILEM, p. 189 – 193, 1994.

HE, T., XU, R., CHEN, C., YANG, L., YANG, R., & DA, Y. (2018). **Carbonation modeling analysis on carbonation behavior of sand autoclaved aerated concrete.** Construction and Building Materials, 189, 102–108.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 231p. Tese (Livre Docência) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. (1992). **Manual de dosagem e controle do concreto.** São Paulo: Pini.

INTERNATIONAL STANDARD. ISO 1920-12:2015 – **Testing of concrete – Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete – Accelerated carbonation method.** Geneva, Switzerland.

ISHIDA, T. H. RR. **Development of numerical model for FEM computation of oxygen transport through porous media coupled with micro-cell corrosion model of steel in concrete structures.** Comput Struct, 2010.

JANG, J. G., & LEE, H. K. (2016). **Microstructural densification and CO₂ uptake promoted by the carbonation curing of belite-rich Portland cement.** Cement and Concrete Research, 82, 50–57.

JEONG, Y.-W., KOH, T.-H., YOUM, K.-S., & MOON, J. (2017). **Experimental Evaluation of Thermal Performance and Durability of Thermally-Enhanced Concretes.** Applied Sciences, 7(8), 811.

JIANG, C., HUANG, Q., GU, X., & ZHANG, W. (2017). **Experimental investigation on carbonation in fatigue-damaged concrete.** Cement and Concrete Research, 99, 38–52.

KAZMIERCZAK, C. S. **Desempenho de alvenarias de materiais cerâmicos à penetração de água da chuva: uma análise de fatores condicionantes.** 1989. 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1989.

KIM, D., KIM, C.-Y., URGESSA, G., HYEOK CHOI, J., PARK, C., & YEON, J. H. (2019). **Durability and rheological characteristics of high-volume ground-granulated blast-furnace slag concrete containing CaCO₃/anhydrate-based alkali activator.** *Construction and Building Materials*, 204, 10–19.

KIM, G., KIM, J.-Y., KURTIS, K. E., JACOBS, L. J., LE PAPE, Y., & GUIMARAES, M. (2014). **Quantitative evaluation of carbonation in concrete using nonlinear ultrasound.** *Materials and Structures*, 49(1-2), 399–409.

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

KUMAR, S., GUPTA, R. C., & SHRIVASTAVA, S. (2017). **Long term studies on the utilisation of quartz sandstone wastes in cement concrete.** *Journal of Cleaner Production*, 143, 634–642.

KURDA, R.; BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. - **Carbonation of concrete made with high amount of fly ash and recycled concrete aggregates for utilization of CO₂** – *Journal of CO₂ Utilization* 29 (2019) 12–19.

LAW, D. W; ADAM, A. A.; MOLYNEAUX, T. K.; PATNAIKUNI, I.; WARDHONO, A. - **Long term durability properties of class F fly ash geopolymer concrete** - *Materials and Structures* (2015) 48:721–731, 2014.

LI, Z., & LI, S. (2018). **Carbonation resistance of fly ash and blast furnace slag based geopolymer concrete.** *Construction and Building Materials*, 163, 668–680.

LIU, J., QIU, Q., CHEN, X., WANG, X., XING, F., HAN, N., & HE, Y. (2016). **Degradation of fly ash concrete under the coupled effect of carbonation and chloride aerosol ingress.** *Corrosion Science*, 112, 364–372.

LIU, Z., HU, W., HOU, L., & DENG, D. (2018). **Effect of carbonation on physical sulfate attack on concrete by Na₂SO₄.** *Construction and Building Materials*, 193, 211–220.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria; **Fundamentos de metodologia científica.** 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003, 311 páginas.

MAZZA, Roger. **Carbonatação Acelerada de Concretos com Cinza de Casca de Arroz Sem Moagem**. 2015. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

MEENA, K., & LUHAR, S. (2018). Effect of wastewater on properties of Concrete. *Journal of Building Engineering*.

MEHTA. P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª ed. São Paulo: Ed. IBRACON, 2014.

MEIRA. G. R. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto**. 1ª ed. Editora IFPB. 2017.

MIRANDA, L. R. M. 2018. **Carbonatação em concretos autoadensáveis com substituições de cimento Portland por adições minerais**. Dissertação de Mestrado em estruturas de construção civil. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Brasília. 2018.

