

## Estudo da previsão da vida útil de uma estrutura em concreto armado: iniciação da corrosão por carbonatação

### Study of the useful life of a structure in reinforced concrete: corrosion initiation by carbonation

*Ana Paula Brandão Capraro(1); Poline Ariana Alves de Paula(2); Rafael Fernandes da Silva(3); Giovana Costa Réus(4); Marcelo Henrique Farias de Medeiros(5)*

1 Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, PR, Brasil.

E-mail: anapcapraro@gmail.com | ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6270-6568>

2 Centro Universitário Educacional Araucária (UNIFACEAR), Araucária, PR, Brasil.

E-mail: polinedepaula@gmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0376-2428>

3 Centro Universitário Educacional Araucária (UNIFACEAR), Araucária, PR, Brasil.

E-mail: rafasilvactba@hotmail.com | ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8024-1362>

4 Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, PR, Brasil.

E-mail: gio\_reus@yahoo.com.br | ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0443-4773>

5 Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, PR, Brasil.

E-mail: medeiros.ufpr@gmail.com | ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-3112-9715>

Revista de Engenharia Civil IMED, Passo Fundo, vol. 6, n. 2, p. 53-68, Julho-Dezembro 2019 - ISSN 2358-6508

[Recebido: Janeiro 01, 2019; Aceito: Agosto 26, 2019]

DOI: <https://doi.org/10.18256/2358-6508.2019.v6i2.3147>

#### Endereço correspondente / Correspondence address

Ana Paula Brandão Capraro  
Rua Gastão Poplade, n. 269, apto 02 – Curitiba, Brasil.  
CEP: 80220-160.

Sistema de Avaliação: *Double Blind Review*  
Editora: Luciana Oliveira Fernandes

Como citar este artigo / How to cite item: [clique aqui/click here!](#)

## Resumo

A durabilidade das estruturas de concreto está diretamente atrelada ao meio no qual os materiais estão expostos. O entendimento dos mecanismos degradantes atuantes nas estruturas é importante, visto que estudos podem ser desenvolvidos para o melhoramento dos materiais, possibilitando que estes sejam mais duráveis sob diferentes condições ambientais. O presente trabalho apresenta um estudo de caso, com o objetivo de analisar a vida útil de uma edificação, localizada em Curitiba-PR, estando a mesma sujeita a contínua emissão de CO<sub>2</sub>, advinda do meio urbano. Considerando o mecanismo de carbonatação como um dos principais responsáveis ao desencadeamento da corrosão de armaduras de edificações, localizadas nos grandes centros urbanos, a pesquisa aplicou dois modelos de previsão de vida útil, Tuutti (1982) e Possan (2010), para determinar a vida útil da estrutura, levando em consideração somente esse fenômeno. Como resultados o trabalho corroborou a hipótese de que os pilares internos estão mais sujeitos ao mecanismo de carbonatação, isto por estes não estarem em contato direto com a água da chuva. Nos casos em que se notou maior agressividade (pilares internos) a vida útil da edificação já está comprometida, com um processo de corrosão instalado. Nos pilares externos, situação mais amena, a vida útil verificada é maior, ficando próximo e até ultrapassando os 50 anos sugeridos pela norma brasileira, NBR 15575 (2013).

**Palavras-chave:** Durabilidade. Estudo de caso. Carbonatação. Vida útil. Corrosão.

## Abstract

There is a direct relationship between the durability concrete structures and the environment in they are exposed. Studies can be developed to understanding of the degrading mechanisms acting on the structures is important, developed for the improvement of the materials, allowing the structures to be more durable under different environmental conditions. The present work presents a case study, with the objective of analyzing the useful life of a building, located in Curitiba-PR, being the same subject to continuous emission of CO<sub>2</sub>, coming from the urban environment. Considering the carbonation mechanism as one of the main responsible for triggering the corrosion of building reinforcements located in large urban centers, the research applied two models of useful life prediction, Tuutti (1982) and Possan (2010), to determine the useful life of the structure, taking in consideration only this phenomenon. As results, the work corroborated the idea that the internal pillars are more subject to the carbonation mechanism, because they are not in direct contact with the rainwater. In cases where had greater aggressiveness (internal pillars) was reached the life of the building, with an active corrosion process. In the external pillars, a more pleasant situation, the verified useful life is higher, getting closer and even surpassing the 50 years suggested by the Brazilian standad, NBR 15575 (2013).

**Keywords:** Durability. Case study. Useful life. Carbonation. Corrosion.

## 1 Introdução

Atualmente existem duas recomendações normativas brasileiras que trazem considerações sobre as propriedades do concreto para que este, quando exposto ao ambiente, não tenha sua vida útil comprometida devido aos mecanismos degradantes. Um destes documentos está em vigor desde a década de 40 e ambos foram modificados à medida em que os estudos na área de durabilidade de estruturas de concreto foram aprofundando.

A NBR 6118 teve sua primeira publicação em 1940, ainda nomeada como NB-1 – Norma para cálculo e execução de obras de concreto armado. Esse documento não trazia em seu corpo especificações contundentes quanto à durabilidade do material, a mesma era descrita de forma a atender as características de resistência do concreto endurecido das estruturas em geral. As atualizações seguintes trataram apenas de critérios quanto ao estado limite último e adoção do sistema internacional de medidas.

