

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE PATOLOGIA E DESEMPENHO DAS CONSTRUÇÕES**

JOSÉ LUÍS TOLOTTI FRAGA

**AVANÇO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO NA ESTRUTURA DE CONCRETO
ARMADO DO PRIMEIRO EDIFÍCIO DE APARTAMENTOS DO MUNICÍPIO DE
PASSO FUNDO - RS**

São Leopoldo

2019

JOSÉ LUÍS TOLOTTI FRAGA

**AVANÇO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO NA ESTRUTURA DE CONCRETO
ARMADO DO PRIMEIRO EDIFÍCIO DE APARTAMENTOS DO MUNICÍPIO DE
PASSO FUNDO - RS**

Artigo apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Patologia e Desempenho das Construções, pelo Curso de Especialização em Patologia e Desempenho das Construções da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Orientadora: Prof^a. Msc. Fernanda Pacheco

São Leopoldo

2019

**AVANÇO DA FRENTE DE CARBONATAÇÃO NA ESTRUTURA DE CONCRETO
ARMADO DO PRIMEIRO EDIFÍCIO DE APARTAMENTOS DO MUNICÍPIO DE
PASSO FUNDO – RS**

**ADVANCE OF THE CARBONATING DEPTH IN REINFORCED CONCRETE
STRUCTURE OF THE FIRST APARTMENT BUILDING OF PASSO FUNDO CITY –
RS**

José Luís Tolotti Fraga*

Fernanda Pacheco**

Resumo: A carbonatação é uma das manifestações patológicas mais comuns em elementos de concreto armado. Esse fenômeno altera o potencial hidrogeniônico (pH) do concreto, removendo sua proteção química, permitindo a entrada de agentes e podendo causar a corrosão da armadura. Há vários fatores que interferem na velocidade dessa difusão de gás carbônico nos poros do concreto, entre eles a relação água/cimento, a classe de agressividade ambiental de inserção da edificação, o uso de adições minerais, a condição de saturação dos poros da estrutura, além dos processos de lançamento, adensamento e cura do concreto. No presente trabalho foi analisada a frente de carbonatação em um prédio residencial da década de 40, comparando a variação entre pontos internos e externos da edificação, levando em consideração as normas atuais e as vigentes na época da sua construção. Os resultados obtidos nesse estudo apontaram que a vida útil de projeto da edificação já está encerrada, pois a frente de carbonatação já encontrou a armadura, apontando a necessidade de reparação da estrutura.

Palavras-chave: Carbonatação. Durabilidade. Fenolftaleína. Vida útil.

Abstract: Carbonation is one of the most common pathological manifestations in reinforced concrete elements. This phenomenon alkalinizes the concrete, removing its chemical protection, allowing the entrance of agents and can cause the corrosion of the armature. There are several factors that interfere with the velocity of this carbon dioxide diffusion, such as water / cement ratio, environmental aggressiveness class, mineral additions, pore saturation condition, concrete release and curing process. In the present work the carbonation front was analyzed in a residential building from the 1940s, comparing the variation between internal and external points

* Aluno orientado. Engenheiro Civil pela UPF em 2016. Engenheiro Civil na Lantar Construções e Incorporações.

** Professora orientadora Fernanda Pacheco. Engenheira Civil e Mestre pela UNISINOS, Professora na instituição e atual engenheira civil no itt Performance, fernandapache@unisinós.br

of the building, taking into account current and current standards at the time of its construction. The results obtained in this study indicated that the design life of the building is already closed, because at the front of carbonation already found the armature, pointing out the need for repair of the structure.

Keywords: Carbonating. Durability. Phenolphthalein. Lifespan.

