

Análise da evolução da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto ao longo do tempo

Gabriela Cipriano de Farias (1), Daiane dos Santos da Silva (2)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1) gabi_cipriano@hotmail.com, (2) dss@unesc.net

Resumo: Além de apresentar características mecânicas muito satisfatórias, o concreto armado, tem demonstrado possuir uma durabilidade adequada para a maioria dos usos a que se destina. Esta durabilidade é o resultado natural que o concreto exerce sobre o aço, por uma parte, através do cobrimento de concreto, que é uma barreira física que garante, por impermeabilidade, a proteção deste ao ataque de agentes agressivos externos, e por outra, a elevada alcalinidade do concreto que desenvolve sobre o aço uma camada passiva que o mantém inalterado por um tempo indefinido. Ainda que o cobrimento das armaduras seja uma barreira, esta é permeável em certa medida e permite o acesso de elementos agressivos até o aço. Um destes elementos é o dióxido de carbono (CO_2), que quando em contato com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente no concreto, reduz a alcalinidade do mesmo. Este processo é denominado carbonatação, e é o tema de estudo deste trabalho que teve como principal objetivo a análise da profundidade de carbonatação em obras de diferentes idades. Esta profundidade foi obtida através de um indicador de pH, fenolftaleína, que apresenta coloração diferente em concreto carbonatado e não carbonatado. Ensaios complementares foram realizados, sendo eles o de dureza superficial do concreto, que permite obter um f_{ck} estimado para cada obra obtidos através do esclerômetro de Schmidt, e também o ensaio de difração de raios-x (DRX) que apresenta a microestrutura do concreto através da determinação de suas fases cristalinas, sendo capaz de comprovar a presença da carbonatação. Analisando os resultados obtidos quanto a profundidade de carbonatação e ao $f_{ck,est}$ de cada obra, percebe-se que não há uma similaridade entre o tempo de exposição (idade da obra) e a resistência, com a profundidade encontrada. Isto se dá devido a vários fatores que alteram as propriedades de cada concreto. Por fim, os ensaios de DRX apresentaram, todas as fases cristalinas presentes, sendo possível identificar as responsáveis pela resistência do concreto, e também a fase responsável pela carbonatação.

Palavras-chave: corrosão; resistência; profundidade; microestrutura.

Analysis of the development of carbonating depth in concrete structures through time

Abstract: In addition to having very broad mechanical characteristics, reinforced concrete has been shown to have adequate durability for most of the intended uses. This durability is the natural result that concrete exerts on the steel on the one hand through the concrete cover, which is a physical barrier that guarantees, by impermeability, the latter's protection against the attack of external aggressive agents, and on the other, the high alkalinity of the concrete that develops on the steel a passive layer that keeps it unchanged for an indefinite time. Although the covering of the reinforcements is a barrier, it is permeable to a certain extent and allows the access of

aggressive elements to the steel. One of these elements is carbon dioxide (CO_2), which when in contact with the calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) present in the concrete, reduces the alkalinity of the same. This process is called carbonation, and is the subject of study of this work that had as main objective the analysis of the depth of carbonation in works of different ages. This depth was obtained through a pH indicator, phenolphthalein, which shows different coloration in carbonated and non - carbonated concrete. Complementary tests were performed, which are the surface hardness of the concrete, which allows obtaining an estimated fck for each work obtained through the Schmidt sclerometer, as well as the X-ray diffraction (XRD) test that presents the microstructure of the concrete through of the determination of its crystalline phases, being able to prove the presence of carbonation. Analyzing the results obtained regarding the depth of carbonation and fck, is of each work, it is noticed that there is no similarity between the exposure time (age of the work) and the resistance, with the depth found. This is due to several factors that alter the properties of each concrete. Finally, the XRD tests presented all the crystalline phases present, being possible to identify those responsible for the resistance of the concrete, as well as the phase responsible for carbonation.

Key-words: corrosion; resistance; depth; microstructure.

Introdução

A partir do século XIX, o concreto armado começou a ser fortemente utilizado devido a sua alta resistência e durabilidade, tornando o material de construção mais utilizado no mundo. Porém, ao longo dos anos foram observadas manifestações de patologias que podem comprometer a vida útil, o aspecto estético e também a capacidade resistente, podendo levar ao colapso da estrutura (GOMES, 2006; LAPA, 2008).

Segundo Silva (2007), uma das patologias mais frequentes em estruturas de concreto armado é a corrosão das armaduras, que corresponde a 30% das anomalias existentes. Um dos fatores que contribui para a existência da corrosão é a carbonatação, que reduz o pH do concreto e despassa a armadura. Esta quando despassada e na presença de umidade, desencadeia o processo de corrosão, comprometendo a segurança e a durabilidade da estrutura.

Segundo Ferreira (2013), o fenômeno da carbonatação, consiste em um processo físico-químico entre o gás carbônico (CO_2) presente na atmosfera e os compostos da pasta de cimento, que tem como resultado principal a precipitação do carbonato de cálcio (CaCO_3). Na estrutura interna do concreto em que essa precipitação ocorre, o concreto se altera fisicamente e, também, do ponto de vista químico, há uma redução da alcalinidade.

A profundidade ou espessura de carbonatação, dá-se a partir da superfície e avança progressivamente para o interior do concreto, formando uma “frente de carbonatação”, que

separa duas zonas de pH muito distintas, uma com pH próximo a 13 e outra com pH próximo a 8. Esta é geralmente expressa em mm ou em cm e, que na maioria das vezes, trata-se de um valor médio, nem sempre muito uniforme em concretos contendo agregados graúdos com dimensão máxima característica acima de 19 mm (HELENE E CUNHA, 2001, p. 6).

A carbonatação do concreto é variável de acordo com a natureza de seus componentes, com o meio ambiente (rural, industrial ou urbano) e com as técnicas construtivas de transporte, lançamento, adensamento, cura, etc. Tendo a relação água/cimento um papel preponderante na permeabilidade dos gases. Como consequência, a profundidade de carbonatação é de difícil previsão e também variável dentro de amplos limites (HELENE, 1986, p. 9).

