

Avaliação da frente carbonatada em amostras de concreto submetidas a ciclos não regulares de umidificação-secagem do ar.

A. Guzmán^{1*} , S. Acosta¹ , C. Dagne¹ 

* Autor de Contato: mguzman@frm.utn.edu.ar

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i1.732>

Recebido: 04/03/2024 | Correções recebidas: 06/11/2024 | Aceito: 13/12/2024 | Publicado: 01/01/2025

RESUMO

O objetivo desta pesquisa é avaliar experimentalmente como determinadas características dos concretos em estudo influenciam o fenômeno da carbonatação. Para isso, o concreto é elaborado com três relações a/c, dois tipos de cimento e com incorporação de aditivo hidrorrepelente, sendo posteriormente exposto à umidificação-secagem do ar por um período de 6 anos. A partir dos resultados obtidos, observou-se a correspondência do avanço da frente carbonática com a resistência à tração, bem como sua dependência das características de projeto e das particularidades da condição de exposição.

Palavras-chave: concreto reforçado; carbonatação; corrosão; durabilidade.

Citar como: Guzmán, A., Acosta, S., Dagne, C. (2025), "Avaliação da frente carbonatada em amostras de concreto submetidas a ciclos não regulares de umidificação-secagem do ar.", Revista ALCONPAT, 15 (1), pp. 35 – 49, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v15i1.732>

¹ CeReDeTeC (Centro Regional de Desenvollos Tecnológicos para la Construcción, Sismología y la Ingeniería Sísmica), Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional, Mendoza Argentina.

Contribuição de cada autor

Neste trabalho, todos os autores contribuíram proporcionalmente em todas as atividades. As atividades mencionadas incluem: ideia original, fundamentação, execução de testes, coleta de dados, discussão de resultados e redação do trabalho..

Licença Creative Commons

Copyright (2025) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2025, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2025.

Evaluation of the carbonated front in concrete samples subjected to non-regular wetting-air drying cycles.

ABSTRACT

The objective of this research is to experimentally evaluate how certain characteristics of the concretes under study influence the carbonation phenomenon. To do this, concretes are prepared with three w/c ratios, two types of cement, and with the incorporation of a water-repellent additive, then exposed to air-drying and wetting for a period of 6 years. From the results obtained, the correspondence of the advance of the carbonate front with the tensile strength was observed, as well as its dependence on the design characteristics and the particularities of the exposure condition.

Keywords: reinforced concrete; carbonation; corrosion; durability.

Evaluación del frente carbonatado en muestras de hormigón sujetas a ciclos no regulares de humedecimiento-secado al aire.

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es evaluar experimentalmente cómo influyen ciertas características que presentan los hormigones de estudio en el fenómeno de carbonatación. Para ello se elaboran hormigones con tres relaciones a/c, dos tipos de cemento, y con la incorporación de un aditivo hidrófugo, expuestos luego al humedecimiento-secado al aire durante un periodo de 6 años. De los resultados obtenidos se observó la correspondencia del avance del frente carbonatado con la resistencia a tracción, así como su dependencia con las características de diseño y con las particularidades de la condición de exposición.

Palabras clave: hormigón armado; carbonatación; corrosión; durabilidad.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A degradação das estruturas de betão armado associada aos mecanismos de corrosão da armadura revela-se muito significativa. Isso acarreta altos custos para o reparo das estruturas afetadas. Estudos realizados na região, por exemplo, na Argentina (Di Maio et al., 2009) e no Brasil (Dal Molin, 1988), estabeleceram uma alta incidência da degradação de estruturas associadas ao fenômeno da corrosão sobre outros mecanismos de deterioração. Mas, por natureza, o concreto tem um pH alto que permite que as armaduras embutidas sejam passivadas nessas condições, protegendo-as do desenvolvimento de processos corrosivos. O avanço da frente de carbonatação (por penetração de CO₂) leva à perda de alcalinidade no concreto, produzindo assim a despassivação das armaduras e permitindo assim o possível desenvolvimento de corrosão no aço, o que leva à degradação do concreto. Essa situação se deve ao fato de que, quando uma barra de aço é corroída, o volume resultante é aproximadamente seis vezes maior do que o ferro que substitui quando a barra não está corroída (Marcotte, 2001). Isso causa altas tensões de tração na interface armadura/concreto, o que leva, entre outras manifestações, a fissuras e perda do concreto de cobertura. A Figura 1 mostra os produtos resultantes da corrosão do ferro.