Isso se estendeu até sua versão de 2003, período no qual a norma passou por um desmembramento e teve a concepção de uma norma específica para projeto, a NBR 6118 (ABNT, 2003), e outra para a execução, a NBR 14931 (ABNT, 2003), abordando o concreto simples, armado e protendido, com um capítulo exclusivo para diretrizes de durabilidade da estrutura.

Em 2014 foi lançada uma nova versão da norma, NBR 6118 (ABNT, 2014), na qual são estabelecidos requisitos básicos para o projeto de estruturas de concreto simples, armado e protendido, em que foram estipulados novos critérios de cobrimento mínimo, relação água/cimento, consumo de cimento e resistência mecânica, em função do ambiente em que a estrutura estaria inserida.

O mesmo ocorreu com a NBR 12655, que na primeira edição, em 1996, não trazia as informações referentes ao assunto. Hoje, a versão vigente, NBR 12655 (ABNT, 2015), contempla as características mínimas para o concreto, dada um determinado ambiente ao qual a estrutura será exposta. Construções realizadas anteriormente as novas considerações não levavam em conta os parâmetros hoje estabelecidos.

Levando em consideração o exposto, o presente trabalho teve como objetivo a determinação da vida útil residual de uma estrutura de aproximadamente quinze anos de idade. A edificação não foi concluída, e conseqüentemente não recebeu proteções contra os mecanismos de degradação.

A expectativa de vida útil de estruturas em concreto armado pode ser prevista por meio de métodos empíricos de previsão de vida útil, que necessitam de coleta de informações específicas da estrutura para serem utilizados. Os métodos de Tuutti (1982) e Possan (2010), escolhidos para a aplicação neste estudo, fornecem diretrizes para a avaliação de estruturas reais, expostas ao ambiente, levando em conta o mecanismo da carbonatação do concreto, utilizando-se de dados de entrada de fácil obtenção.

## 2 Fundamentação teórica

Por definição da NBR 6118 (ABNT, 2014), a durabilidade é a capacidade da estrutura resistir às influências previstas e definidas, em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto estrutural.

A vida útil (VU) é definida pela NBR 15575 (ABNT, 2013) como sendo o período efetivo de tempo que uma construção ou qualquer um de seus componentes satisfazem os requisitos de desempenho para qual foram projetados e construídos, observando os processos de manutenção previstos no respectivo manual de uso, operação e manutenção.

Ainda, na NBR 15575 (ABNT, 2013), são apresentados valores mínimos de vida útil de projeto (VUP) para cada sistema construtivo de uma edificação. Para o sistema estrutural VUP mínima de 50 anos e VUP superior de 75 anos. O valor mínimo, inferior ao prazo aceito internacionalmente como mínimo (ISO 15686-1, 2011), foi adotado devido as condições socioeconômicas do país, e o superior por sua vez foi adotado considerando o que é tecnicamente possível de ser obtido atualmente.

Diferentes mecanismos degradantes podem interferir na vida útil de uma edificação. Segundo Feng *et al.* (2016), a corrosão de armaduras de concreto é o mecanismo deteriorante mais significativo para estruturas armadas. Segundo Stefanoni, Angst e Elsener (2018), a presença de agentes agressivos podem acelerar a corrosão, entre eles o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e os íons cloretos (Cl).

A carbonatação, mecanismo deteriorante estudado nesta pesquisa, trata-se da penetração do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) no interior do concreto por meio da sua rede de poros ou pelas suas fissuras. Segundo Shah *et al.* (2018) e Hargis *et al.* (2017), na presença de água ocorre uma reação química com a pasta de cimento hidratada, a qual transforma os produtos de hidratação do cimento em carbonatos, especialmente a portlandita, conhecida também por hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), em carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

A umidade do ambiente exerce grande influência na reação da carbonatação. Papadakis, Fardis e Vayenas (1992) apresentaram uma análise da influência dos fatores ambientais na velocidade de carbonatação. Segundo os autores, o mecanismo ocorre de maneira mais rápida em ambientes com umidade superior à 50% e inferior à 90%.

Outro fator que pode influenciar na velocidade da carbonatação é o sistema cimentício utilizado. Khunthongkeaw, Tangtermsirikul e Leelawat (2006) apresentam coeficientes de carbonatação superiores para concretos com adição de cinza volante, quando estes foram comparados à concretos sem adições. O mesmo é apresentado no estudo de Medeiros *et al.* (2017), no qual tanto os concretos com adição como os com substituição de cinza volante apresentaram menor reserva alcalina e maior tendência à carbonatação.

Há diversos modelos matemáticos para previsão da vida útil das estruturas por meio da carbonatação. Dentre eles há modelos simples, como o modelo proposto por Tuutti (1982), que é baseado na lei de Fick, o qual leva em consideração a espessura carbonatada, o coeficiente de carbonatação e o tempo, conforme Equação 1. E há também modelos que necessitam de mais parâmetros como os modelos desenvolvidos por Ekolu (2018), Pan *et al.* (2018). Dentre estes trabalhos, destaca-se o estudo de Possan (2010) que propôs um modelo matemático voltado à previsão de vida útil de projeto de estruturas de concreto armado carbonatadas, o qual envolve variáveis de entrada de fácil obtenção (como resistência a compressão axial do concreto, tipo de cimento, umidade relativa, entre outras).