1 INTRODUÇÃO

Devido à implementação da norma de desempenho, NBR 15575 (ABNT, 2013) o tema de durabilidade e vida útil de projeto, está em alta no mercado da construção civil. Sendo o concreto um dos materiais de uso mais expressivo no setor, há grande relevância no estudo da sua durabilidade. Em relação às estruturas de concreto, uma das manifestações patológicas que afetam sua durabilidade é a difusão de gás carbônico (CO_2), processo que pode desencadear a corrosão da armadura, e levar ao colapso da estrutura, caso não haja intervenção para reparar o dano.

A questão durabilidade apresenta maior relevância quando consideramos que o custo de uso, operação e manutenção da estrutura ao longo da sua vida útil é maior que o custo de projeto e execução (FERREIRA, 2000). A durabilidade pode ser definida como a relação entre o ambiente, a estrutura e as condições de uso, operação e manutenção, as quais podem ter seu comportamento previsto ao longo dos anos graças ao maior conhecimento que se tem hoje da influência do meio em que a estrutura está inserida afeta a sua vida útil de projeto (MEDEIROS et al., 2011; PACHECO, 2016).

Como uma das manifestações patológicas de ocorrência expressiva tem-se a carbonatação do concreto, que consiste em alterações no seu pH causadas pela difusão de CO_2 no interior do concreto. (MEDEIROS JR et al, 2015). Quando o avanço da frente de carbonatação do concreto alcança a armadura (percorrendo o cobrimento) termina a vida útil de projeto da estrutura, conforme Helene (1997). Atualmente a norma NBR 15575 (ABNT, 2013) exige que a vida útil mínima para estruturas de concreto armado seja de 50 anos. A velocidade da frente de carbonatação pode ser influenciada por diversas características do concreto, como tipo do cimento, adições minerais, relação a/c (água/cimento), classe de

agressividade ambiental, espessura do cobrimento e condições de lançamento, adensamento e cura.

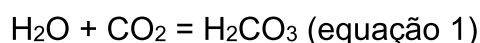
No presente artigo há o embasamento necessário para a compreensão do fenômeno do avanço da frente de carbonatação em estruturas de concreto armado. Há também o estudo de caso realizado na primeira edificação vertical multifamiliar da cidade de Passo Fundo, Rio grande do Sul, executado no ano de 1942. Nesse objeto, se pode comparar a velocidade da difusão do gás carbônico (CO₂) na estrutura com a norma de cálculo e execução de obras de concreto armado NB 1 (ABNT, 1940), vigente no momento da execução da edificação, e a NBR 6118 (ABNT, 2014), a qual nos dias de hoje substitui a primeira norma. Buscou-se identificar a influência da exposição da edificação e a respectiva frente de agressão, analisando pontos internos e externos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O avanço da frente de carbonatação do concreto é um dos principais desencadeadores da corrosão das armaduras, ocorrendo de forma lenta e perdendo intensidade com o passar do tempo (CASCUDO; CARESK, 2011). Os próximos itens irão abordar as reações químicas e demais características do processo.

2.1 O processo da carbonatação

A carbonatação transforma íons alcalinos em sais de carbonato, devido ao contato com o gás carbônico (CO₂) encontrado no ar (TOKUDOME, 2009), que quando penetra nos poros do concreto reage com as moléculas de água presente na estrutura, formando ácido carbônico (H₂CO₃) (equação 1), reagindo rapidamente com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), formando água (H₂O) e carbonato de cálcio (CaCO₃) (equação 2) consumindo álcalis da pasta de cimento hidratada como silicato de cálcio hidratada (C-S-H) e hidróxido de cálcio Ca(OH)₂ e conseqüentemente reduzindo o pH do concreto.



