

AVALIAÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO E PREVISÃO DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO NO MUNICÍPIO DE BEBEDOURO, SP

DEPTH ASSESSMENT OF CARBONATION AND FORECAST OF THE SERVICE LIFE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN THE CITY OF BEBEDOURO, SP

Daniel Galhardi¹

Jean Aparecido Bombardin²

Gustavo Henrique Vital Gonçalves³

Luiz Antonio Sarti Junior⁴

RESUMO

A durabilidade é uma das características mais importantes de uma estrutura de concreto armado e, junto a ela, estão as manifestações patológicas que proporcionam uma redução da vida útil da estrutura. Dentre essas manifestações, temos a carbonatação, processo em que ocorre a redução do pH e, como consequência, a despassivação da armadura, que passa a ficar suscetível à corrosão. O objetivo deste trabalho é realizar a análise da profundidade de carbonatação em diferentes traços de concretos e ambientes, a fim de realizar a previsão da vida útil de estruturas com as mesmas características. Para isso, corpos de prova com dois traços diferentes foram confeccionados e distribuídos em locais com diferentes níveis de agressividade ambiental e, através de ensaios realizados em três períodos diferentes, obteve-se as profundidades de carbonatação. Encontrou-se apenas uma estrutura com a vida útil mínima aceitável conforme estabelecido pela norma de desempenho que, como característica, possuía em seu traço uma relação água/cimento menor.

Palavras-chave: Carbonatação. Vida útil. Manifestações patológicas.

ABSTRACT

Durability is one of the most important characteristics of a reinforced concrete structure and side by side with it are the pathological manifestations, which can reduce the useful life of the structure. Among these manifestations, we have carbonation, a process in which the pH is reduced and, as a consequence, there is the depassivation of the reinforcement that will become susceptible to corrosion. This work aims to perform the analysis of the carbonation depth in different concrete traces and environments, to forecast the service life of structures with the same characteristics. To this end, the probe material with two different traces was made and distributed in places with different levels of environmental aggressiveness, and through tests conducted in three different periods, the carbonation depths were obtained. Only one structure was identified with the minimum acceptable service life as established by the performance standard, which had a lower water-cement ratio as a characteristic.

Keywords: Carbonation. Service life. Pathological manifestations.

¹ Graduando em Engenharia Civil no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: danielgalhardi@hotmail.com

² Graduando em Engenharia Civil no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: jean_aparecido123@hotmail.com

³ Professor Mestre no Centro Universitário UNIFAFIBE de Bebedouro, SP. E-mail: gustavovital@hotmail.com.br

⁴ Doutorando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de São Carlos, SP. E-mail: luiz.sarti.junior@gmail.com

1 INTRODUÇÃO

As estruturas de concreto armado são comuns em todos os países do mundo, sendo, no Brasil, o método construtivo mais utilizado, e que possui grande aceitação no mercado devido a sua capacidade de vencer grandes vãos e alturas, além de se moldar facilmente à diferentes tipos de peças e ser de fácil execução.

A durabilidade e vida útil das estruturas de concreto armado, com o passar dos anos, tornou-se um assunto de grande importância no meio acadêmico e científico. Para Mehta e Monteiro (1994) a durabilidade pode ser definida como a capacidade de uma estrutura em manter um desempenho mínimo em determinado período, sob a influência de agentes agressivos.

As ações das manifestações patológicas nas estruturas são responsáveis por afetar a sua durabilidade, diminuindo, assim, sua vida útil. As causas das manifestações patológicas, segundo Helene (1992), podem ser várias, tais como cargas excessivas, variação de umidade, variações térmicas, agentes biológicos, incompatibilidade de materiais, agentes atmosféricos, e outros.

Dentre as manifestações patológicas, o fenômeno da carbonatação é um dos mais comuns em estruturas de concreto. Essa patologia ocorre quando o dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera entra pelos poros do concreto e reage com o hidróxido de cálcio, formando, assim, o carbonato de cálcio e, com isso, a redução do pH do concreto para valores inferiores a 9 (SOUZA; RIPPER, 1998). Ainda segundo os autores, a carbonatação pode ser considerada benéfica para o concreto se não atingir a região da armadura, pois aumentaria sua dureza superficial. O problema é que a redução do pH causada por ela afetará a camada passivadora da armadura e, com isso, o aço ficará suscetível à corrosão.

O objetivo deste trabalho é avaliar as profundidades de carbonatação natural em concretos com dois traços que foram expostos em ambientes com diferentes níveis de agressividade e, a partir dos resultados obtidos, realizar, por meio de um modelo matemático, a previsão da vida útil de estruturas nos mesmos ambientes e com as mesmas características.

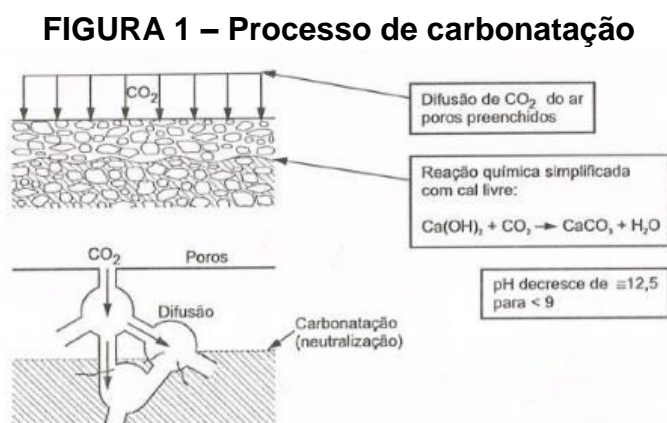
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Carbonatação do concreto

O processo recebe o nome de carbonatação graças à reação de neutralização do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) pelo CO_2 , resultando em carbonato de cálcio (CaCO_3), ou seja, trata-se da transformação de um hidróxido alcalino em um sal de baixa solubilidade (CADORE, 2008). A reação descrita acima é representada pela Equação 1.



Segundo Helene (1993), a penetração do gás carbônico no concreto acontece por meio de um processo chamado difusão. A difusão de gases no ar é mais rápida do que a difusão onde há presença de água. O autor diz ainda que, em poros saturados, a difusão pode ser desprezada, porém, com umidade relativa menor que 50% nos poros, as reações não ocorrerão por falta de eletrólito (KULAKOWSKI, 2002). Na Figura 1, apresenta-se um exemplo do processo de carbonatação.