O fator água/cimento está intimamente relacionado com a quantidade e tamanho dos poros do concreto endurecido e com as propriedades mecânicas finais do material. Quanto maior a relação a/c, maior será a porosidade e a permeabilidade de um concreto, e conseqüentemente, mais facilmente o CO₂ poderá difundir-se através do concreto (MEHTA E MONTEIRO, 2002).

Segundo Oliveira (2017) em ambientes com altos índices de CO₂ a agressividade naquele meio será maior, portanto se torna superior o risco de deterioração da estrutura de concreto. E em locais referidos “especiais” como túneis, viadutos, garagens, o gás carbônico apresenta valores bem mais elevados que o normal, por serem ambientes confinados. Então nesses tipos de locais, o gás carbônico tem facilidade de se acumular, devido à ventilação insuficiente destas áreas.

De acordo com Molin et al. (2007), a umidade relativa afeta a carbonatação, sendo em condições de baixa umidade (inferiores a 50%) a carbonatação será menor, tendo em vista que não haverá água para dissolver o CO₂, e em condições de saturação de água dos poros, a carbonatação também será menor, porque a difusão de CO₂ é muito pequena.

Figueiredo (2005), afirma que os maiores graus de carbonatação ocorrem quando a umidade relativa no ambiente situa-se entre 50% e 60% e em umidades inferiores a 20% ou superiores a 95%, a carbonatação ocorre de forma lenta ou simplesmente não ocorre.

Segundo a NBR 6118:2014, para classe de agressividade que varie entre fraca e muito forte, o cobrimento para pilares ou vigas variam entre 25mm e 50mm respectivamente. Considera-se que enquanto a profundidade de carbonatação for menor que o cobrimento da armadura, a estrutura encontra-se em estado de segurança.

Ainda segundo a NBR 6118:2014, as medidas preventivas para evitar a carbonatação consistem em dificultar o ingresso dos agentes agressivos ao interior do concreto. O cobrimento das armaduras e o controle da fissuração minimizam este efeito, sendo recomendável um concreto de baixa porosidade.

Diante do exposto, a presente pesquisa teve como objetivo analisar a profundidade da carbonatação nos pilares de garagem em diferentes obras já concluídas com idades de variadas, sendo que todas estão localizadas na região de Criciúma.

O processo consistiu em medir a espessura desta parte carbonatada através de indicador químico, solução de fenolftaleína, que permite a visualização devido a troca de cor do concreto, incolor para parte carbonatada e variação entre rosa e vermelho-carmim para parte não carbonatada. Por fim, os valores foram comparados com os da espessura carbonatada obtida através de curvas de correlação entre a resistência do concreto e idade da estrutura, tanto à luz das recomendações da NBR 6118:2014 – Projeto de estrutura de concreto – Procedimento, e também outras literaturas.

Além do ensaio relacionado a carbonatação foi realizado o ensaio da dureza superficial do concreto, esclerometria, para determinação do índice esclerométrico que fornece elementos para a avaliação da qualidade do concreto endurecido e também ensaio de difração de raios X para verificar as fases cristalinas presentes nos diferentes concretos, e posteriormente poder correlacionar com a resistência.

Materiais e Métodos

Para determinação da espessura de carbonatação, dureza e fases cristalinas do concreto foram realizados ensaios in loco em obras de diferentes idades. A Tabela 1 apresenta a denominação das obras, a região de análise e suas idades.

Tabela 1. Obras analisadas

Obra	Local de análise	Idade
Obra 37	Pilar de garagem	37 anos
Obra 9	Pilar de garagem	9 anos
Obra 3	Pilar de garagem	3 anos
Obra 1	Pilar de garagem	1 ano

Na verificação da espessura de carbonatação, seguindo as recomendações da norma DIN EN 14630 (2007), utilizou-se indicador de ph, que consiste em uma mistura de 1g de fenolftaleína dissolvida em 50g álcool etílico diluídos em 50g de água, formando uma solução que quando aspergida no concreto torna-se incolor em ph inferior a 8,3 que indica a parte carbonatada e rosa ou vermelho-carmim para valores superiores a 8,3 que indicam a parte não carbonatada, sendo que o ph normal do concreto fica entre 12,5 a 14.

Primeiramente foram feitos furos de profundidade de aproximadamente 2cm utilizando furadeira de impacto com broca na espessura de 20mm. Todo o pó foi coletado por um coletor adaptado ao equipamento e o restante foi removido com a ajuda de um pincel de cerdas macias.

Após a limpeza do furo foi aspergida a solução de fenolftaleína e verificada a espessura carbonatada, conforme as figuras 1 e 2.

Após a verificação das espessuras, foi realizada a comparação com a curva de previsibilidade de carbonatação de Helene (2004) e também a previsibilidade da espessura carbonatada ao longo do tempo de acordo com a equação apresentada por Andrade (1992), ambos em função do fck e do cobrimento indicado de acordo com a classe de agressividade das obras.

Utilizou-se os dados fornecidos pela NBR 6118:2014 para a obtenção da classe de agressividade e do cobrimento mínimo exigido para os ambientes em que foram realizados os ensaios.