Modelos simplificados possuem a facilidade de necessitar de poucos dados para sua utilização, enquanto modelos que envolvem parâmetros tendem a apresentar resultados mais refinados. Devido a possibilidade de obtenção dos dados, optou-se pela utilização do modelo desenvolvido por Tuutti (1982) e Possan (2010).

$$e_c = k\sqrt{t} \text{ Eq.1}$$

$e_c$  = Profundidade de carbonatação média do concreto, em mm;

$k$  = Fator variável referente ao tipo de cimento empregado;

$t$  = Tempo, em anos.

O comportamento da degradação do concreto devido à carbonatação, proposto por Possan (2010), é descrito pela Equação 2, para o período de iniciação.

$$y = k_c \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{fc}} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp \left[ \left( \frac{k_{ad} \cdot ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c} \right) + \left( \frac{k_{CO_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c} \right) - \left( \frac{k_{UR} \cdot (UR - 0,58)^2}{100 + f_c} \right) \right] \cdot k_{ce} \text{ Eq.2}$$

Onde:

$y$  = Profundidade de carbonatação média do concreto, em mm;

$f_c$  = Resistência característica à compressão axial do concreto, em MPa;

$k_c$  = Fator variável referente ao tipo de cimento empregado;

$k_{fc}$  = Fator variável referente à resistência à compressão axial do concreto, em função do tipo de cimento utilizado (Tabelado);

$t$  = Idade do concreto, em anos;

$ad$  = Teor de adição pozolânica no concreto, em % em relação à massa de cimento;

$k_{ad}$  = Fator variável referente às adições pozolânicas do concreto – sílica ativa, metacaulim e cinza de casca de arroz – em função do tipo do cimento utilizado (Tabelado);

$UR$  = Umidade relativa média, em %\*0,01;

$k_{UR}$  = Fator variável referente à umidade relativa, em função do tipo de cimento utilizado (Tabelado);

$CO_2$  = Teor de  $CO_2$  da atmosfera, em %;

$k_{CO_2}$  = Fator variável referente ao teor de  $CO_2$  do ambiente, em função do tipo de cimento utilizado (Tabelado);

$k_{ce}$  = Fator variável referente à exposição à chuva, em função das condições de exposição da estrutura (Tabelado).

As variáveis de característica do concreto, condições ambientais e de exposição da estrutura, consideradas no método, foram, segundo o estudo de Possan (2010), as que apresentam maiores influências na velocidade do avanço da carbonatação do concreto.

### 3 Programa Experimental

A estrutura, objeto deste estudo, é um edifício residencial de oito pavimentos, localizado na cidade de Curitiba/PR. A construção da edificação foi interrompida ainda na fase de execução das vedações verticais, sendo que apenas em alguns pavimentos verifica-se a conclusão das vedações externas e/ou internas. Com cerca de quinze anos de idade, a estrutura encontra-se altamente exposta aos fatores ambientais, como chuva, umidade e gases, o que colabora para o avanço da frente de carbonatação do concreto desta estrutura.

Para a obtenção das informações da edificação foi realizada uma visita de reconhecimento do local, identificando as reais condições de exposição e obtenção de dados referente ao processo construtivo. Entretanto, alguns registros de diversas informações construtivas foram extraviados, devido ao histórico de transferência do responsável legal pela construção ao longo dos quinze anos, resultando em impasses de continuidade construtiva da edificação.

A coleta de dados, item que será detalhado na sequência, ocorreu em quatro pilares distintos, como apresentado na Figura 1. A escolha dos pilares se deu pela análise de dois pilares expostos diretamente à ação do tempo e dois internos, que estariam mais protegidos do intemperismo.

**Figura 1** – Pilares adotados para coleta de dados



#### 3.1 Coleta de dados

A aplicação do método Possan de previsão de vida útil requer a entrada de alguns dados, referente a idade do concreto, profundidade da frente de carbonatação do concreto, espessura de cobrimento da armadura, resistência característica à compressão

axial do concreto ( $f_{ck}$ ), tipo de cimento utilizado, tipo e teor de adição do cimento, concentração de  $CO_2$ , umidade relativa média do ar e condição de exposição à chuva.

Por conta da indisponibilidade de documentações da construção não foi possível determinar a idade exata da edificação. Sendo assim, com base nas informações históricas estipulou-se uma idade aproximada de quinze anos. A adoção da idade não prejudica a análise realizada, isso porque, pelos dados coletados, a idade poderia variar pouco, um ano para mais ou para menos, não influenciando os resultados almejados, visto que os dois modelos estudados tratam-se de modelos exponenciais. Ainda, pelo déficit de dados, não foi possível identificar o tipo de cimento e o teor de cimento empregado na estrutura.

O valor referente a umidade relativa do ar foi determinado com base no relatório do Instituto Nacional de meteorologia (INMET), para a cidade de Curitiba no período correspondente aos últimos quinze anos, a umidade relativa média do ar foi de 80%. A quantidade de  $CO_2$  disponível no ar foi obtida por meio da leitura, no local, com o equipamento medidor de  $CO_2$ .