A partir da superfície do concreto a frente de carbonatação se distingue em três zonas (FERREIRA, 2000), sendo elas a região carbonatada (pH inferior a 8,3 levemente alcalino), a região em processo de carbonatação e a região que ainda não foi atingida pela carbonatação (pH de 12,6 a 13,5 altamente alcalino). Essas três regiões podem ser identificadas através da aplicação de uma solução indicadora de potencial hidrogeniônico pH, composta por 5% de fenolftaleína, dentre outros tipos, como a timolftaleína. A redução da alcalinidade do concreto provocada pela carbonatação reduz a camada de óxido protetora do aço, também conhecida como camada de passivação, processo que remove qualquer carbono residual da superfície do aço através da aplicação de ácido nítrico (HNO_3) (ANDRADE, 1992) deixando-o suscetível a corrosão devida às reações com o oxigênio (O_2), água (H_2O) e diferença de potencial. Quando a corrosão do aço se encontra em nível avançado, ocorre o deslocamento do concreto.

2.2 Fatores que influenciam o avanço da frente de carbonatação

Há vários fatores que afetam a velocidade da difusão do gás carbônico (CO_2) no concreto. Por exemplo, a relação água/cimento interfere nas propriedades da microestrutura do concreto endurecido, a qual controla a capilaridade dos poros (HELENE, 1993). Já o processo de lançamento, adensamento e cura mal executado, provoca a maior incidência de fissuras e conseqüentemente o aumento da porosidade do concreto (NEVILLE, BROOKS, 2013). Tem-se ainda a variação do meio em que a estrutura está inserida rural, urbano ou industrial, apontando para a influência do meio de inserção, ou classe de agressividade ambiental da estrutura (PACHECO, 2016).

O uso de adições de minerais, como materiais pozolânicos reduzem a resistência à carbonatação dos concretos, havendo um aumento da resistividade elétrica devido à redução da portlandita nos poros e o refinamento do mesmo, desencadeados pelas reações secundárias (RAISDORFER, 2015), no entanto, favorecem o empacotamento das partículas, reduzindo os poros por onde a agressão por álcalis pode ocorrer. Embora haja uma despassivação da armadura maior, o efeito da carbonatação ocorre de forma mais lenta devido ao aumento da resistividade elétrica. O teor de umidade dos poros, também afeta a difusão do gás carbônico (CO_2) (TUUTTI, 1982), pois nos poros onde há parcial preenchimento de

umidade a carbonatação do concreto é acelerada, já nos poros secos há difusão, porém não há reação devido à ausência de umidade e nos poros saturados de água (H₂O) a difusão do gás carbônico (CO₂) ocorre num ritmo muito mais lento.

Embora essa manifestação seja recorrente e de análise relevante, não há procedimento normatizado em norma brasileira (OLIVEIRA, 2017), apenas procedimentos empregados convencionalmente. Corriqueiramente emprega-se análise por colorimetria, verificando alterações no pH do concreto, através de extração de testemunho, ou de modo mais recente, com coleta de pó na estrutura. Helene (1993) propôs a conceituação de um modelo de previsão da vida útil das estruturas de concreto armado com problemas de corrosão das armaduras baseado na termodinâmica e cinética das reações, distinguindo os ensaios de concreto e de armadura dos ensaios do conjunto aço, concreto e meio ambiente. Tem-se, por fim, a discussão dos mecanismos pelo qual a armadura perde a proteção natural conferida pelo concreto. Possan (2010) também propôs um modelo matemático probabilístico para a previsão da vida útil de projeto e a estimativa da profundidade da carbonatação das estruturas de concreto armado em ambiente urbano, através de informações da composição do concreto.

Carmona (2005) comparou o modelo de previsão de vida útil de Helene, com um estudo experimental realizado no subsolo de uma garagem na cidade de São Paulo, posteriormente aplicou cálculos de probabilidade de despassivação do concreto. Já Moreira (2016), através do uso de indicadores de pH (colorimetria com solução de fenolftaleína), avaliou a frente de carbonatação de lajes de concreto armado de algumas salas do Centro Tecnológico da UFPB, diagnosticando que a laje de concreto já se encontrava comprometida, exigindo trabalhos de restauração da estrutura.