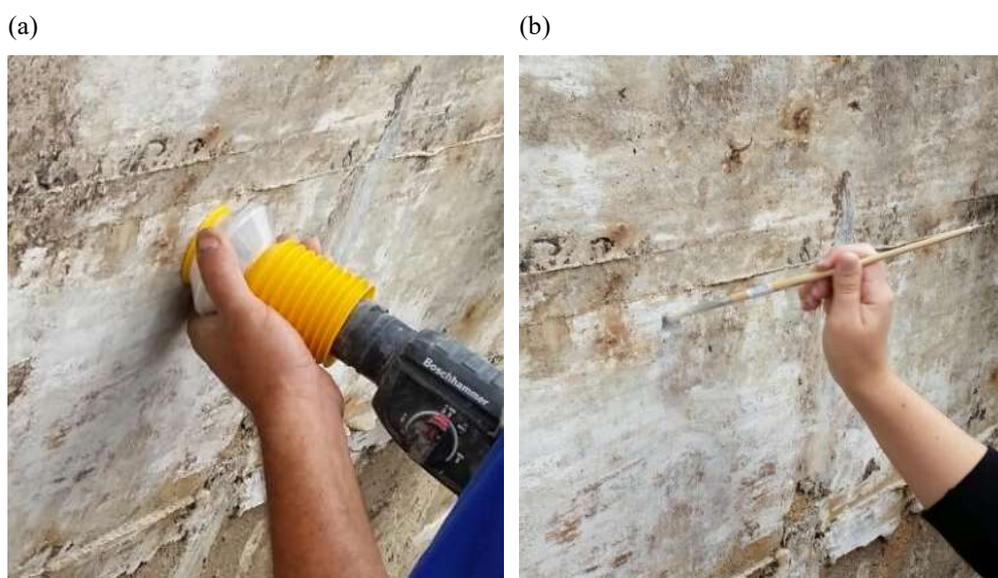


Figura 1. Etapas do ensaio de carbonatação: (a) Furação e (b) Limpeza



Figura 2. Etapas do ensaio de carbonatação: (a) Aspersão e (b) Medição

Após a realização do ensaio de para determinação da profundidade de carbonatação, deu-se início ao ensaio de esclerometria que consiste na identificação da dureza superficial do concreto obtida através do esclerômetro de Shimidt mostrado na figura 3. Trata-se de um ensaio não destrutivo e normatizado pela NBR 7584:2012.

O funcionamento consiste em uma massa martelo que, impulsionada por uma mola, se choca através de uma haste, com ponta em forma de calota esférica, com a área do ensaio e então fornece o índice esclerométrico (IE) do concreto (dureza) conforme figura 6.

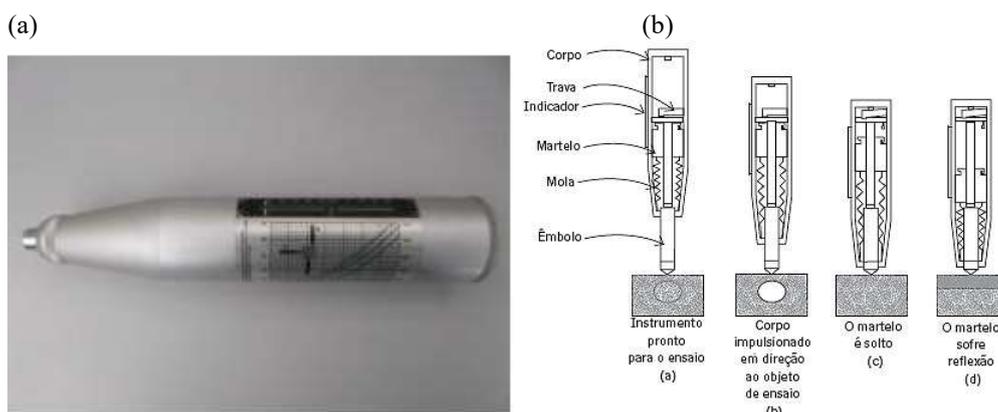


Figura 3. Esclerômetro de reflexão: (a) Esclerômetro de Schmidt, (b) Sequência de execução (Fonte: Revista Técnica, 2009)

Utilizou-se um gabarito (figura 4) para marcação dos pontos onde o ensaio foi realizado, obtendo assim o IE (índice esclerométrico) de cada ponto, e após a obtenção dos valores, foi realizado o cálculo da média aritmética dos 16 valores, sendo que todo IE individual que estiver

a mais de 10% do valor mediano obtido, foi desprezado e calculada uma nova média aritmética com no mínimo 5 valores.

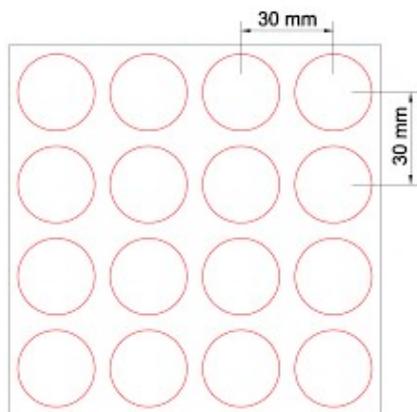


Figura 4. Gabarito (Fonte: NBR 7584:2012)

Segundo Zanardo, (2015), quanto mais dura for a superfície do concreto ensaiado, menor é a deformação provocada na área de ensaio, aumentando a parcela da reflexão, oferecendo índices de reflexão maiores.

Os índices obtidos foram correlacionados com a resistência mecânica do concreto, sendo que este ensaio foi realizado nos mesmos elementos estruturais analisados no ensaio de carbonatação.

Durante a furação dos elementos estruturais para a realização do ensaio de carbonatação, foi coletado todo o pó resultante de cada furo, sendo este material utilizado no ensaio de DRX (difratometria de raios X) para obter as principais fases cristalinas encontrados na amostra do concreto, através dos picos gerados na difração dos raios produzidos pelos átomos característicos do mineral.

O ensaio de DRX foi realizado no equipamento SHIMADZU LAB X modelo XRD-6000 que tem ângulo de varredura de 3 a 80° em 2 θ e velocidade de 2°/min, localizado no Laboratório de Caracterização de Materiais do IDT/UNESC.

Resultados e Discussões

Nesta seção serão apresentados os resultados provenientes dos ensaios de esclerometria, profundidade de carbonatação, e difração de raios-x, a fim de demonstrar os componentes

presentes nas amostras de concreto, além das correlações entre eles e comparações com a literatura previamente citada.

Quanto ao ensaio de esclerometria, a NBR 7584:2012 cita uma relação entre o concreto que sofreu carbonatação e o IE obtido, sendo que nestes casos deve-se considerar que os valores de resistência podem estar superestimados em cerca de 50%, porém a mesma não traz dados mais específicos como a idade da obra e/ou a profundidade de carbonatação que deve ser considerada.

A tabela 2 exhibe os resultados obtidos nos ensaios, assim como as médias citadas onde foi demonstrado também a redução de 50% das médias de IE obtidas.