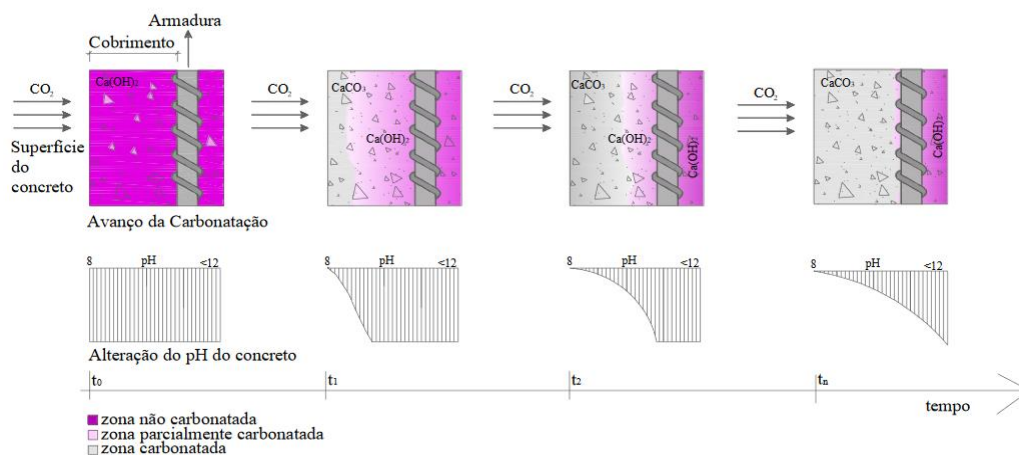


Fonte: Bazzan (2014, p. 29)

Neville (2016) afirma que a carbonatação não danifica o concreto em si, mas tem grave influência na diminuição da durabilidade, pois a carbonatação gera uma redução no pH do concreto que passa de 12,6 e 13,5 para um valor inferior a 9. Este fato é importante porque a alta alcalinidade do concreto faz com que a camada passivadora do aço se mantenha íntegra. Tal camada, segundo Carmona (2005), é a zona onde o metal se recobre com óxidos e hidróxidos que atuam como uma barreira de proteção contra a corrosão. Neville (2016) afirma que só é possível manter essa barreira quando o pH da água presente nos poros em contato com a camada de passivação, seja elevado e, como a carbonatação diminui o pH do concreto, o aço irá

perder sua camada de proteção ficando vulnerável. Esse fenômeno recebe o nome de despassivação. A Figura 2 ilustra o avanço da carbonatação.

FIGURA 2 - Carbonatação e alteração do pH do concreto



Fonte: Possan (2010, p. 66)

As medidas preventivas para evitar a carbonatação, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6118 (ABNT, 2014), consistem em dificultar a entrada de agentes agressivos no interior do concreto. Uma forma para minimizar este efeito é adotar um cobrimento para a armadura determinado com base nas classes de agressividade ambiental, as quais classificam o risco de deterioração devido à intensidade das ações físicas e químicas a que uma estrutura está sujeita.

2.2.1 Fatores que influenciam na profundidade da carbonatação

O avanço da carbonatação nos poros do concreto é definido por fatores que estão diretamente ligados à exposição da estrutura e também das propriedades do concreto (KULAKOWSKI, 2002). No Quadro 1, mostra-se alguns desses fatores.

QUADRO 1 – Fatores influentes na carbonatação

Condição	Fator
Características do concreto	Relação água/cimento
	Tipo de cimento
	Adições minerais
	Execução do concreto
Exposição	Teor de CO ₂
	Umidade Relativa
	Temperatura

Fonte: Adaptado de Cascudo e Carasek (2011, p. 15)

2.2.1.1 Teor de CO₂

Em ambientes onde há um alto teor de CO₂, a velocidade de carbonatação aumenta, assim como a profundidade. Segundo Oliveira (2017), isso se dá pelo fato de que a agressividade será maior em ambientes com alta concentração de CO₂.

De acordo com Helene (1993), em ambientes rurais, a concentração de CO₂ pode variar de 0,03 a 0,05%, e de 0,1 a 1,2% em locais de tráfego pesado. “Destaca-se também que, em grandes cidades, o teor pode chegar até 0,3%, sendo que em alguns casos excepcionais, pode-se atingir 1%” (TASCA, 2012, p. 44). Oliveira (2017) salienta que, em locais confinados, como túneis e garagens, o CO₂ se acumula devido a falta de ventilação, tornando esses ambientes mais agressivos quando comparados a ambientes abertos.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 6118 (ABNT, 2014) classifica a agressividade ambiental de acordo com o tipo de ambiente em que será realizado o projeto, como é ilustrado no Quadro 2.

QUADRO 2 – Classes de agressividade ambiental

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

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6118:2014, item 6.4.2

2.2.1.2 Umidade Relativa

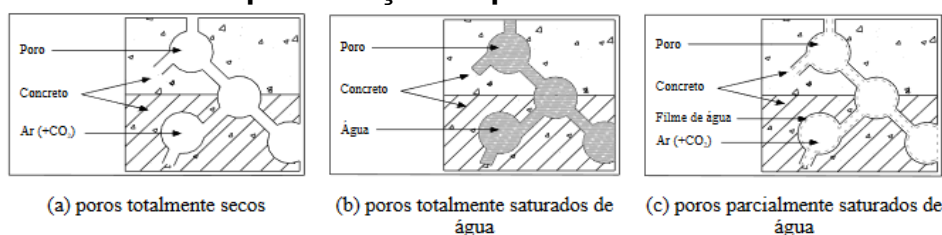
O acúmulo de água nos poros do concreto tem como uma das causas a umidade do local, condicionando a difusão do CO₂ mais acelerada por meio dos poros do concreto (CADORE, 2008).

Kulakowski (2002) observou que, se os poros estiverem saturados, o processo de difusão do CO₂ será dificultado pela água. Nesse caso, o processo de difusão pode ser desprezado e, caso os poros não possuam umidade maior que 50%, não haverá

reação por falta de eletrólito. O cenário ideal seria aquele em que os poros encontram-se parcialmente saturados.

Helene (1993) afirma que o teor ideal de umidade relativa está entre 65% e 85%. Para Venuat e Alexandre apud Figueiredo e Meira (2013), a faixa entre 50% e 80% de umidade relativa é a faixa na qual as condições para a carbonatação são mais favoráveis. A Figura 3 demonstra a difusão do CO₂ em poros secos, saturados e parcialmente saturados.

FIGURA 3 – Representação esquemática da difusão do CO₂



Fonte: Possan (2010, p. 78)

Possan (2010) apresenta um estudo sobre a umidade relativa ideal para a reação da carbonatação, reunindo teores de umidades encontrados em pesquisas datadas entre os anos de 1987 e 2001, como mostra a Tabela 1.