Em termos de mensuração, o modelo mais replicado é o de Tutti, que expressa através da equação 3, o avanço que ocorre na estrutura ao longo do tempo.

$$e = k \times \sqrt{t} \text{ (equação 3)}$$

Segundo o modelo, tem-se: “e” como espessura carbonatada, “k” como a constante de carbonatação e “t” como o tempo de exposição da estrutura. Muitas vezes o modelo é utilizado duas vezes. Na primeira delas utiliza-se a frente medida e a referente idade da edificação, para que seja obtido o “k”. Após, utiliza-se o “e”

como o cobrimento total, e descobre-se “t” como a vida útil total da estrutura, e ao descontar-se a sua idade tem-se a residual.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Realizou-se a verificação da frente de carbonatação em prédio de apartamentos da cidade de Passo Fundo, Rio Grande do Sul, localizado na esquina da Avenida Brasil com a Avenida General Neto, construído no ano de 1942, período de ocorrência da segunda guerra mundial com cimento e aço fornecidos por navios oriundos da Alemanha, de acordo com relatos relacionados ao empreendedor responsável pela construção da edificação.

Figura 1 - Execução da edificação



Fonte: Acervo dos familiares do proprietário.

A Figura 2 ilustra notícia alusiva a essa edificação.

Figura 2 - Jornal da época, descrevendo a edificação



Fonte: Jornal O Nacional.

O prédio foi construído na região central de Passo Fundo, em um dos cruzamentos mais importantes da cidade, na Avenida Brasil, onde há um intenso fluxo de veículos e uma parada de ônibus em frente à edificação. A Figura 3 ilustra a edificação atualmente, enquanto que a Figura 4 apresenta os pontos de análise.

Figura 3 - Edificação nos dias de hoje



Fonte: Autor.

Figura 4 - Local das extrações das amostras



Fonte: Autor.

O ensaio realizado envolveu a aplicação de uma solução indicadora de pH (fenolftaleína) no pó do concreto extraído através da realização de furos com furadeira na face inferior de algumas lajes da edificação, o reboco existente foi removido pontualmente para garantir que o pó coletado era somente da laje em estudo. Adotou-se a face inferior da laje, devido a não existência de pilares, subsolos e garagens na edificação, após a coleta do material, a laje e o reboco foram devidamente reparados. A coloração serviu para verificação do estado de carbonatação conforme Ferreira (2000), já citado.

Com o intuito de comparar a variação do avanço da frente de carbonatação no ambiente interno e externo da edificação, foram adotados um ponto na face inferior, um ponto na face lateral da viga da escada da circulação do primeiro para o segundo pavimento e dois pontos na face inferior das marquises do segundo pavimento para a retirada de amostras do concreto. O método empregado foi similar ao que Moreira (2016) utilizou em seu estudo, inicialmente foram colhidas 5 amostras por ponto, com variação de 5 mm de profundidade do furo entre uma amostra e outra, totalizando a investigação da difusão de gás carbônico (CO_2) na estrutura até a profundidade de 25 mm em relação a superfície do concreto. Porém mostrou-se necessário a coleta de mais amostras para determinar a profundidade da carbonatação dos pontos externos. A Figura 5 ilustra a extração e a identificação das amostras.

Como o projeto estrutural foi extraviado ao longo dos anos, empregou-se a detecção de partículas eletromagnéticas (pacometria) para identificar o posicionamento da armadura e a espessura do cobrimento do concreto, sendo assim possível diagnosticar se a frente de carbonatação alcançou a armadura (Figura 6).

Figura 5 - Extração e amostras coletadas



Fonte: Autor.

Figura 6 - Aplicação do detector de partículas eletromagnéticas na estrutura (equipamento cedido pelo CETEC da Universidade de Passo Fundo)



Fonte: Autor.