Tabela 2. Índices esclerométricos e médias obtidas

Pontos	Idade da Obra (Anos)			
	1	3	9	37
	Valores de IE			
1	24*	25*	36*	24*
2	26*	27	37*	24*
3	28*	27	38*	26
4	28*	27	38*	26
5	28*	27	40	26
6	28*	28	42	27
7	32	28	42	27
8	32	28	42	27
9	32	28	42	27
10	34	29	44	28
11	34	29	44	28
12	34	30	45	28
13	34	30	46	28
14	34	30	50*	28
15	34	31	50*	29
16	38*	34*	50*	30*
Média Total	33,33	28,50	43,00	27,31
Tolerância (10%)	28,13-34,38	25,76-31,49	38,59-47,16	24,56-29,77
Média	33,33	28,50	43,00	27,31
Média Corrigida	16,67	14,25	21,50	13,65

*Índices maiores que a tolerância de 10% que foram desconsiderados no cálculo da Média.

Para a estimativa da resistência a compressão (f_c estimado e f_c estimando considerando a carbonatação) foi realizada a correlação dos índices médios (IE médio e IE médio corrigido) com a curva indicada no equipamento através da Eq.1. Os resultados, estão demonstrados na figura 5.

$$y = 1,6853x - 26,912$$

em que:

y = valor de f_c estimado (em MPa);

x = valor do IE médio corrigido.

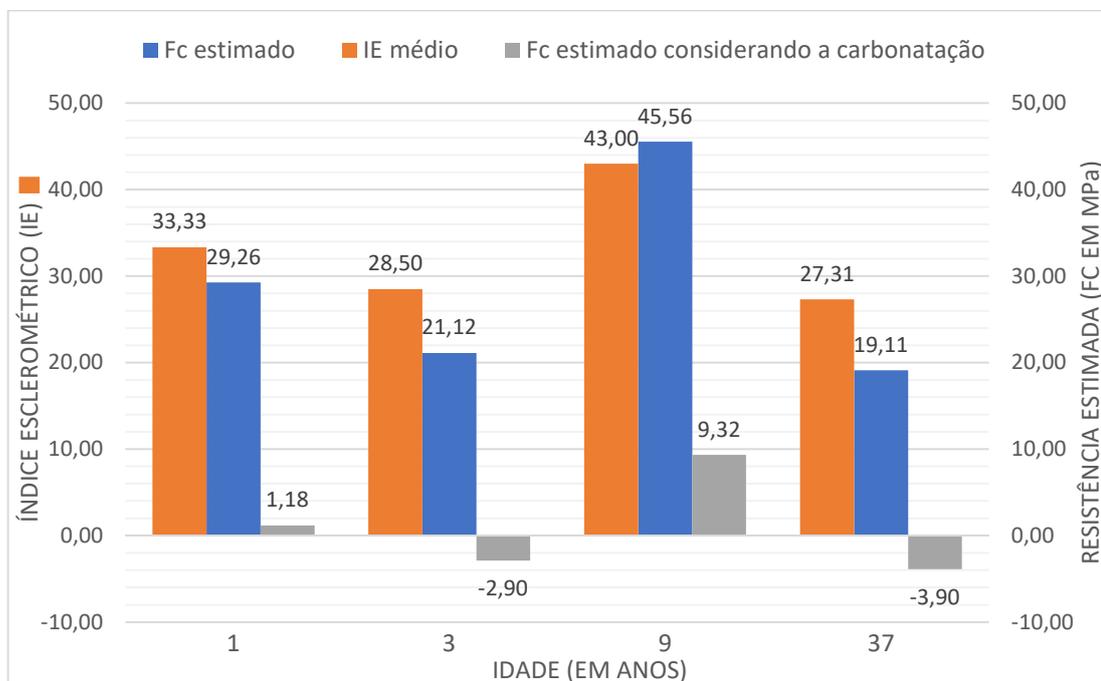


Figura 5. Valores de f_{ck} resultantes da Eq.1

A NBR 7584:2012 diz que a influência da idade, em relação a dureza obtida na condição normalizada (28 dias), ocorre devido a fatores como a diferença de cura, carbonatação e outros.

Quando analisados os valores de f_{ck} estimados que consideram o fator carbonatação, ou seja, que tiveram seus índices esclerométricos reduzidos em 50%, os resultados são incompatíveis com a resistência a compressão usualmente utilizada em estruturas de concreto. Sendo que a NBR 8953:2015 apresenta uma resistência mínima de 20 MPa para concretos estruturais. Não se pode dizer que uma estrutura possui uma resistência de 1,18 MPa, ou até negativa, que poderia ser considerada nula, como foi obtido através da Eq.1. Observa-se então, que a norma está sendo conservadora e objetivando a segurança ao sugerir esta redução.

Uma pesquisa foi feita a fim de correlacionar as resistências estimadas entre a equação do aparelho e as equações de diferentes autores, considerando os índices esclerométricos encontrados. Com os resultados obteve-se a resistência média estimada e o desvio padrão para cada obra analisada, de acordo com a tabela 3.

Tabela 3. Correlação das resistências estimadas de diferentes autores

Autor	Equação	IE Obra 37	IE Obra 9	IE Obra 3	IE Obra 1
		27,31	43	28,5	33,33
Fck Estimado					
Curva do Esclerômetro	$y = 1,6853x - 26,912$	19,11	45,56	21,12	29,26
Machado (2005)	$y = 0,026IE^{2,044}$	22,43	56,73	24,47	33,70
Isaia (2005)	$y = 5,1282e^{0,0526x}$	21,57	49,23	22,96	29,60
Silva (2006)	$y = 2,61e^{0,07x}$	17,66	52,95	19,19	26,91
Média		20,19	51,12	21,94	29,87
Desvio Padrão		2,20	4,80	2,29	2,82

* Nas equações, y refere-se ao valor de f_{ck} e x ao IE médio.

Observou-se uma variação entre os valores resultantes de cada equação pois cada autor leva em conta diferentes composições do concreto, como o tipo de cimento e os agregados. Machado (2005) afirma que sempre que houver mudanças dos materiais envolvidos na confecção do concreto, uma nova curva de correlação deverá ser estabelecida.

Os ensaios para a determinação da profundidade de carbonatação, demonstrados nas figuras 6 e 7, foram realizados em pilares de garagem de diferentes edificações conforme tabela 4, onde também estão indicados os valores da resistência a compressão estimados obtidos no ensaio de esclerometria.