TABELA 1 – Umidade relativa ideal para a reação da carbonatação

Pesquisador	Umidade
Parrot (1987)	60%
Helene (1986)	Entre 65% e 85%
Ying-Yu e Qui-Dong (1987)	Entre 50% e 75%
Papadakis, Vayenas e Fardis (1989)	Entre 50% e 65%
Wolf e Dal Molin (1989)	70%
Ceukelaire e Nieuwenburg (1993)	50%
Saetta, Schrefler e Vitaliani (1995)	Entre 40% e 80%
Neville (1997)	Entre 50% e 70%
ACI 222 (1991)	50%
Andrade (1992)	Entre 50% e 80%
Isaia (1999)	Entre 50% e 80%
Russell <i>et al.</i> (2001)	Entre 55% e 75%

Fonte: Possan (2010, p. 80)

2.2.1.3 Temperatura

Tasca (2012) afirma que a temperatura é um fator que influencia indiretamente a carbonatação, visto que o aumento da temperatura faz com que as reações sejam

aceleradas. De acordo com Helene (1993), em países de clima equatorial e tropical, as estruturas sofrem mais com a deterioração por causa da temperatura. De acordo com Neville (2016), pequenas variações de temperatura não têm influência no processo de carbonatação, porém altas temperaturas aumentam a velocidade de carbonatação, a menos que a secagem sobressaia em relação ao efeito da temperatura.

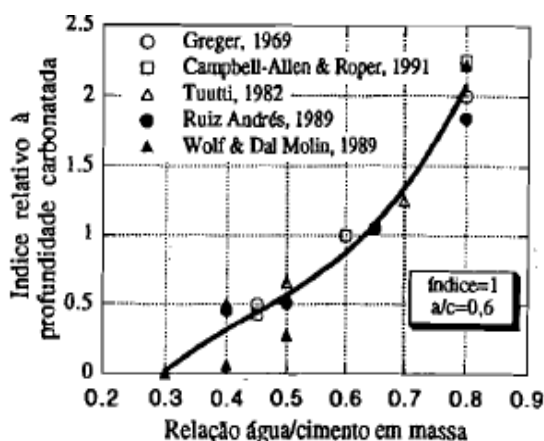
Roy *et al.* (1999) realizaram um estudo no qual comparou a profundidade de carbonatação das estruturas da cidade de Cingapura com estruturas de cidades que possuíam clima temperado e, como resultado, a carbonatação em Cingapura foi maior. Acredita-se que a temperatura contribuiu significativamente para esse resultado, já que é mais elevada em Cingapura, em comparação às outras cidades do estudo.

2.2.1.4 Relação água/cimento

A relação água/cimento está diretamente ligada à porosidade do concreto e, por isso, possui influência na profundidade de carbonatação, visto que concretos mais porosos apresentam maiores profundidades (TASCA, 2012).

Bazzan (2014) comenta que, quanto maior for a relação a/c, maior será a quantidade de poros e mais permeável o concreto será e, com isso, a velocidade de carbonatação será maior. Helene (1993) apresenta um estudo realizado por vários pesquisadores que buscam compreender qual a influência da relação a/c no fenômeno da carbonatação, cujos resultados são mostrados na figura 4.

FIGURA 4 – Espessura de concreto carbonatado obtida por diversos pesquisadores



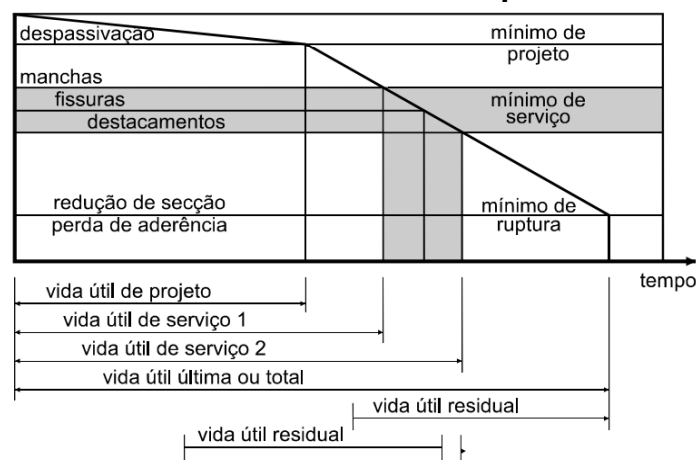
Fonte: Helene (1993, p. 109)

2.2 Vida útil de estruturas de concreto

A vida útil é o período de tempo em que os materiais que constituem a estrutura devem atender os valores mínimos aceitáveis quando uma rotina é mantida (COUTO, 2017). Para Santos (2010), a vida útil das estruturas tem ligação direta com as manifestações patológicas que nelas surgem, principalmente pelas falhas que ocorrem durante as fases de uma construção: concepção, projeto, execução e utilização.

Helene (2004), em seu trabalho, apresenta uma conceituação (Figura 5) sobre a vida útil de estruturas sob efeito da corrosão das armaduras, na qual o processo se inicia com a despassivação da armadura e vai até a ruptura. Segundo Helene (2004), o período de tempo que vai até a despassivação recebe o nome de “vida útil de projeto” e, normalmente, corresponde ao período de tempo necessário para que a frente de carbonatação ou a frente de cloretos atinja a armadura.

FIGURA 5 – Vida útil de estrutura que sofre de corrosão



Fonte: Helene (2004, p. 10)

2.3 Modelo de previsão de vida útil de TUUTTI (1982)

O modelo de previsão de carbonatação proposto por TUUTTI (Equação 2) foi apresentado em seu trabalho publicado no ano de 1982 pela *Swedish Cement and Concrete Research*, onde expôs conceitos de vida útil de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão e propôs, também, modelos de penetração de cloretos e do período de propagação da corrosão (CARMONA, 2005).

$$e = k_{CO_2} * \sqrt{t} \quad (2)$$

Onde:

- e é espessura da profundidade carbonatada;
- k_{CO_2} é o coeficiente de carbonatação (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$);
- t é a idade em anos.

O coeficiente de carbonatação k_{CO_2} , segundo Possan (2010), na maioria das vezes é obtido através de uma análise de estruturas em um dado tempo t , pois, para estruturas novas, existe uma grande dificuldade em ser determinado. Ainda segundo a autora, esse coeficiente é assumido como constante ao longo do tempo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho se trata de uma pesquisa explicativa que irá analisar, comparar e explicar a profundidade da carbonatação natural por meio de amostras produzidas em laboratório e expostas em ambientes urbanos com diferentes níveis de agressividade situados na cidade de Bebedouro, SP.