MUDULI, R., & MUKHARJEE, B. B. (2020). **Performance assessment of concrete incorporating recycled coarse aggregates and metakaolin: A systematic approach**. *Construction and Building Materials*, 233, 117223.

NEVES, R; BRANCO, FA; BRITO, J. **A method for the use of accelerated carbonation tests in durability design**. *Constr Build Mater* 2012;36:585–91.

NEVILLE, A. M. – **Propriedades do concreto**. 5ª ed. São Paulo, Ed. BookMan 2016.

NEVILLE, AM; BROOKS, JJ. (2010) **Concrete technology**. 2nd ed. United Kingdom: Pearson; 2010.

NGALA, V.T.; PAGE, C.L. (1997). **Effects of carbonation on pore structure and diffusional properties of hydrated cement pastes**. *Cement and concrete Research*, v.34, p. 2937-2945.

NILI M; AFROUGHSABET,V. **The long-term compressive strength and durability properties of silica fume fiber-reinforced concrete**. *Materials Science and Engineering: A*, 2012.

PAN, H., YANG, Z., & XU, F. (2016). **Study on concrete structure's durability considering the interaction of multi-factors**. *Construction and Building Materials*, 118, 256–261.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. 2004. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Curso de Pós-Graduação

em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

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

PEDRO, D., DE BRITO, J., & EVANGELISTA, L. (2017). **Structural concrete with simultaneous incorporation of fine and coarse recycled concrete aggregates: Mechanical, durability and long-term properties**. Construction and Building Materials, 154, 294–309.

PEDRO, D., DE BRITO, J., & EVANGELISTA, L. (2018). **Durability performance of high-performance concrete made with recycled aggregates, fly ash and densified silica fume**. Cement and Concrete Composites, 93, 63–74.

PENG, J., TANG, H., ZHANG, J., & CAI, S. C. S. (2018). **Numerical Simulation on Carbonation Depth of Concrete Structures considering Time- and Temperature-Dependent Carbonation Process**. Advances in Materials Science and Engineering, 2018, 1–16.

PHAM, T. M., ELCHALAKANI, M., HAO, H., LAI, J., AMEDURI, S., & TRAN, T. M. (2019). **Durability characteristics of lightweight rubberized concrete**. Construction and Building Materials, 224, 584–599.

PHAM, T. M.; ELCHALAKANI, M.; HAO, H.; LAI, J.; AMEDURI, S.; TRAN, T. M. - **Durability characteristics of lightweight rubberized concrete** – Construction and Building Materials 224 (2019) 584–599.

POURBAIX, M. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions**. Brussels: CEBELCOR, 1974. 644 p.

RECENA, Fernando Antonio Piazza. **Dosagem e controle da qualidade de concretos convencionais de cimento Portland**. 2015. 3ª ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2015.

REIS RUI; MALHHEIRO, R.; CAMÕES, A.; RIBEIRO, M. - **Carbonation resistance of high volume fly ash concrete** - Engineering Materials Vol 634 (2015) pg 288-299.

REUNION INTERNATIONALE DE LABORATOIRES D'ESSAIS ET MATERIAUX. CPC-18: Measurement of hardened concrete carbonation depth. (RILEM Recommendations CPC-18). **Materials and Structures**, [s. n.], p. 453-455, 1988.

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; SOUSA, C. A. C. DE; *et al.* **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria Controle e Métodos de Análise**. 1 a ed. Elsevier, 2014.

RICHARDSON, M. G. (1988). **Carbonation of reinforced concrete: Its causes and management**. New York: CITIS Ltd. Publishers.

ROY, S. K.; POH, K. B.; NORTHWOOD, D. O. **Durability of concrete: accelerated carbonation and weathering studies**. Building and Environment, n. 34, p. 597-606, 1999.

SAMOUEH, H., ROZIÈRE, E., WISNIEWSKI, V., & LOUKILI, A. (2017). **Consequences of longer sealed curing on drying shrinkage, cracking and carbonation of concrete**. Cement and Concrete Research, 95, 117–131.

SANJUÁN, M. A.; OLMO, C. del. **Carbonation resistance of one industrial mortar used as a concrete coating**. Building and Environment, v. 36, n. 8, p. 949-953, Oct. 2001.

SARDINHA, M., DE BRITO, J., & RODRIGUES, R. (2016). **Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge**. Construction and Building Materials, 119, 45–52.