Tabela 4. Profundidade de carbonatação

Obra	Local de análise	Idade	Resistência f_c	Profundidade Carbonatada
Obra 37	Pilar de garagem	37 anos	19MPa	1,30cm
Obra 9	Pilar de garagem	9 anos	46MPa	1,00cm
Obra 3	Pilar de garagem	3 anos	21MPa	1,10cm
Obra 1	Pilar de garagem	1 ano	29MPa	0,50cm

Tendo os valores da profundidade carbonatada, foi possível observar que não há uma similaridade entre esta medida, a idade de cada obra e sua resistência.

A NBR 7584:2012 afirma que o método esclerométrico fornece informações a respeito da dureza superficial do concreto em 20mm de profundidade. Observa-se que todos os valores obtidos quanto a profundidade de carbonatação estão localizados na faixa de medição do esclerômetro, sendo assim, a camada superficial deixou de ser a representativa do concreto no interior da peça.

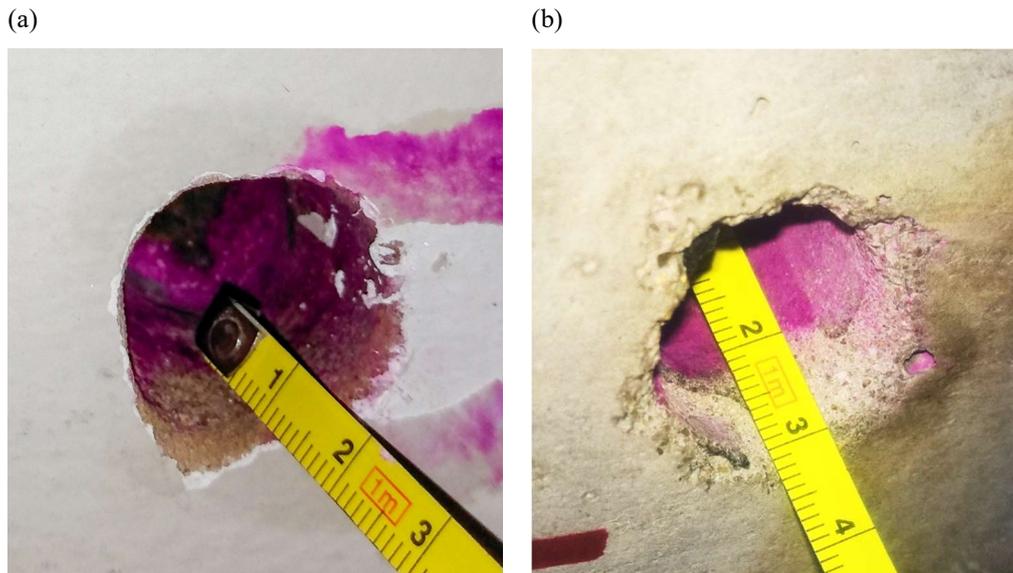


Figura 6. Profundidade carbonatada: (a) Obra 1 – 37 anos, (b) Obra 2 – 9 anos

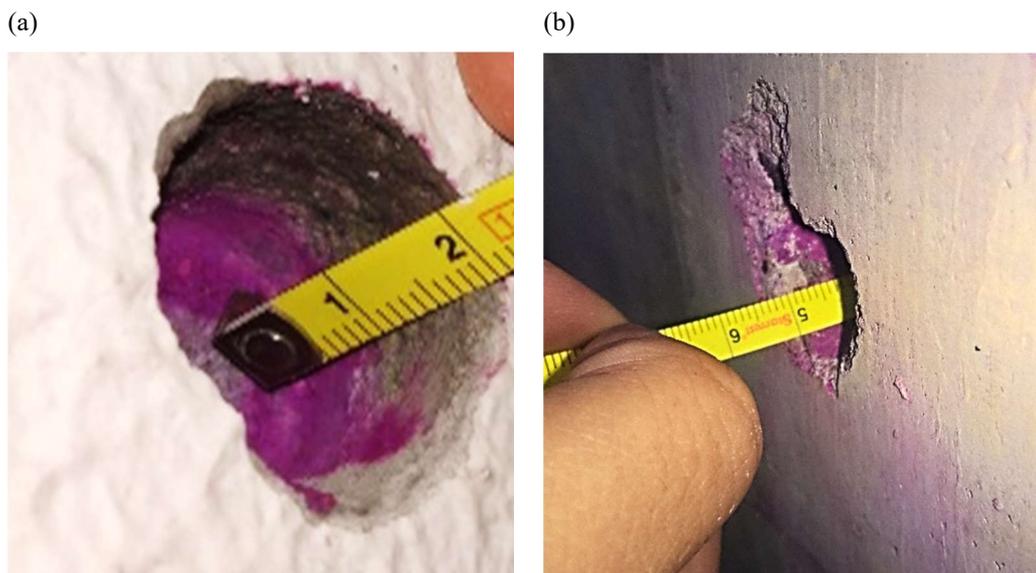


Figura 7. Profundidade carbonatada: (a) Obra 3 – 3 anos, (b) Obra 4 – 1 ano

A principal explicação para a diferença entre as profundidades de carbonatação encontradas é que, como cita Helene (1986), as profundidades de carbonatação aumentam, inicialmente, com grande rapidez, prosseguindo mais lentamente e tendendo a uma profundidade máxima. Esta tendência ao estacionamento do fenômeno pode ser explicada pela hidratação crescente do cimento e a ação dos produtos de transformação que também colmatam os poros superficiais, dificultando o acesso de CO₂ presente no ar, ao interior do concreto.

Segundo Possan (2010), vários outros fatores interferem na velocidade de propagação da carbonatação. Esses estão diretamente relacionados aos materiais de construção (tipo de cimento, resistência do concreto, permeabilidade, entre outros), e as condições ambientais em que a estrutura está inserida (temperatura, umidade relativa, ventos, concentração de agentes agressivos, entre outros).

Possan (2010) afirma também que a resistência do concreto está proporcionalmente ligada ao tamanho e quantidade dos poros do concreto endurecido. Quanto maior for a relação a/c, menor será a resistência, e maior será a permeabilidade facilitando a penetração do CO₂ para o interior do material. Com a ação da carbonatação estes poros são reduzidos e conseqüentemente isto aumenta a resistência superficial do concreto. Portanto, as resistências estimadas encontradas através do ensaio de esclerometria, não podem ser consideradas as resistências do concreto quando adensado inicialmente, porém, estes foram os valores utilizados para as correlações e previsões realizadas neste trabalho.