A abordagem será quantitativa-qualitativa, pois, com os resultados obtidos, serão geradas tabelas e gráficos para comparar a diferença de profundidade entre as amostras nos diferentes locais aos quais foram expostas, e pelo período em que foram expostas, justificando os resultados alcançados e explicitando a diferença entre eles. Além disso, será realizada uma previsão de vida útil através de um modelo matemático de uma estrutura, caso ela fosse construída com as mesmas características das amostras confeccionadas.

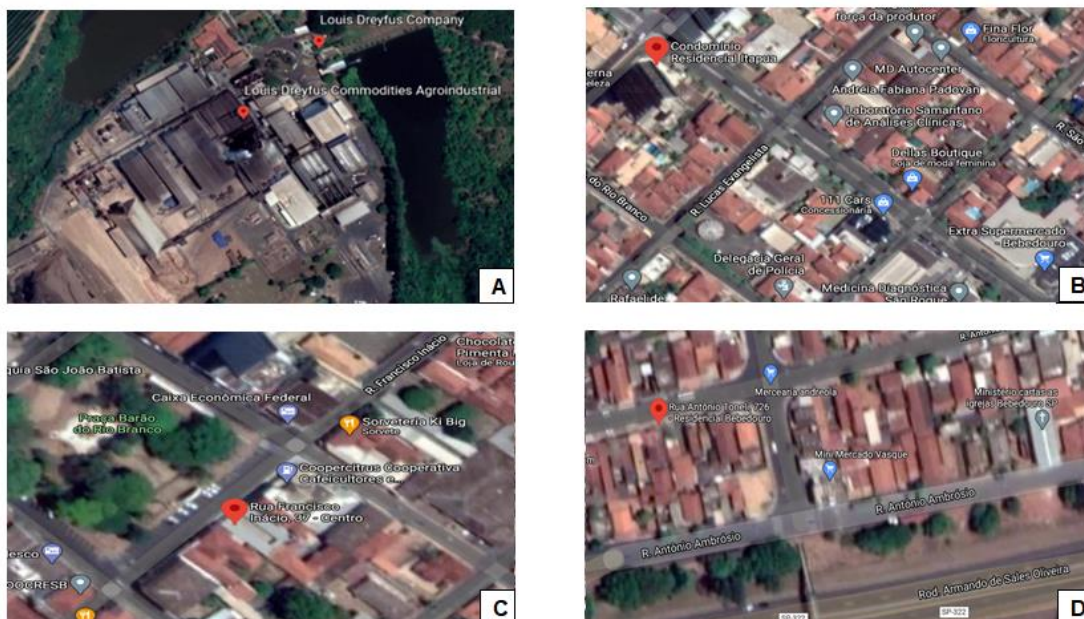
3.1 Ambientes de exposição

A exposição dos corpos de prova foi feita na cidade de Bebedouro, de temperatura média de 22,05°C, umidade média de 75,18% e precipitação média no período de exposição de 7 mm por dia (INMET, 2020).

Os locais para exposição dos corpos de provas foram definidos com base em seus níveis de agressividade ambiental. Para tal, foram escolhidos quatro locais

(Figura 6) com diferentes níveis de agressividade, sendo o primeiro um ambiente industrial (6A), o segundo, uma garagem de um edifício residencial (6B), o terceiro, uma residência no centro da cidade (6C), e o último, outra residência, porém mais afastada do centro (periferia) (6D). Dessa maneira, foi possível apresentar a diferença de profundidade entre cada ambiente.

FIGURA 6 – Ambientes de exposição



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2 Escolhas dos traços

A escolha dos traços foi pautada com base em pesquisas realizadas com o intuito de encontrar os mais usuais nas construções e, após a conclusão da pesquisa, foram selecionados dois traços para moldar os corpos de prova, sendo o primeiro deles 1 : 2 : 3 : 0,60 e o segundo 1 : 1 : 2 : 0,45 ambos descritos em volume. Para uma melhor interpretação, A e B foram arbitrados para os traços 1 : 2 : 3 e 1 : 1 : 2 respectivamente. A escolha dos traços foi feita com base no estudo realizado por Torres (2015).

Foram produzidos seis corpos de provas (CP) para cada ambiente citado anteriormente, identificados como CPAA e CPBA, sendo a penúltima letra indicadora do traço utilizado e a última correspondente ao local em que os corpos de provas foram deixados.

3.3 Confeção e moldagem dos corpos de prova

Após os traços serem definidos, foi iniciada a etapa de confecção dos corpos de provas. Os materiais utilizados para ambos os traços foram os mesmos, sendo eles: Cimento CP II-F 32, areia natural, brita 1 e água. Os procedimentos descritos abaixo foram utilizados para a confecção dos corpos de provas de ambos os traços, A e B.

Os processos para produção dos corpos de provas foram realizados no laboratório de construção civil do centro Universitário Unifafibe em Bebedouro, SP, no dia 30 de janeiro de 2020. Foram necessárias as realizações dos seguintes procedimentos, com base na NBR 5738 (ABNT, 2015), para a obtenção das amostras:

- a) O primeiro passo foi realizar a imprimação da betoneira utilizando o traço 1 : 2 : 3: 0,65, necessário para que se evite a perda de argamassa nas paredes da betoneira, evitando, assim, alterações nos traços;
- b) Após a imprimação, os materiais necessários para a fabricação dos corpos de provas foram separados nas quantidades exatas para cada traço;
- c) Após a separação, os materiais foram adicionados na betoneira seguindo a ordem: água (80%), brita (100%), areia (100%), cimento (100%) e, em seguida, o restante da água. Os materiais foram misturados por cinco minutos e, logo após, o concreto foi despejado em um carrinho de mão para facilitar a moldagem dos corpos de prova;
- d) Antes da moldagem dos corpos de prova, foi necessário realizar a lubrificação dos moldes cilíndricos com o uso de óleo vegetal, seguindo o item 7.2.1 da NBR 5738 (ABNT, 2015). Os moldes cilíndricos possuíam dimensões de 10 x 20 cm;
- e) O concreto foi inserido nos moldes com o auxílio de uma concha de seção U. Seguindo a orientação da norma NBR 5738 (ABNT, 2015), o concreto foi introduzido no molde em duas camadas de volume similar. Para cada camada, foi realizado o adensamento manual através de 12 golpes com o auxílio de uma haste metálica.
- f) Após a moldagem e o adensamento, todos os corpos de provas foram identificados e colocados em local protegido até o momento de sua desmoldagem, aproximadamente 30 horas após a confecção.