A resistência característica do concreto ( $f_{ck}$ ) seria obtida, a princípio, por meio de pesquisa em documentos de obra, como notas de compra de concreto ou relatório de concretagem dos pilares, que contivessem essa informação. Entretanto, não foi encontrado nenhum destes documentos que se referissem aos pilares do pavimento analisado, térreo, apenas de pavimentos superiores. Considerou-se, inicialmente, que o concreto utilizado no pavimento térreo foi o mesmo empregado nos outros pavimentos, com resistência correspondente a 35 MPa. No sentido de verificar a proximidade dessa informação com o concreto aplicado, foi realizado o ensaio de esclerometria para estimar a resistência do concreto dos pilares.

### 3.2 Execução de ensaios

Como mencionado anteriormente foram adotados quatro pontos de análise da profundidade carbonatada, sendo eles em dois pilares externos, com exposição direta à chuva e ação de intemperes, e em outros dois pilares internos, sem exposição direta.

A profundidade de carbonatação foi obtida por meio do ensaio de aspersão de fenolftaleína (1g de fenolftaleína dissolvida em 100 ml de solução de álcool etílico) nas superfícies de concretos expostas. Normas internacionais, como a BS EN 14630 (2006) e a JIS A 1152 (2011), recomendam o uso da fenolftaleína para identificação das áreas carbonatadas. A aplicação da solução faz com que haja mudança da coloração do concreto, para rosa púrpura, nas áreas ainda não atingidas pelo fenômeno, e manutenção da coloração do concreto para as áreas já afetadas (CHOI *et al.*, 2017).

A coleta dos dados da frente de carbonatação, para aplicação do modelo de vida útil de Possan (2010), seguiu a metodologia: a) localização das armaduras próximo a base dos pilares, com equipamento localizador da marca BOSCH; b) demarcação da

área do ensaio, a 20 cm do piso, em cada um dos pilares; c) corte da área de análise, com serra disco e golpes com a ponteira; d) identificação, limpeza da armadura e obtenção do cobrimento; e) aspersão da solução de fenolftaleína, para obtenção da profundidade carbonatada; f) recuperação da área exposta, com argamassa de reparo e cura com manta não tecida de poliéster.

A Figura 2 apresenta a sequência de atividades adotada para coleta de dados em cada um dos pilares estudados.

**Figura 2** – Sequência de atividades adotada para coleta de dados



Para a determinação da profundidade de carbonatação dos pilares foram realizadas medições da área carbonatada em três pontos diferentes. A média entre os valores desses pontos foi adotada como parâmetro para aplicação no modelo.

A medição do teor de dióxido de carbono presente no ambiente foi realizada pontualmente na superfície dos quatro pilares analisados com o auxílio do medidor de  $\text{CO}_2$ , identificado na Figura 3.

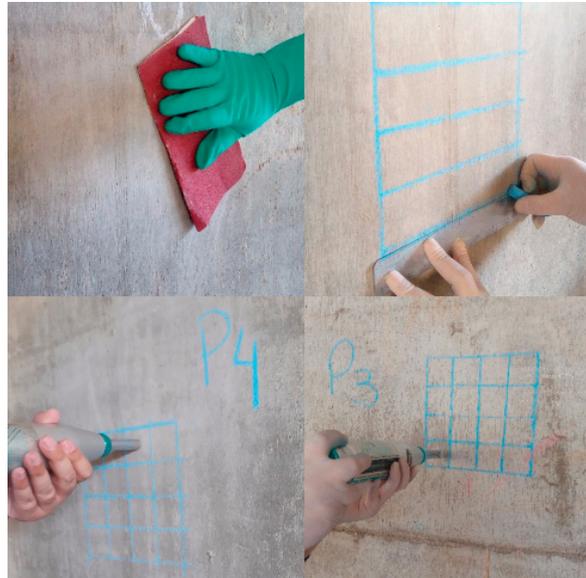
**Figura 3** – Medição do teor de dióxido de carbono na superfície dos pilares estudados



A verificação da resistência mecânica foi realizada por meio do ensaio esclerométrico, seguindo as recomendações da NBR 7584 (ABNT, 2012): a) lixamento da superfície a ser ensaiada; b) demarcação dos 16 pontos a serem ensaiados, com distância de 3cm; c) posicionamento do equipamento ortogonalmente a superfície

ensaiada; d) realização do ensaio, como demonstrado na Figura 4. O índice esclerométrico médio (IEm) para cada pilar foi dado pela média aritmética dos índices encontrados em todos os 16 golpes, desconsiderando os valores de IE que se diferissem mais que 10% de IEm.