Andrade (1992), relaciona de maneira geral através da Eq.2, a espessura da capa carbonatada e a idade da estrutura através da constante “K”, que tem como objetivo prever a velocidade de avanço da frente de carbonatação, e portanto o tempo que tardará em chegar até a armadura. Sendo assim, com base nas afirmações da autora, todas as profundidades de carbonatação obtidas através dos ensaios, foram inseridas na Eq.2 afim de prever um valor para a constante “K” de cada obra.

Por fim, os valores de “K” foram relacionados com a espessura de cobrimento nominal de 30 mm proposta pela NBR 6118:2014 para ambientes com classe de agressividade II (ambientes urbanos), com o objetivo de obter uma previsão hipotética de quanto tempo levaria para que a carbonatação atinja toda esta espessura ($X = 30\text{mm}$) e conseqüentemente despassive a armadura. A tabela 5 traz os resultados obtidos.

Segue a Eq. 2 de Andrade (1992).

$$X = K \times \sqrt{t}$$

em que:

X = capa carbonatada em mm;

t = tempo em anos ou meses;

K = constante.

Tabela 5. Relação entre a constante “K” e o cobrimento nominal normatizado

Obra	Idade	Profundidade Carbonatada	Constante “K”	Tempo previsto até a despassivação
Obra 37	37 anos	1,30cm	2,14	197,00 anos
Obra 9	9 anos	1,00cm	3,33	81,00 anos
Obra 3	3 anos	1,10cm	6,35	22,00 anos
Obra 1	1 ano	0,50cm	5,00	36,00 anos

Foi feita também a comparação das profundidades de carbonatação encontradas com o gráfico de previsibilidade de Helene (2004), conforme a figura 8 e Tabela 6.

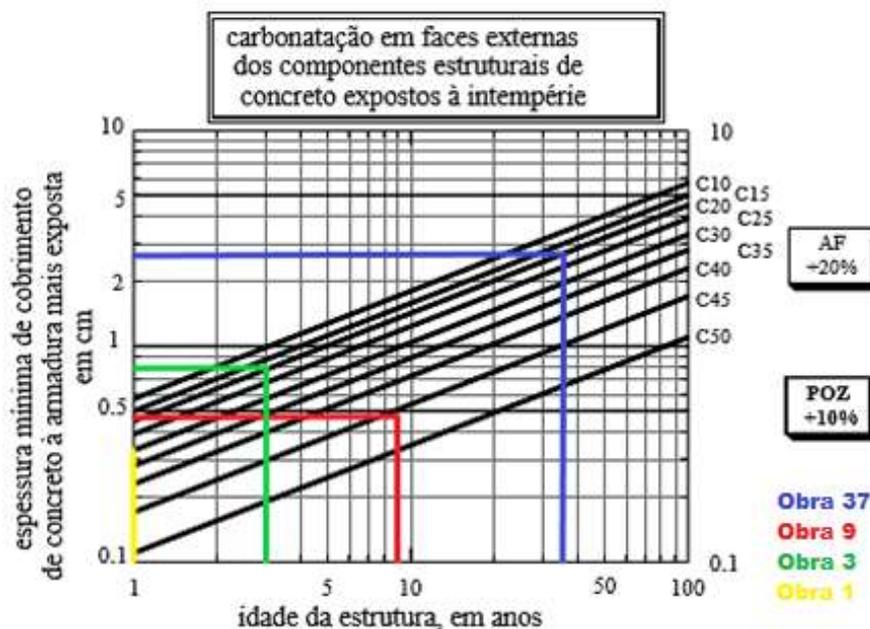


Figura 8. Indicação de dados coletados no gráfico de Helene Fonte: Helene (2004)

Analisando os dados obtidos, observou-se que com exceção da obra mais antiga, de 37 anos, todas as profundidades medidas foram maiores do que prevê o autor. Para ambos os casos, isto provavelmente se dá devido a qualidade dos componentes do concreto, a relação a/c, o grau de exposição da estrutura ao CO_2 , entre outros.

Tabela 6. Relação entre a profundidade de ensaio e a profundidade prevista por Helene.

Obra	Idade	Profundidade Carbonatada	Profundidade Prevista por Helene
Obra 37	37 anos	1,30cm	2,69cm
Obra 9	9 anos	1,00cm	0,49cm
Obra 3	3 anos	1,10cm	0,79cm
Obra 1	1 ano	0,50cm	0,33cm

Partindo do mesmo princípio da análise com a Eq.2 de Andrade (1992), também utilizou-se a curva de Helene para a obtenção da previsão do tempo até a despassivação da armadura. Foi considerada a espessura de cobrimento nominal de 30mm proposta pela NBR 6118:2014, a qual foi relacionada, através da curva de Helene, com a resistência estimada, e assim foram obtidos os tempos estimados para que a carbonatação atinja os 30mm de cobrimento. Os resultados são apresentados na figura 9 e tabela 7.

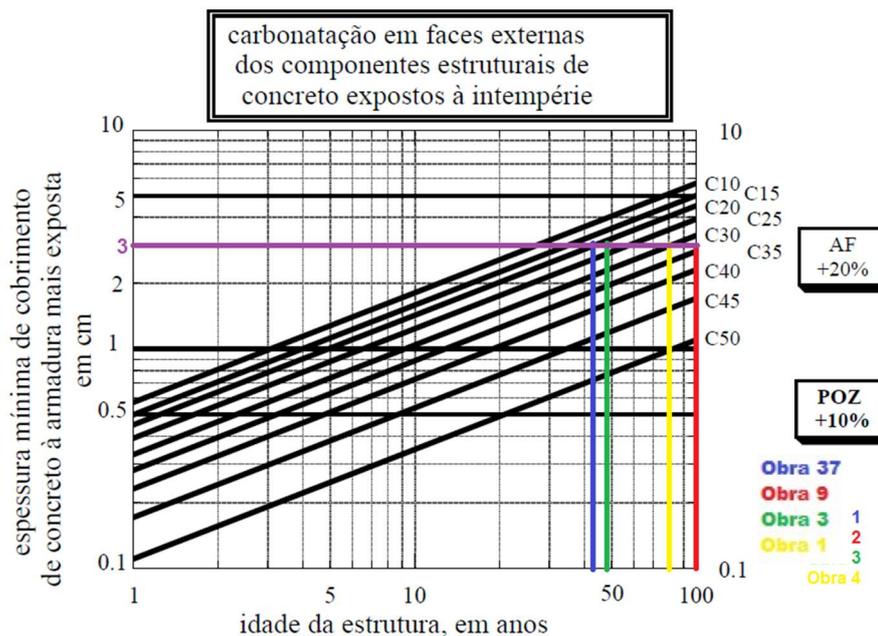


Figura 9. Previsibilidade de Helene para o cobrimento normalizado.