3.4 Ensaios para determinação da profundidade de carbonatação

3.4.1 Solução de fenolftaleína

A fenolftaleína é uma substância indicadora de pH que, ao ser aplicada a um local com o pH superior a 8,2, muda para a cor rosa e, caso aplicada em locais com o pH inferior a esse valor, sua coloração não se altera. Foi necessário preparar a solução para posteriormente usá-la no ensaio de determinação da profundidade de carbonatação. O processo para preparo da solução será descrito abaixo:

- a) Pesou-se 1g de fenolftaleína em pó que foi posteriormente transferido para o balão volumétrico de 100mL juntamente com 60 mL de álcool etílico;
- b) A fenolftaleína foi solubilizada e, em seguida, completou-se o volume com água destilada.

3.4.2 Determinação da profundidade de carbonatação

A seguir, apresenta-se a metodologia utilizada para a preparação dos corpos de prova e a execução do ensaio de frente de carbonatação.

- a) Inicialmente, com o uso da serra, os corpos de provas foram cortados formando três amostras (discos) iguais, como mostra a Figura 7;

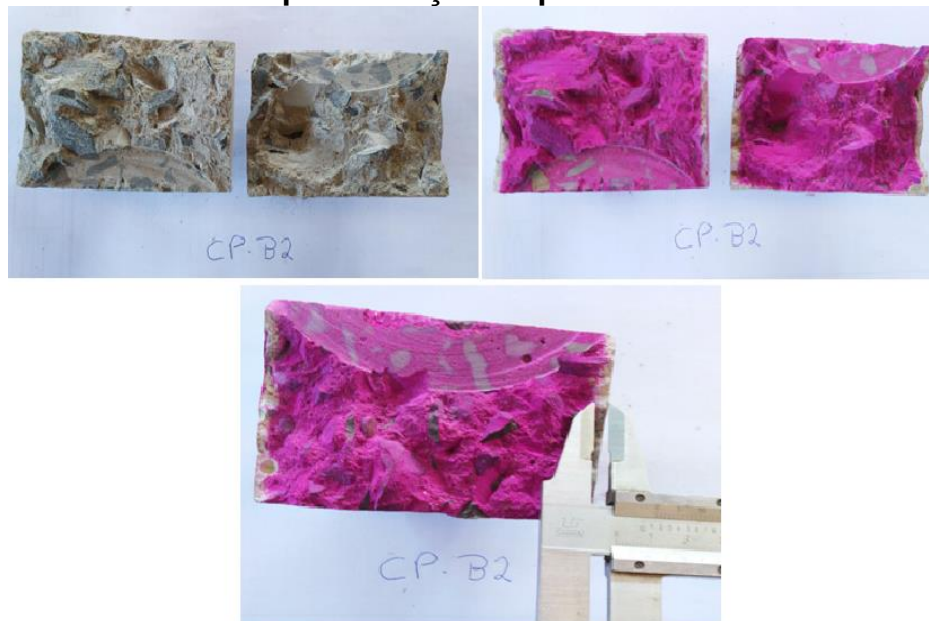
FIGURA 7 – Corpos de provas cortados



Fonte: Elaborado pelo autor

- b) Com o auxílio de uma serra circular, fez-se um risco no centro dos discos e, depois, com uma talhadeira e uma marreta, as amostras foram fraturadas ao meio;
- c) Com os corpos de prova previamente cortados, a superfície de concreto da amostra fraturada foi saturada com a solução de fenolftaleína e, com o auxílio de um paquímetro, a profundidade de carbonatação foi medida (Figura 8).

FIGURA 8 – Processo para aferição da profundidade de carbonatação



Fonte: Elaborado pelo autor

3.5 Previsão de vida útil de estruturas

O cálculo da previsão de vida útil para o concreto do presente estudo foi realizado com base no modelo matemático proposto por TUUTTI (1982), o qual utiliza a Equação 3 para determinar a espessura da profundidade carbonatada ao longo de um determinado período de tempo.

$$e = k_{CO_2} * \sqrt{t} \quad (3)$$

De forma que:

- e é espessura da profundidade carbonatada;
- k_{CO_2} é o coeficiente de carbonatação (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$);
- t é a idade em anos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, serão apresentadas as análises dos resultados obtidos dos ensaios de profundidade de carbonatação e da previsão de vida útil.

4.1 Ensaio de carbonatação

Os ensaios para a determinação da profundidade de carbonatação foram realizados nos dias 09 de maio, 19 de setembro e 17 de outubro e, após o término, obteve-se os valores médios das profundidades, conforme demonstram as Tabelas 2 e 3.

TABELA 2 – Profundidade de carbonatação média (mm) dos traços A e B

Profundidade média de carbonatação (mm)					
	Data / Locais	Indústria	Garagem	Residência 1	Residência 2
Traço A	09/mai	5,45	3,84	4,68	3,72
	19/set	6,88	6,37	5,16	4,39
	17/out	7,19	6,91	5,76	5,05
Traço B	09/mai	4,46	3,26	3,04	2,2
	19/set	4,68	4,63	4,12	2,52
	17/out	5,28	5,17	4,26	3,37