**Figura 4** – Etapas para a realização do ensaio de esclerometria



## 4 Resultados e Discussões

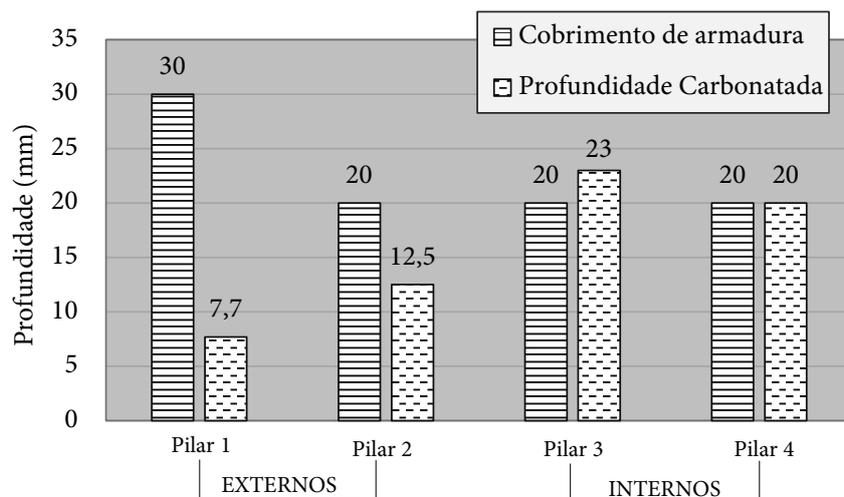
A análise da concentração de  $\text{CO}_2$  nas superfícies dos pilares indicou uma variação muito pequena entre os resultados. Pela pequena variação nos resultados, adotou-se a média dos quatro valores obtidos, 232 ppm, ou seja, 0,0232%, para a aplicabilidade da variável de cálculo.

No que se refere ao cobrimento das armaduras foram encontradas variações entre as duas faces dos pilares afetados pelo ensaio. Optou-se pela adoção da medida desfavorável para a vida útil da estrutura, ou seja o menor valor, conforme destacado na Tabela 1. Apresenta-se na Figura 5 os valores de cobrimento e profundidade de carbonatação de cada pilar.

**Tabela 1** – Cobrimento da armadura dos quatro pilares

Pilar	Cobrimento (mm)	
	Direção X	Direção Z
1	30	40
2	45	20
3	50	20
4	35	20

**Figura 5** – Resultados coletados de cobrimento das armaduras e a respectiva profundidade carbonatada dos pilares estudados



Levando em consideração a recomendação atual da NBR 6118 (ABNT, 2014) os pilares deveriam ter, pela exposição à classe de agressividade moderada (urbana), o cobrimento de no mínimo 30mm. Verificou-se, em três, dos quatro pilares analisados, espessuras de cobrimentos abaixo do normatizado, o que aumenta a susceptibilidade da estrutura aos mecanismos degradantes.

Os pilares externos, 1 e 2, apresentaram profundidades de frentes de carbonatação menores que os internos. Os resultados dos pilares 3 e 4, internos, indicaram carbonatação do concreto maior ou igual a espessura de cobrimento, apresentando então a despassivação da região e sugerindo o estado de corrosão ativa da armadura, confirmado na inspeção visual com a desagregação superficial e manchamento da mesma.

A justificativa para tais resultados, apresentada em outros trabalhos, como Figueiredo e Nepomuceno (2006) e Khunthongkeaw, Tangtermsirikul e Leelawat (2006), está ligada a lavagem dos pilares externos pela água da chuva, a qual acaba retardando o mecanismo da carbonatação pela lavagem do contaminante na superfície do pilar. No caso dos pilares internos, protegidos, e por isso sem acesso a água da chuva, sua durabilidade provavelmente foi prejudicada pela facilidade de entrada de  $\text{CO}_2$ .

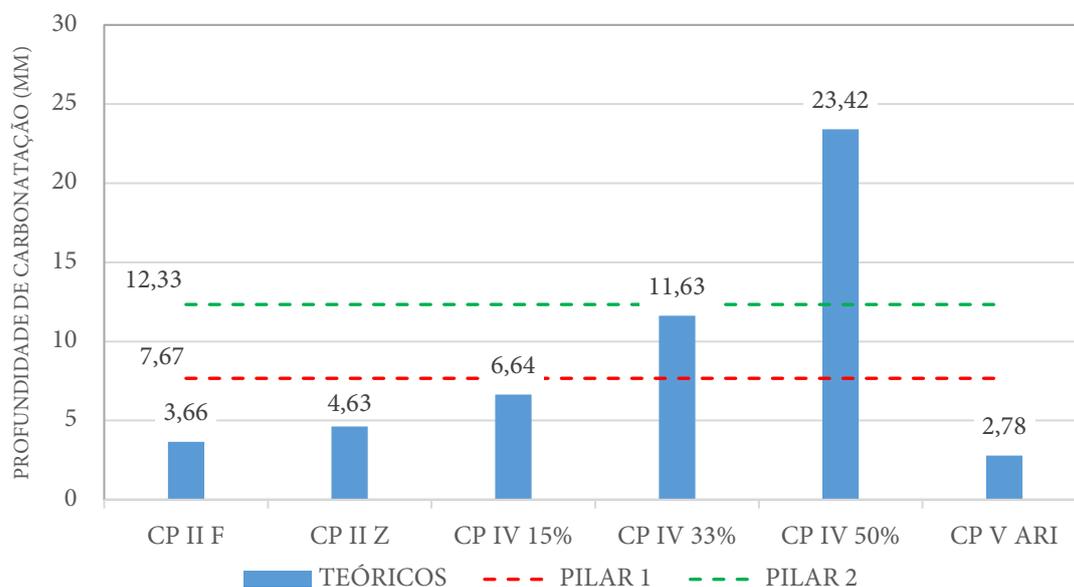
Para a estimativa da resistência do concreto adotou-se o índice esclerométrico. O índice médio obtido no ensaio para a resistência superficial foi de aproximadamente 35 MPa, com uma dispersão de 6,25 MPa. Assim sendo, foi verificada a proximidade do valor do  $f_{ck}$  de 35 MPa levantado inicialmente, sendo então este valor aplicado no modelo.