As amostras extraídas da edificação em análise foram comparadas com o modelo de previsão matemática de TUUTTI (1982) (equação 3), na qual podemos comparar os critérios exigidos pela NB 1 (ABNT, 1940) vigente no momento da execução da estrutura, substituída no presente momento pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os pontos foram definidos conforme a liberação do acesso pelos proprietários da edificação. Inicialmente foram extraídas cinco amostras de cada ponto com variação de 5 milímetros entre cada amostra, partindo de 5 milímetros e terminando em 25 milímetros em relação a superfície do concreto. Porém no ponto 3 e 4, até a profundidade de 25 milímetros não foi encontrado concreto não carbonatado, fazendo-se necessário a coleta de mais 11 amostras, para alcançar a profundidade de 45 e 55 milímetros respectivamente.

As amostras extraídas da edificação foram borrifadas com a solução de fenolftaleína, indicadora de pH, apontando para a tonalidade apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultado das amostras coletadas.

Profundidade	Indicador de pH			
	Face lateral de viga interna P1	Face inferior de viga interna P2	Face inferior de Laje externa P3	Face inferior de Laje externa P4
5 mm	Cinza	Cinza	Cinza	Cinza
10 mm	Magenta	Magenta	Cinza	Cinza
15 mm	Magenta	Magenta	Cinza	Cinza
20 mm	Magenta	Magenta	Cinza	Cinza
25 mm	Magenta	Magenta	Cinza	Cinza
30 mm	-	-	Cinza	Cinza
35 mm	-	-	Cinza	Cinza
40 mm	-	-	Cinza	Cinza
45 mm	-	-	Magenta	Cinza
50 mm	-	-	Magenta	Cinza
55 mm	-	-	-	Magenta

Fonte: Autor.

A NB 1 (ABNT, 1940) vigente na época em que a edificação foi construída exige que seja adotado um cobrimento mínimo de 15 milímetros para vigas internas e 15 milímetros para lajes externas, já a NBR 6118 (ABNT, 2014) adota o cobrimento nominal (c_{nom}) de 25 milímetros (composto pela tolerância mínima de execução (Δ_c) mais o cobrimento mínimo (c_{min})) para lajes na classe de

agressividade ambiental II (zonas urbanas) e 30 milímetros de cobertura nominal (C_{nom}) para vigas na mesma classe de agressividade ambiental.

Com o auxílio do detector de partículas eletromagnéticas (pacômetro) foi possível identificar o posicionamento das armaduras nos pontos onde as amostras foram coletadas, sendo possível definir a espessura do revestimento. Os testes foram realizados sobre camada de revestimento, sendo necessário descontar suas espessuras, os resultados já com o desconto dessa camada estão expressos na tabela 2. Os pontos 3 e 4 apresentaram o revestimento maior que o esperado, supõem-se que a laje não tenha armadura positiva, havendo somente armadura negativa, prática comum naquela época, pois o concreto era mais poroso e não apresentava grandes problemas de fissuras causadas por retração.

Tabela 2 – Cobrimento exigido pelas normas e frente de carbonatação encontrada.

	Descrição	C_{nom} (mm)	C_{min} (mm)	$C_{encontrado}$ (mm)	Frente percorrida 77 anos (mm)	Frente prevista 50 anos (mm)																										
P1	NB 1: 1940	-	15	8,00	10,00	8,06																										
	NBR 6118:2014	30	20				P2	NB 1: 1940	-	15	23,00	10,00	8,06	NBR 6118:2014	30	20	P3	NB 1: 1940	-	15	45,00	45,00	36,26	NBR 6118:2014	25	15	P4	NB 1: 1940	-	15	67,00	55,00
P2	NB 1: 1940	-	15	23,00	10,00	8,06																										
	NBR 6118:2014	30	20				P3	NB 1: 1940	-	15	45,00	45,00	36,26	NBR 6118:2014	25	15	P4	NB 1: 1940	-	15	67,00	55,00	44,32	NBR 6118:2014	25	15						
P3	NB 1: 1940	-	15	45,00	45,00	36,26																										
	NBR 6118:2014	25	15				P4	NB 1: 1940	-	15	67,00	55,00	44,32	NBR 6118:2014	25	15																
P4	NB 1: 1940	-	15	67,00	55,00	44,32																										
	NBR 6118:2014	25	15																													

Fonte: Autor.