Fonte: Elaborado pelo autor

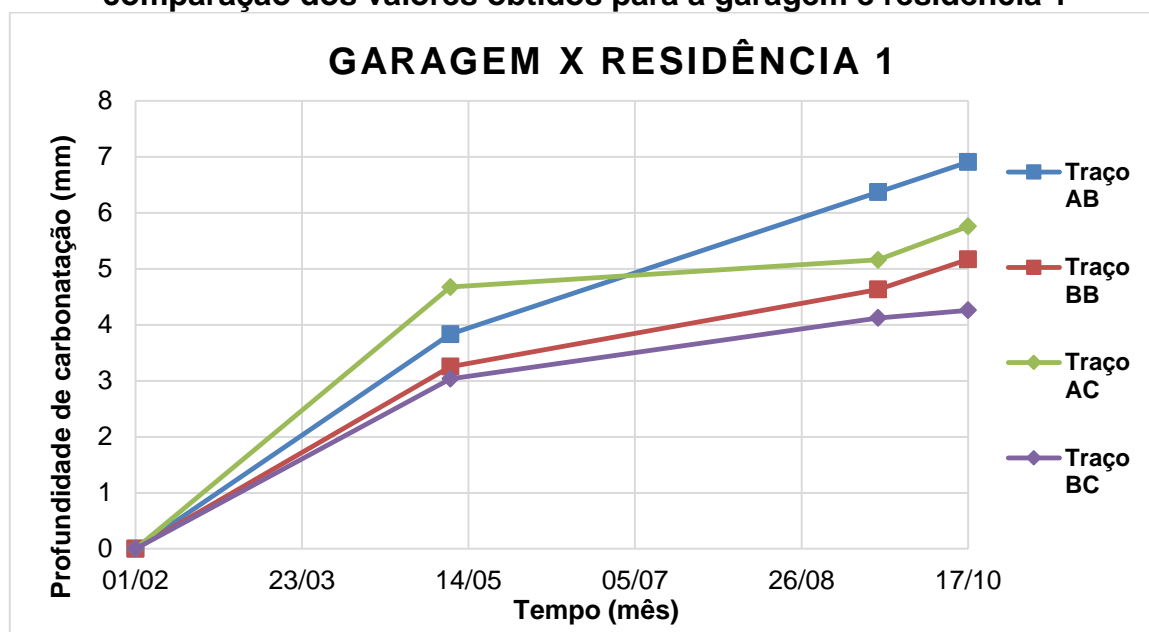
É possível observar que em todos os locais e períodos as profundidades de carbonatação dos corpos de prova confeccionados com o traço A foram superiores aos do traço B. Este fato ocorreu devido ao traço A possuir uma maior relação a/c e um maior consumo de agregado graúdo em relação ao traço B, desse modo, acredita-se que tenha sido gerado um concreto com menor resistência e maior porosidade, facilitando a entrada do CO₂ em seu interior.

Em relação aos ambientes de exposição, os corpos de prova que apresentaram as maiores profundidades de carbonatação, em todos os períodos, foram os que ficaram expostos no ambiente industrial; e os que apresentaram a menor profundidade foram os que permaneceram na residência 2. Este resultado está de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), que classifica como forte a agressividade em ambientes industriais e como moderada em ambientes urbanos.

Analisando o diagrama 1, é possível observar que, apesar da garagem possuir uma concentração de CO₂ maior que na residência 1 localizada no centro da cidade, o corpo de prova com o traço A apresentou, na residência 1, um valor superior ao que ficou na garagem, durante os três primeiros meses. Uma explicação para este

acontecimento seria a de que a concentração de CO₂ na garagem é dependente, principalmente, da combustão dos veículos e, neste período, por conta do isolamento social enfrentado durante pandemia da Covid 19, estima-se que a utilização dos veículos tenha diminuído.

FIGURA 9 – Diagrama com a profundidade de carbonatação versus tempo para comparação dos valores obtidos para a garagem e residência 1

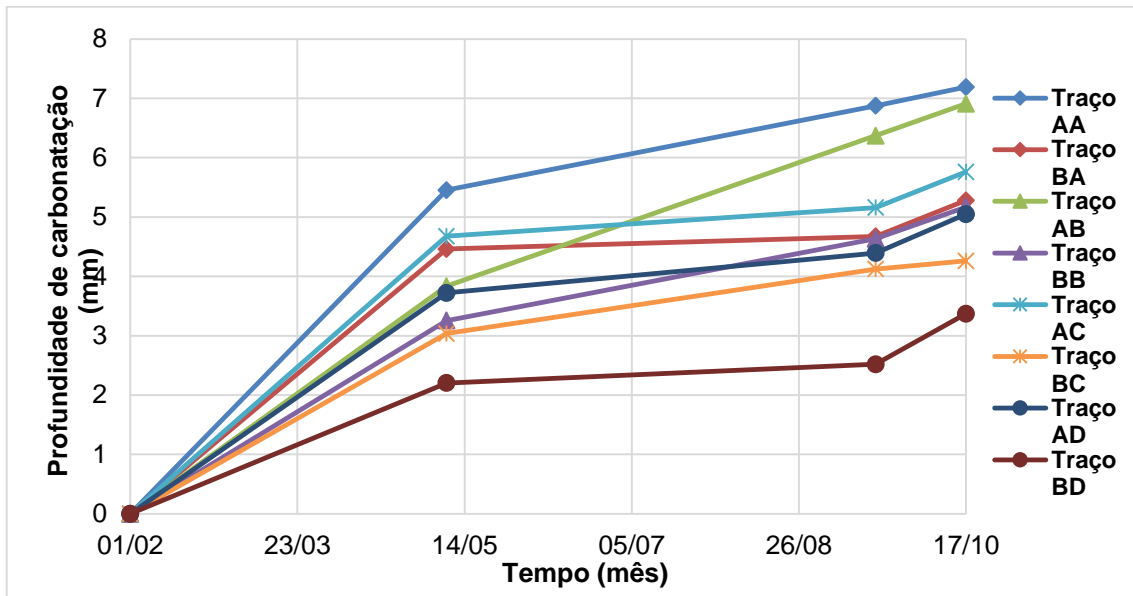


Fonte: Elaborado pelo autor

No período de 09/05 a 19/09 podemos observar que os valores de carbonatação dos corpos de provas na garagem foram superiores aos da residência 1. Durante o período analisado, houve uma flexibilização do isolamento social, com isso, estima-se que tenha ocorrido um aumento na utilização dos veículos, gerando um aumento na concentração de CO₂ presente na garagem, o que explicaria os valores obtidos.

Levando-se em consideração o tempo, o diagrama 2 demonstra que o maior avanço ocorreu nos primeiros meses, isso porque, segundo Helene (1986), a carbonatação se inicia com grande rapidez e sua velocidade decai ao longo do tempo até atingir uma profundidade máxima. Esta tendência, segundo o autor, ocorre por conta da crescente hidratação do cimento, que aumenta gradativamente, proporcionando um concreto com menor porosidade ao longo do tempo. O mesmo aconteceu no estudo realizado por Lacerda (2017), no qual realizou-se um ensaio acelerado e verificou-se que a frente de carbonatação nos primeiros cinco dias teve um avanço de 2,2mm e nos cinco dias finais obteve um avanço de 0,7mm.