Antes da aplicação dos modelos foi realizada a análise do tipo de cimento utilizado na obra, visto que para a determinação dos coeficientes do método há necessidade do conhecimento do tipo de cimento e do teor de adição pozolânica presente no material. Pela falta de informações dos materiais empregados na obra foram adotados os cimentos comercializados na região e foi feita a aplicação no modelo,

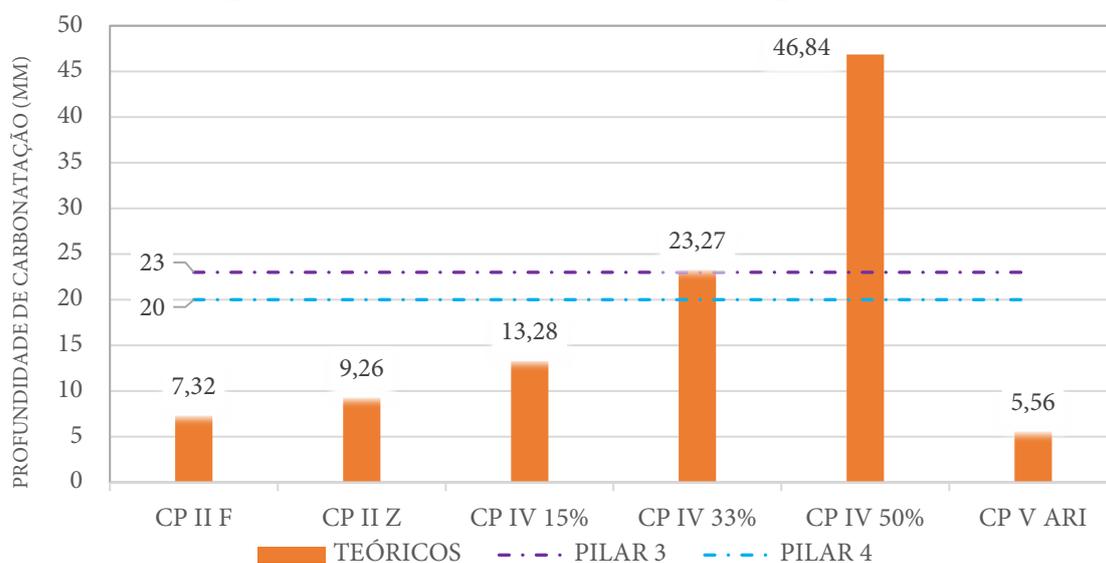
de modo a se obter valores de profundidade de carbonatação próximos aos dos valores encontrados in loco. Os tipos de cimento considerados foram: CP II F, CP II Z com 15% de adição, CP V ARI e em razão do cimento CP IV ser composto de 15% a 50% de adição pozolânica, dependendo da disponibilidade no mercado, considerou-se os limites inferior, superior e ainda um valor intermediário de adição de 33%.

A Figura 6 e a Figura 7 apresentam os valores teóricos e reais da profundidade de carbonatação dos pilares externos e internos, respectivamente, para os diferentes tipos de cimento, utilizando os dados encontrados nos ensaios e considerando 15 anos de exposição da estrutura.

**Figura 6** – Profundidade de carbonatação teórica, em função dos tipos de cimento, versus profundidade de carbonatação real dos pilares externos



**Figura 7** – Profundidade de carbonatação teórica, em função dos tipos de cimento, versus profundidade de carbonatação real dos pilares internos



A estimativa de profundidade de carbonatação que mais se aproximou da real obtida nos ensaios foi a do cimento CP IV, com adição pozolânica de 33%, como observado no gráfico, indicando o possível uso desse material.

Adotando o tipo de cimento como sendo o CP IV, determinaram-se então os coeficientes necessários para a aplicação da equação matemática proposta pelo método, apresentados pela TABELA 2.

**Tabela 2** – Coeficientes calculados e aplicados no modelo matemático.

Coeficientes	Valor
$k_c$	33,27
$k_{fc}$	1,70
$k_{ad}$	0,32
$k_{co_2}$	15,50
$k_{ur}$	1000

A condição de exposição ou não à chuva dos pilares determinou os valores do coeficiente  $k_{ce}$ , sendo que para os pilares internos, protegidos da chuva, foi igual a 1,3, e para os externos, desprotegidos da chuva, igual a 0,65.