De acordo com o apresentado na Tabela 2, pode-se perceber que o revestimento encontrado de concreto é muito inferior ao apresentado pelas normas, tanto a atual (o que já era esperado), quando a norma NB1, de vigência longínqua. Em termos da frente de carbonatação obtida com 77 anos de idade da edificação, percebe-se que apenas no P1 ela excede o revestimento adotado, indicando para uma incompatibilidade em termos de durabilidade.

Utilizando o “k” obtido na análise aos 77 anos, pode-se numericamente prever como estaria a frente de carbonatação na idade de 50 anos. A NBR 6118 (ABNT, 2014) e a NBR 15575 (ABNT, 2013) exigem que a durabilidade mínima da vida útil

de projeto da estrutura de concreto armado atinja 50 anos, sendo assim, para o cobrimento nominal de lajes adotado admite-se que a frente de carbonatação avance 3,54 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$, em relação as vigas o cobrimento nominal não deve ultrapassar 4,24 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$ (cálculos conforme parâmetros preconizados em norma). Já a NB 1 (ABNT, 1940), não entra no critério de durabilidade, se for considerado como vida útil de projeto o período de 50 anos, a velocidade da difusão do gás carbônico (CO₂) não poderia superar 2,12 mm/ $\sqrt{\text{ano}}$ em vigas internas e lajes externas. A Tabela 3 apresenta os coeficientes de difusão obtidos com os valores encontrados em campo.

Tabela 3 – Coeficiente de difusão do CO₂ no concreto.

Descrição	kCO ₂ (mm/ $\sqrt{\text{ano}}$)		
	NB 1: 1940 (50 anos)	NBR 6118:2014 (50 anos)	Encontrado (77 anos)
P1	2,12	3,54	1,14
P2	2,12	3,54	1,14
P3	2,12	4,24	5,13
P4	2,12	4,24	6,27

Fonte: Autor.

De acordo com a tabela 3 nota-se que o coeficiente de avanço da frente de carbonatação nos pontos um e dois foram inferiores ao previsto pelas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NB 1 (ABNT, 1940), já nos pontos 3 e 4 a situação é contrária.

Baseado nos resultados apresentados pelas tabelas 2 e 3, confirma-se que o avanço da frente de carbonatação nos pontos externos é maior que nos pontos internos, devido a maior exposição da fachada da edificação aos agentes agressivos do ambiente. Corrobora para essa afirmação o fato de o ponto quatro, apresentar maior avanço da frente de carbonatação em relação ao ponto três, devido ao mesmo estar inserido na via de maior fluxo de veículos.

No ponto um o avanço da frente de carbonatação foi inferior ao previsto pelas normas, porém não foi inferior do que o cobrimento encontrado na edificação, cobrimento esse inferior ao exigido pelas mesmas normas. Já no ponto dois o

cobrimento encontrado no local estava de acordo com as normas e o avanço da frente de carbonatação foi inferior ao previsto pelas mesmas.

Aplicando os coeficientes de carbonatação encontrados (kCO_2) nos pontos três e quatro para comparar o previsto pelas NBR 6118 (ABNT, 2014) e NB 1 (ABNT, 1940) aos 50 anos de idade da estrutura, nota-se que o avanço da frente de carbonatação foi maior que o previsto, porém não foram encontradas armaduras nessas marquises até a profundidade de 45 milímetros. Nas amostras coletadas do ponto três é possível identificar que o avanço da frente de carbonatação já encontrou a armadura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao comparar a NB-1/1940 com a NBR 6118/2014, nota-se a relevância do tema ao observar o aumento do cobrimento mínimo da armadura com o passar do tempo. A norma atual exige um cobrimento maior devido ao aumento da agressividade do meio em que a estrutura está inserida e da exigência de vida útil de projeto mínima de 50 anos. Além disso, cabe ser ressaltado o maior entendimento que se tem na atualidade de como o ambiente afeta as estruturas de concreto armado, e como pode-se identificar os mecanismos de dano.