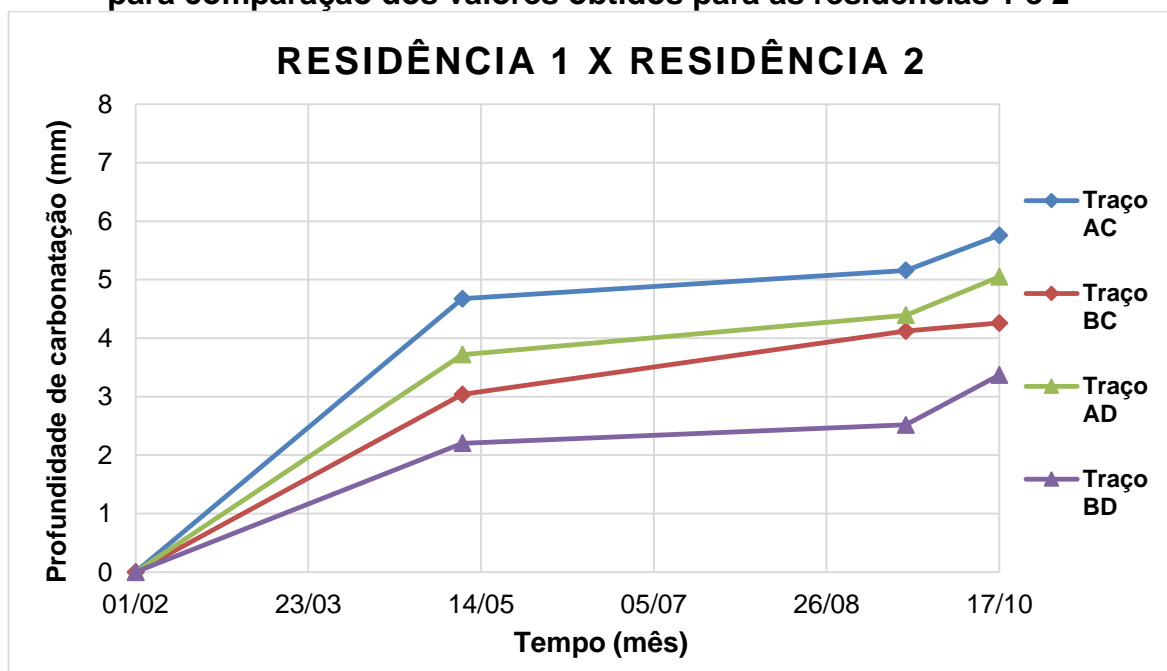
FIGURA 10 – Diagrama com a profundidade de carbonatação versus tempo



Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores de carbonatação obtidos na residência 1 foram superiores ao da residência 2 para ambos os traços (diagrama 3). O traço A obteve uma superioridade de 17,5% e o traço B de aproximadamente 63,5%. A diferença nos valores se dá em virtude das localizações, a residência no centro tende a sofrer mais com a carbonatação, pois a concentração de CO₂ é maior em comparação a residência 2, que está afastada do centro.

FIGURA 11 – Diagrama com a profundidade de carbonatação versus tempo para comparação dos valores obtidos para as residências 1 e 2



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Modelo matemático

Primeiramente, a partir os resultados da profundidade de carbonatação e o tempo total de exposição dos corpos de prova (8 meses), foram encontrados os coeficientes de carbonatação k_{co2} para ambos os traços e em todos os locais do estudo (Tabela 4). Desta maneira, tornou-se possível determinar o valor da vida útil das estruturas, fazendo o uso da mesma equação, isolando o tempo (t) e usando como valor da profundidade carbonatada (e) os respectivos valores de cobrimento de cada ambiente seguindo a NBR 6118 (ABNT, 2014).

TABELA 4 – Coeficientes de carbonatação e valores de vida útil

CP	Local	Tempo (ano)	E ensaio (mm)	Coefficiente k_{co2}	Cobrimento (mm)	Vida útil (anos)
CP-AA	LDC	0,67	7,19	8,81	40,0	20,6
CP-AB	Garagem	0,67	6,91	8,46	30,0	12,6
CP-AC	Residência 1	0,67	5,76	7,05	30,0	18,1
CP-AD	Residência 2	0,67	5,05	6,18	30,0	23,5
CP-BA	LDC	0,67	5,28	6,47	40,0	38,3
CP-BB	Garagem	0,67	5,17	6,33	30,0	22,4
CP-BC	Residência 1	0,67	4,26	5,22	30,0	33,1
CP-BD	Residência 2	0,67	3,37	4,13	30,0	52,8

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores de vida útil obtidos mostram que estruturas que forem construídas com o traço A irão possuir uma vida útil de projeto inferior aos das estruturas com o traço B, pois os coeficientes de carbonatação (k_{co2}) do traço A foram superiores, indicando uma maior facilidade do CO₂ em adentrar o concreto ao longo do tempo.

Apesar dos coeficientes de carbonatação do ambiente industrial serem superiores aos dos outros locais, para ambos os traços, a vida útil de projeto de estruturas construídas neste local será maior do que a dos outros, exceto pela residência 2. O motivo se dá pelo fato de que sua classe de agressividade ambiental é três (forte), com isso, seu cobrimento nominal é de 40mm, diferente dos outros locais que têm 30mm, e isso compensou o alto valor do coeficiente de carbonatação.

O sistema estrutural, segundo a norma de desempenho NBR 15575-1 (ABNT, 2013), deve apresentar uma vida útil de projeto de no mínimo 50 anos, conforme apresentado na Tabela 6. A única estrutura que, segundo o modelo de Tuutti, atenderia esse requisito da norma, seria a estrutura executada no mesmo ambiente da residência 2, utilizando o traço B, cuja vida útil de projeto é de aproximadamente 52 anos e 10 meses. Por outro lado, Possan (2010) ressalta que, pelo fato do modelo de Tuutti não considerar vários fatores que envolvem o processo de carbonatação, os resultados de vida útil apresentam valores inferiores aos reais.

TABELA 6 – Vida útil de projeto (VUP)

Sistema	VUP mínima (anos)
Estrutura	≥ 50 Conforme ABNT NBR 8681
Pisos internos	≥ 13
Vedação vertical externa	≥ 40
Vedação vertical interna	≥ 20
Cobertura	≥ 20
Hidrossanitário	≥ 20

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 15575, item 14.2.1

5 CONCLUSÃO

No ensaio de profundidade de carbonatação, foi constatado que o aumento da relação a/c teve grande influência na profundidade de carbonatação. Este fato demonstra a grande importância da utilização de traços com relações baixa para que se tenha uma durabilidade maior. Foi verificada, também, a queda da porosidade do concreto com o passar do tempo, onde a carbonatação sofreu uma queda após o alto avanço nos primeiros meses.

Os valores de profundidade de carbonatação obtidos nos diferentes ambientes aos quais os corpos de prova foram expostos se deram como descrito na literatura, uma vez que foi constatado que o ambiente industrial, por possuir a maior concentração de CO₂, obteria os maiores valores de carbonatação em todo o período para ambos os traços.