Analisando os resultados de tempo para a total carbonatação do cobrimento nominal de 30mm e consequentemente a despassivação da armadura, constatou-se uma grande diferença entre a previsão de Andrade e Helene. Isso ocorre pois cada autor leva em consideração diferentes propriedades do concreto.

Tabela 7. Relação entre a curva de previsibilidade de Helene e o cobrimento nominal normatizado

Obra	Idade	Resistência f_c	Profundidade Carbonatada	Tempo previsto até a despassivação
Obra 1	37 anos	19MPa	3,00cm	43,00 anos
Obra 2	9 anos	46MPa	3,00cm	100,00 anos
Obra 3	3 anos	21MPa	3,00cm	49,00 anos
Obra 4	1 ano	29MPa	3,00cm	80,00 anos

Helene relaciona o f_{ck} , com o cobrimento e a idade (em anos), e de acordo com suas previsões, quanto maior a resistência, mais tempo para a carbonatação difundir-se no concreto.

A difratometria de raios-X permite identificar as fases cristalinas presentes em cada amostra. (KULAKOWSKI, 2002)

A comprovação da carbonatação pode ser feita através da difração de raios-X, análise térmica diferencial e termogravimetria, onde pode-se observar a presença de calcita ou aragonita. (PILOTO, 2006)

As figuras 10 e 11 trazem os resultados obtidos para cada obra. A escala horizontal (ângulo de difração) fornece o espaçamento do arranjo cristalino, e a escala vertical (altura do pico) fornece a intensidade do raio difratado.

Em todas as amostras foram observadas a presença de Óxido de Silício (Quartzo – SiO_2) e Carbonato de Cálcio (Calcita - CaCO_3).

Também foram observadas a existência de Silicato de Magnésio, Ferro e Cálcio (Augita – $\text{Ca}(\text{Fe},\text{Mg})\text{Si}_2\text{O}_6$), e Óxido de Ferro (Magnetita) que segundo Mehta e Monteiro (2008), são impurezas encontradas no cimento.

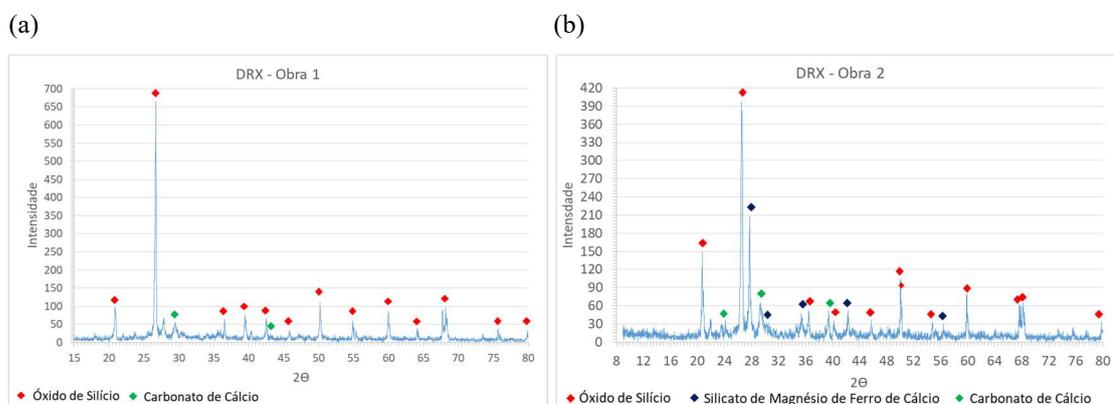


Figura 10. Difração de raios-x: Amostras retiradas (a) Obra 1 e (b) Obra 2

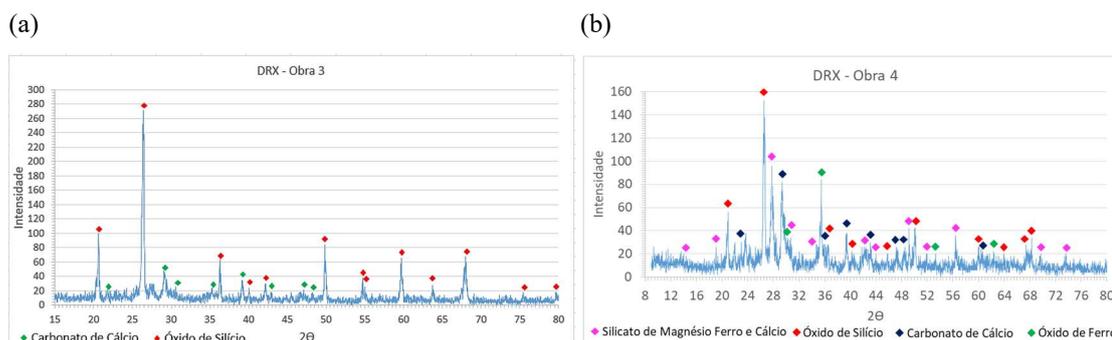


Figura 11. Difração de raios-x: Amostras retiradas (a) Obra 3 e (b) Obra 4

O Quartzo (SiO_2) é um dos componentes responsáveis pela resistência do concreto e também é uma das matérias primas utilizadas na fabricação do clínquer. (MEHTA E MONTEIRO, 2008)

A Calcita (CaCO_3), é o componente que causa a carbonatação quando em contato com a água. Segundo Helene (1986), nas superfícies expostas das estruturas de concreto, a alta alcalinidade, obtida principalmente à custa da presença do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) liberado das reações de hidratação, pode ser reduzida com o tempo. Essa redução ocorre, essencialmente, pela ação do CO_2 presente na atmosfera. Esse processo, denominado carbonatação do concreto, ocorre lentamente, segundo a reação principal $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 = \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$.