Nos pontos em que as amostras foram coletadas a edificação apresenta bom estado de conservação, não há marcas visíveis de corrosão da armadura e deslocamento de concreto. Porém conforme identificado nos pontos um e três o avanço da frente de carbonatação já encontrou a armadura, dando fim a vida útil de projeto da edificação. Faz-se necessário uma inspeção mais detalhada para definir o plano de recuperação para a edificação e a elaboração de um plano de manutenção periódico, que impeça o início da corrosão.

Sugere-se para trabalhos futuros que sejam comparados a relação entre a variação do cobrimento mínimo da armadura e do f_{ck} (resistência característica do concreto à compressão), avaliando se com o aumento do f_{ck} pode se reduzir o cobrimento mínimo necessário. Também é sugerido a determinação do valor do coeficiente de carbonatação (kCO_2) do modelo de previsão matemático de Tuutti para a cidade de Passo Fundo – RS.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NB-1**: Cálculo e Execução de Obras de Concreto Armado. Rio de Janeiro, 1940.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15.575-1**: Edificações Habitacionais: desempenho, parte 1, requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.
- CARMONA, T. G. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas a carbonatação**. 2005. 93 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Engenharia de Construção Civil e Urbana, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2005.
- CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ação da carbonatação no concreto. In: ISAIA, G. C. (Cord.) **Concreto**: Ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 849-883.
- FERREIRA, R. M. **Avaliação de ensaios de durabilidade do betão**. 2000. 246 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Materiais e Reabilitação da Construção) – Escola de Engenharia da Universidade do Minho (UMinho), Guimarães – Portugal, 2000.
- FIGUEIREDO, E. P. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. In: ISAIA, G. C. (Cord.) **Concreto**: Ensino, pesquisa e realizações. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 829-855.
- HELENE, P.R.L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 1993. 231 f. Tese (Livre docência do departamento de engenharia de construção civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 1993.
- MEDEIROS, M. H. F.; et al. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: ISAIA, G. C. (Cord.) **Concreto**: Ciência e tecnologia. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2011.
- MOREIRA, J. D. **Verificação de profundidade de carbonatação em estruturas de concreto**: Estudo de caso. 2016. 39 f. Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, 2016.
- NEVILLE, A.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- 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 (tecnólogo em Construção Civil) – Centro de Ciências e Tecnologia, Departamento da Construção Civil, Universidade Regional do Cariri (URCA), Juazeiro do Norte, 2017.

PACHECO, F. **Investigação da relação entre os parâmetros de projeto das estruturas de concreto armado visando a durabilidade**. 2016. 193 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), São Leopoldo, 2016.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2010.

RAISDORFER, J. W. **Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: Efeitos da carbonatação, absorção capilar e resistividade do concreto**. 2015. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Construção Civil) – Departamento de Construção Civil da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 2015.

SILVA, V. M. **Ação da carbonatação em vigas de concreto armado em serviço, construídas em escala natural e reduzida**. 2007. 279 f. Tese (Doutorado em engenharia de estruturas) – Escola de engenharia da Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, 2007.

SPERB, J. E. K. **Carbonatação e absorção capilar de concretos com adições minerais e ativadores químicos**. 2003. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2003.

TOKUDOME, N. Carbonatação do concreto. Cimento Itambé. Curitiba, jun. 2009. Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/carbonatacao-do-concreto/>>. Acesso em: 04 fev. 2019.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. 504. ed. Stokholm: Swedish Cement and Concrete research, 1982.

VILASBOAS, J. M. L. **Durabilidade da Edificações de Concreto Armado em Salvador: uma contribuição para implantação da NBR 6118:2003**. 2004. Xx f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia (UFBA), Salvador, 2004.