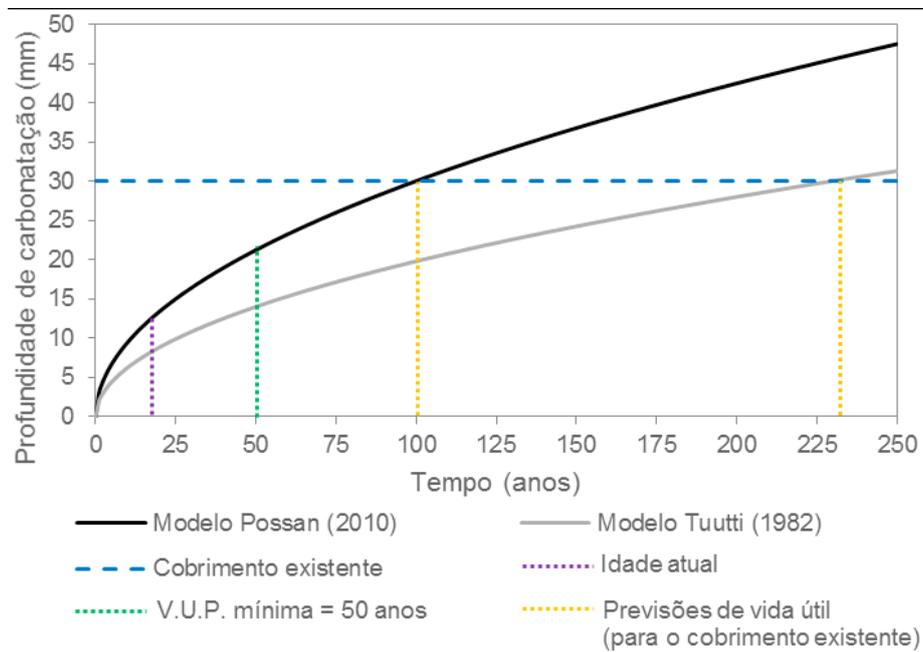
Aplicando todos os coeficientes e os dados de umidade relativa média, concentração de  $CO_2$ , resistência à compressão do concreto e o teor de adição pozolânica de 33% determinou-se as estimativas de vida útil por meio do modelo de Possan (2010). Com os dados de profundidade de carbonatação e tempo de carbonatação determinou-se as estimativas de vida útil por meio do modelo de Tuutti (1982). A previsão foi realizada para os pilares externos. As estimativas de vida útil foram consideradas para a idade na qual a profundidade de carbonatação do concreto é igual a espessura do cobrimento das armaduras. Essas análises são apresentadas na Figura 8 e na Figura 9, para os pilares 1 e 2, respectivamente.

Estima-se que a profundidade carbonatada do pilar 1 alcançará o cobrimento existente (30mm) com 100 anos para o modelo de Possan (2010) e 230 anos para o modelo de Tuutti (1982) da estrutura. Portanto a vida útil residual para os modelos de Possan (2010) e Tuutti (1982) é de 85 anos e 215 anos, respectivamente. Além disso, nota-se que, se usado o cobrimento mínimo por norma (30mm), NBR 6118 (2014), a estrutura estaria com uma vida útil estimada superior ao exigido pela NBR 15575 (2013).

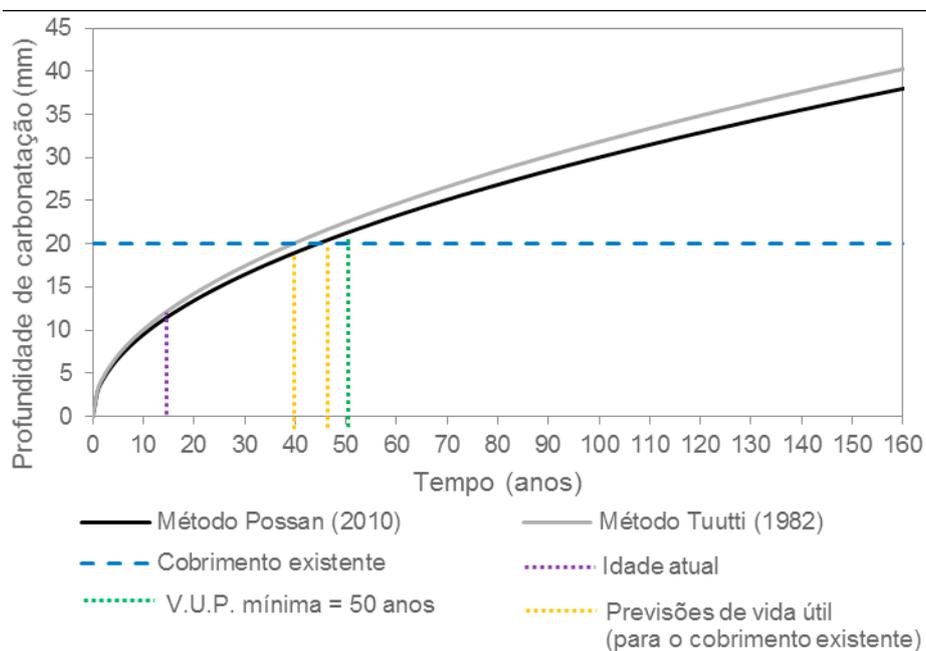
No pilar 2 a estimativa da profundidade carbonatada indicou que essa alcançará o cobrimento real (20mm) em 45 anos para o modelo de Possan (2010) e 43 anos para o modelo de Tuutti (1982). Sendo a vida útil residual de 30 anos para o modelo de Possan (2010) e 28 anos para o modelo de Tuutti (1982). Diante disso, o uso de um cobrimento inferior ao recomendado pela NBR 6118 (2014), de 30 mm, implicou na redução da vida útil do elemento e não atendimento dos 50 anos de vida útil recomendados pela NBR 15575 (2013) para ambos os modelos de previsão de vida útil utilizados.

Para os casos dos pilares internos, 3 e 4, por apresentarem profundidades de carbonatação iguais e até maiores que as suas espessuras de cobrimento, não foi aplicada a estimativa de vida útil, pois essa já teria chegado ao fim.