Ressalta-se que três dos quatro ambientes analisados possuíam a mesma classe de agressividade, porém, os valores de carbonatação obtidos foram diferentes, demonstrando que, ao se projetar uma estrutura em um determinado ambiente, deve-se levar em consideração fatores que tenham influência nos locais. Um exemplo é a garagem, já que, apesar de estar na mesma classe de agressividade das residências, possui uma maior concentração de poluentes devido ao ambiente ser, geralmente, fechado e possuir movimentação de veículos.

No que diz respeito aos resultados de vida útil, utilizando o modelo proposto por Tuutti (1982), apenas uma das dez estruturas apresentou resultado satisfatório. Estes resultados deixam claro que estruturas com uma elevada vida útil devem ser projetadas e executadas fazendo o uso de concretos que tenham em seu traço uma baixa relação a/c .

O modelo, apesar de ser de fácil utilização para estruturas já construídas, apresenta grande dificuldade em sua utilização para novas construções. O fato de assumir o coeficiente k_{CO_2} como constante e não contemplar em sua formulação fatores que têm influência direta na carbonatação, isso contribui para o distanciamento entre os valores encontrados dos valores reais. Outra limitação do modelo é o fato de não abordar a influência que revestimentos e pinturas aplicados sobre o concreto têm na profundidade de carbonatação.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. 2. ed. Rio de Janeiro, 2015. 9 p.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto — Procedimento. 3. ed. Rio de Janeiro, 2014. 238 p.

_____. **NBR 15575-1**: Edificações habitacionais — Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. ed. Rio de Janeiro, 2013. 71 p.

BAZZAN, G. C. G. **Análise do cobrimento e carbonatação em obras de arte especiais no estado de São Paulo**. 2014. 151 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Disponível em: <https://cutt.ly/igYaXPG>. Acesso em: 21 abr. 2020.

CADORE, W. W. **Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada**.

2008. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7698>. Acesso em: 21 abr. 2020.

CARMONA, T. G. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005. doi:10.11606/D.3.2005.tde-27072005-163131. Acesso em: 21 abr. 2020.

CASCUDO, O; CASAREK, H. Ações da Carbonatação no Concreto. In: ISAIA, G. C. **CONCRETO: CIÊNCIA E TECNOLOGIA**. São Paulo: Ibracon, 2011.

COUTO, R. A. **Avaliação Probabilística da Vida Útil de Estruturas de Concreto Armado Sujeitas à Carbonatação**. 2017. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <http://www.pos.dees.ufmg.br/defesas/1187M.PDF>. Acesso em: 29 jul. 2020.

FIGUEIREDO, E. J. P; MEIRA, G. R. **Corrosão das armaduras das estruturas de concreto**. 6. ed.: Alconpat Internacional, 2013. 28 p. Disponível em: <http://alconpat.org.br/wp-content/uploads/2012/09/BT-06-Corros%C3%A3o-de-Armaduras-nas-Estruturas-de-Concreto.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2020.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em Armaduras para Concreto Armado**. 1. ed. São Paulo:Pini, 1986, 46p.

_____. **MANUAL PARA REPARO, REFORÇO E PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1992. 213 p.

_____. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 248 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.

_____. **Nova ABNT NBR 6118 e a Vida Útil das Estruturas de Concreto**. In: Seminário de Patologia das Construções, 2, 2004, Porto Alegre. Porto Alegre: Novos Materiais e Tecnologias Emergentes, LEME, UFRGS. v. 1. p. 1-3. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/06/185.pdf>. Acesso em: 30 Jul. 2020.

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa**. 2002. 199 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/3594>. Acesso em: 21 abr. 2020.

LACERDA, E. et al. Acompanhamento do avanço da frente de carbonatação em compósito cimentício com sua estrutura de poros analisada por microtomografia computadorizada de raios X (μ -CT). **Rev. IBRACON Estrut. Mater.**, São Paulo, v.

10, n. 3, p. 653-668, June 2017. Disponível em: <https://cutt.ly/SgSoSYj>. Acesso em: 03 Nov. 2020.

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: estrutura, propriedades e materiais. Tradução de Paulo Helene. São Paulo:PINI, 1994. 580p

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. CREMONINI, R. A. (Trad.). 5. ed., Porto Alegre: Bookman, 2016. 888 p.

OLIVEIRA, T. R. **ANÁLISE DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO EM CONCRETO CONVENCIONAL**: estudo de caso em edificações com idade diferenciada na cidade de Juazeiro do Norte - Ce. 2017. 53 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Departamento da Construção Civil, Universidade Regional do Cariri, Juazeiro do Norte, 2017. Disponível em: <https://cutt.ly/MgYaSBN>. Acesso em: 21 abr. 2020.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 264 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/28923>. Acesso em: 21 abr. 2020.

ROY, S. K.; Poh Kong Beng; NORTHWOOD. D. O. The carbonation of concrete structures in the tropical environment of Singapore and a comparison with published data for temperate climates. **Magazine of Concrete Research**, v. 48, n. 177, p. 293-300, 1 dez. 1996. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1680/mac.1996.48.177.293>. Acesso em: 21 abr. 2020.

SANTOS, C. F. **PATOLOGIA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**. 2014. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014. Disponível em: <https://cutt.ly/jgYaNcp>. Acesso em: 01 abr. 2020

SANTOS, S. **Vida útil das estruturas de concreto**. 2010. Disponível em: <http://faq.altoqi.com.br/content/277/680/pt-br/vida-%C3%BAtil-das-estruturas-de-concreto.html?highlight=vida%20%C3%BAtil%20das%20estruturas>. Acesso em: 29 jul. 2020.

SOUZA, V. C. RIPPER, T. **PATOLOGIA, RECUPERAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO**. 1: Pini, 1998. 257 p. Disponível em: <https://lucasmonteiro.site.files.wordpress.com/2017/08/vicente-custc3b3dio-e-thomaz-ripper-patologia-recuperacao-e-reforco-de-estruturas-de-concreto.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2020.

TASCA, M. **Estudo da carbonatação natural de concretos com pozolanas: monitoramento em longo prazo e análise da microestrutura**. 2012. 179 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7810>. Acesso em: 21 abr. 2020.

TORRES, J. M. **Dosagem de traços de concreto para obras de pequeno porte, pelo método ACI/ABCP e modelo proposto por CAMPITELI.** 2015. 15 f.
Disponível em: <https://cutt.ly/KgA7hU1>. Acesso em: 21 nov. 2020.

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