SAVIJA, B.; LUKOVIC, M. - **Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities** - Construction and Building Materials 117 (2016) 285–301, 2016.

ŠEFFLOVÁ, M.; PAVLŮ, T. - **The Carbonation Depth of Fine Recycled Aggregate Concrete** – Key Engineering Materials Submitted: 2016-07-29 ISSN: 1662-9795, Vol. 722, pp 228-232 (2016).

SHETTIMA, A. U.; HUSSIN, M. W.; YUSOF AHMAD; JAHANGIR MIRZA- **Evaluation of iron ore tailings as replacement for fine aggregate in concrete** – Construction and Building Materials 120 (2016) 72–79 (2016).

SHUI, Z. H., YU, R., CHEN, Y. X., DUAN, P., MA, J. T., & WANG, X. P. (2018). **Improvement of concrete carbonation resistance based on a structure modified Layered Double Hydroxides (LDHs): Experiments and mechanism analysis**. Construction and Building Materials, 176, 228–240.

SILVA, V. M. 2007. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2007.

SINGH, S., NANDE, N., BANSAL, P., & NAGAR, R. (2017). **Experimental Investigation of Sustainable Concrete Made with Granite Industry By-Product**. Journal of Materials in Civil

Engineering, 29(6), 04017017.

TANG, J., WU, J., ZOU, Z., YUE, A., & MUELLER, A. (2018). **Influence of axial loading and carbonation age on the carbonation resistance of recycled aggregate concrete.** Construction and Building Materials, 173, 707–717.

TAYLOR, H. F. W. (1997). **Cement Chemistry.** Ed 2. London. Thomas Telford.

THOMAS, B. S.; GUPTA, R. C.; MEHRA, P.; KUMAR, S. - **Performance of high strength rubberized concrete in aggressive environment** - Construction and Building Materials 83 (2015) 320–326.

TIAN, Z., ZHAO, Z., DAI, C., & LIU, S. (2016). **Experimental Study on the Properties of Concrete Mixed with Iron Ore Tailings.** Advances in Materials Science and Engineering, 2016, 1–9.

TORRES, H., CORREA, E., CASTAÑO, J. G., & ECHEVERRÍA, F. (2017). **Simplified Mathematical Model for Concrete Carbonation.** Journal of Materials in Civil Engineering, 29(10), 04017150.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete.** Sweden: CBI, 1982. 468 p.

VIEIRA, T., ALVES, A., DE BRITO, J., CORREIA, J. R., & SILVA, R. V. (2016). **Durability-related performance of concrete containing fine recycled aggregates from crushed bricks and sanitary ware.** Materials & Design, 90, 767–776. doi:10.1016/j.matdes.2015.11.023

VISSER, J. H. M. (2014). **Influence of the carbon dioxide concentration on the resistance to carbonation of concrete.** Construction and Building Materials, 67, 8–13.

WANG, C., XIAO, J., ZHANG, G., & LI, L. (2016). **Interfacial properties of modeled recycled aggregate concrete modified by carbonation.** Construction and Building Materials, 105, 307–320.

WANG, W., LU, C., LI, Y., YUAN, G., & LI, Q. (2017). **Effects of stress and high temperature on the carbonation resistance of fly ash concrete.** Construction and Building Materials, 138, 486–495.

ZHANG, D., MAO, M., YANG, Q., ZHANG, W., & HAN, P. (2019). **Experimental Investigation of Neutralisation of Concrete with Fly Ash as Fine Aggregate in Freeze-Thaw Environment.** Advances in Civil Engineering, 2019, 1–12.

ZHANG, P., LI, Q., CHEN, Y., SHI, Y., & LING, Y.-F. (2019). **Durability of Steel Fiber-Reinforced Concrete Containing SiO₂ Nano-Particles**. *Materials*, 12(13), 2184.

ZHANG, X., ZHANG, W., LUO, Y., WANG, L., PENG, J., & ZHANG, J. (2020). **Interface Shear Strength between Self-Compacting Concrete and Carbonated Concrete**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(6), 04020113.

ZHAO, Y., GAO, J., CHEN, F., LIU, C., & CHEN, X. (2018). **Utilization of waste clay bricks as coarse and fine aggregates for the preparation of lightweight aggregate concrete**. *Journal of Cleaner Production*, 201, 706–715.