Conclusões

Esta pesquisa foi realizada com o intuito de verificar o comportamento da frente de carbonatação em pilares de concreto armado localizados em quatro diferentes obras no município de Criciúma/SC. Como ensaios complementares, foram estimadas as resistências a compressão através da esclerometria e feito o ensaio de difração de raios-x para determinar a microestrutura do concreto de cada pilar.

Quanto aos resultados obtidos através do esclerômetro, observou-se uma grande variação entre as resistências a compressão estimadas de cada obra.

No ensaio de profundidade carbonatação, os resultados vão de 0,5cm a 1,3cm, sendo que o último se deu na obra mais antiga e o primeiro em outra recentemente construída. Neste intervalo se tem profundidades muito próximas ao valor máximo obtido que apresentam porém, uma diferença considerável de idade, aproximadamente 20 anos, ou seja, não existe

similaridade nas profundidades em função de suas idades devido a velocidade que a carbonatação se propaga, sendo rápida nos primeiros anos e diminuindo gradativamente no decorrer dos próximos anos.

Além da determinação da profundidade de carbonatação através do indicador de ph (fenolftaleína), foi determinada também a presença deste fenômeno através do ensaio de difração de raios-x (DRX) que apresentou as fases cristalinas da microestrutura do concreto de cada obra analisada.

Frente aos resultados, pode-se concluir que a carbonatação está diretamente ligada com as características de cada concreto analisado, como componentes utilizados na mistura e grau de exposição aos gases agressivos, e não somente a sua idade. O ensaio de DRX comprova esta teoria, pois apresentadas as fases cristalinas do concreto, foi possível identificar a carbonatação, além das características ligadas a resistência.

A porosidade (relação a/c), por exemplo, é uma destas características determinantes, pois é ela que permite ou não a difusão da frente de fenômeno no concreto. Conforme esta avança, diminui os poros, aumentando a densidade e também a resistência superficial do concreto, fator que possui grande influência nos resultados obtidos nos ensaios de esclerometria para determinação dos índices esclerométricos e a resistência estimada de cada obra.

Referências bibliográficas

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7584: concreto endurecido: avaliação da dureza superficial pelo esclerômetro de reflexão**. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: projeto de estruturas de concreto: procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ANDRADE, Carmen. (1^oed.) **Manual para diagnóstico de Obras Deterioradas por Corrosão de Armaduras**. Editora: Pini, São Paulo, 1992, 108p.

DIN - DEUTSCHES INSTITUT FUR NORMUNG. **DIN EN 14630: Products and systems for the protection and repair of concrete, structures – Test methods – determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method**, English version, DIN. Berlin, 2007. 10 p.

FERREIRA, MURILLO B. **Estudo da carbonatação natural de concretos com diferentes adições minerais após 10 anos de exposição**. 2013. 197. Dissertação, Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, Goiás.

FIGUEIREDO, ENIO PAZINI. **Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto**. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações, IBRACON, Cap. 27, p.829 – 855, V. 2, ed. Geraldo C. Isaia, São Paulo. 2005.

GOMES, Nivaldo A. **Estruturas de Concreto Armado em Ambiente Urbano: Avaliação da Carbonatação à Luz das recomendações da NBR 6118:2003**. 2006. 99. Dissertação, Pós Graduação em Construção Civil, Univ. Federal de São Carlos, São Carlos, São Paulo.

HELENE, Paulo. (1ªed.) **Corrosão em Armaduras para Concreto Armado**. Editora: Pini, São Paulo, 1986, 46p.

HELENE, P.; CUNHA, A. C. Q. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação**. 2001, São Paulo. 17. Boletim Técnico, Escola Politécnica da USP, São Paulo.

HELENE, Paulo. **A Nova ABNT NBR 6118 e a Vida Útil das Estruturas de Concreto**. In: **Seminário de Patologia das Construções**. 2004, Porto Alegre. Novos Materiais e Tecnologias Emergentes, LEME, UFRGS, 2004. v. 1. p. 1-30

KULAKOWSKI, M. P. **Contribuição ao Estudo da Carbonatação em Concretos e Argamassas Compostos com Adição de Sílica Ativa**. 199 f. 2002. Porto Alegre. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

LAPA, José S. **Patologia, Recuperação e Reparo da Estruturas de Concreto**. 2008. 56. Monografia Especialização em Construção Civil, Univ. Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais.

MACHADO, M. D.; SHEHATA, L. C. D.; SHEHATA, I. A. E. M. **Curvas de Correlação para Caracterizar Concretos Usados no Rio de Janeiro por Meio de Ensaio Não Destrutivos**. Revista IBRACON de estruturas e materiais. Volume 2, Junho 2009, páginas 100 a 123.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MOLIN, D.C.C.D.; PAULETTI, C.; POSSAN, E. **Carbonatação acelerada: Estado da arte das pesquisas no Brasil**. Ambiente construído, Porto Alegre, v.7, nº 4, p.7-20 out/dez, 2007.

OLIVEIRA, Tatiane 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. Monografia, Curso de Tecnologia da Construção Civil com habilitação em Edifícios, Universidade Regional do Cariri, Juazeiro do Norte, Ceará.

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

SILVA, Daiane S. S. **Avaliação estrutural do edifício Jigue da antiga indústria carboquímica catarinense, visando sua reutilização para uma nova ocupação 2006**. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação) –Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC. Criciúma-SC, 2006.

SILVA, Valdirene. **Ação da Carbonatação em Vigas de Concreto Armado em Serviço, Construídas em Escala Natural e Redizada**. 2007. 281. Tese (Doutorado) Curso de Engenharia de Estruturas, Univ. de São Paulo, São Paulo, São Paulo.

ZANARDO M. B. **Desenvolvimento de curva de calibração do ensaio de esclerometria para o concreto utilizado por uma construtora de Passo Fundo - RS.** Revista Especialize On-line IPOG, Goiânia, v. 01, n. 10, 2015. ISSN 2179-5568, texto digital. Acesso em 15/04/2019. Disponível em: <https://www.ipog.edu.br/revista-especialize-online/edicao-n-10-2015>