**Figura 8** – Estimativa de vida útil para o pilar 1 - externo



**Figura 9** – Estimativa de vida útil para o pilar 2 - externo



## 5 Considerações finais

Os pilares internos, por não sofrerem ação direta de chuva, tenderam a apresentar maiores frentes de carbonatação, comparados aos externos, expostos a ação direta da chuva.

Notou-se que as espessuras de cobrimento encontradas, em três dos quatro pilares, foram inferiores ao recomendado pela norma brasileira atual (NBR 6118), 30 mm, o que representa redução da vida útil da estrutura. O pilar 1 apresentou 30 mm de espessura de cobrimento, e previsão de vida útil superior ao estabelecido pela norma NBR 15575 (2013). Em contrapartida o pilar 2, mesmo estando em condições amenas de exposição, resultou em uma previsão de vida útil menor que o recomendado. Isso ocorreu, em função do cobrimento ser menor que o estipulado pela norma NBR 6118 (2014).

Os pilares internos 3 e 4 apresentaram cobrimento de apenas 20 mm, o que contribuiu para a ocorrência precoce de corrosão das armaduras, fenômeno identificado pela presença de manchas de corrosão. O que poderia ser evitado caso o cobrimento mínimo das armaduras fosse respeitado.

A vida útil estimada pelo estudo é referente ao período de iniciação, portanto, não é aplicável nos casos em que a estrutura apresenta corrosão de armadura em progresso. Como nos pilares internos observou-se essa condição, conclui-se que parte da estrutura já está com sua vida útil comprometida, necessitando imediatamente de intervenções.

O trabalho destaca a importância de adoção de boas práticas construtivas e de projetos, no caso da obra estudada, abandonada sem sistemas de proteção, nota-se comprometimento da vida útil já com 15 anos de idade da edificação.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem as agências brasileiras CNPq, Capes e Fundação Araucária pelo apoio financeiro, a Universidade Federal do Paraná (UFPR), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil (PPGECC) e ao Centro Universitário UNIFACEAR.

## Referências

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NB-1* – Calculo e execução de obras de concreto armado. Rio de Janeiro: Abnt, 1940. 24 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 1 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2003. 221 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14931*: Execução de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro: Abnt, 2004. 53 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15575-1*: Edificações habitacionais - Desempenho – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: Abnt, 2013. 60 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2014. 256 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 12655*: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. 3 ed. Rio de Janeiro: Abnt, 2015. 29 p.
- BRITISH EUROPEAN STANDARD – *BS EN 14630*: Products and systems for the protection and repair concrete structures. Test methods – Determination of the carbonation depth in a hardened concrete through the phenolphthalein method. London, 2006.
- CHOI, J.; LEE, Y.; KIM, Y. Y.; LEE, B. Y. Image-processing technique to detect carbonation regions of concrete sprayed with a phenolphthalein solution. *Construction and Building Materials*, v. 154, p. 451-461, 2017.
- EKOLI, S. O. Model for practical prediction of natural carbonation in reinforced concrete: Part 1-formulation. *Cement and Concrete Composites*, v. 86, p. 40-56, 2018.
- FENG, G.; LI, L.; KIM, B.; LIU, Q. Multiphase modelling of ionic transport in cementitious materials with surface charges. *Computational Materials Science*, v. 111, p. 339-349, 2016.
- FIGUEIREDO, C. R.; NEPOMUCENO, A. A. Relação entre a carbonatação e a absorvidade em edificações de concreto em Brasília. In: *Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído*, ENTAC. Florianópolis, 2006.
- HARGIS, C. W.; LOTHENBACH, B; MULLER, C. J.; WINNEFELD. Carbonation of calcium sulfoaluminate mortars. *Cement and Concrete Research*, v. 80, p. 123-134, 2017.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 15.686-1*: Buildings and constructed assets – Service life planning – Part 1: General principles and framework. Genebra, 2011. 21p.
- JAPAN INDUSTRIAL STANDARDS – *JIS A 1152*: Method for measuring carbonation depth of concrete. Japan, 2011.
- KHUNTHONGKEAW, J.; TANGTERMSIRIKUL, S.; LEELAWAT, T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. *Construction and Building materials*, v. 20, p. 744-753, 2006.

MEDEIROS, M. H. F.; RAISDORFER, J. W.; HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve. *J Build Rehabil*, v. 2, 2017.

PAN, Z.; CHEN, A.; MA, R.; WANG, D.; TIAN, H. Three-dimensional lattice modeling of concrete carbonation at meso-scale based on reconstructed coarse aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 192, p. 253-271, 2018.

PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. Effect of composition, environmental factors and cement-lime mortar coating on concrete carbonation. *Materials and Structures*, v. 25, p. 293-304, 1992.

POSSAN, E. *Modelagem da Carbonatação e Previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano*. 2010. 265 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PROCEQ. *Manual: Martelo para teste de concreto (esclerômetro)*. Swiss Precision, 2018.

SHAH, V.; SCRIVENER, K.; BHATTACHERJEE, B.; BISHNOI, S. Changes in microstructure characteristics of cement paste on carbonation. *Cement and Concrete Research*, v. 109, p. 184-497, 2018.

STEFANONI, M.; ANGST, U.; ELSENER, B. Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete – A critical review. *Cement and Concrete Research*, v. 103, p. 35-48, 2018.

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