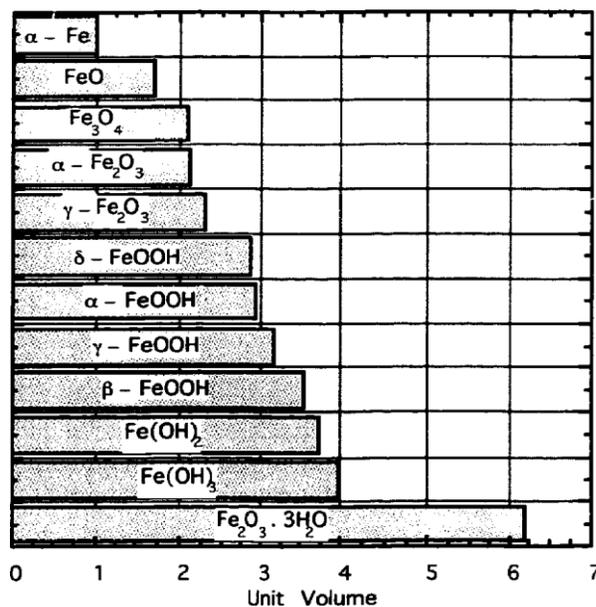


Figura 1: Produtos resultantes da corrosão do ferro (Marcotte, 2001).

É por isso que o concreto do revestimento de reforço desempenha um papel fundamental, sendo de vital importância para mitigar o fenômeno da corrosão. Isso oferece às barras embutidas uma proteção dupla. Por um lado, acaba sendo uma barreira física que os separa do meio ambiente e, por outro lado, o líquido contido na solução porosa do concreto possui alta alcalinidade (pH ~ 12 a 13), sendo um eletrólito capaz de formar uma camada protetora de óxido ao redor das armaduras, conhecida como camada passivante, que é compacto e invisível, aderindo fortemente a eles (Irassar, 2001). Mas quando a alcalinidade natural do concreto é comprometida devido ao fenômeno de carbonatação, as armaduras são despassivadas de forma homogênea em toda a sua superfície, levando à corrosão generalizada.

No entanto, o avanço da frente carbonática é sensível ao microclima ao qual a estrutura está exposta. Castro et al. (2000) avaliaram a carbonatação do concreto no Golfo do México, apontando a importância de considerar nesta avaliação os diferentes microambientes marinhos que podem ser constituídos, por exemplo, em decorrência da distância da costa. Este último afeta o progresso da

carbonatação e, conseqüentemente, não é lógico estabelecer recomendações gerais com base na exposição de espécimes em um único microambiente.

Nesse sentido, o teor de umidade do concreto determina a velocidade com que o CO₂ penetra. Nesse sentido, Houst e Wittmann (2002) em suas pesquisas conseguiram estabelecer que a profundidade da frente carbonática era maior quando as superfícies das argamassas expostas ao exterior eram protegidas da chuva, favorecendo a difusão do CO₂. Resultados semelhantes foram obtidos por Priano e Señas (2013) quando avaliaram a carbonatação de estruturas de concreto localizadas em ambientes urbanos e rurais, estabelecendo que a deterioração de um elemento de concreto armado depende do microclima de exposição, uma vez que este pode variar para diferentes áreas de um mesmo elemento, e com ele, da umidade disponível. Por outro lado, outro fator condicionante para o avanço do fenômeno da carbonatação se deve às suas características de design. Uma maior relação a/c contribui para uma maior profundidade da frente de carbonatação (Rao e Meena, 2017), enquanto o uso de cimentos com adições minerais pode fazer com que a resistência a esse fenômeno diminua (Leemann et al., 2015).

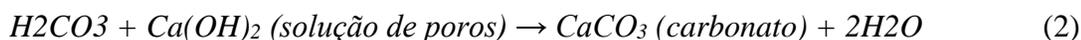
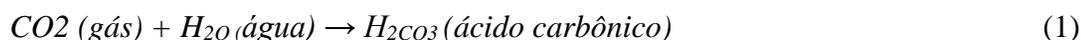
Esta pesquisa aborda a avaliação qualitativa do fenômeno de carbonatação a partir de medidas obtidas em corpos de prova de concreto, e ao mesmo tempo, sua correspondência com a aparência superficial de uma barra de aço embutida no momento da moldagem de cada um destes. O objetivo é avaliar o efeito sobre o avanço da frente carbonática que possui: i) a qualidade do concreto, inferida a partir da avaliação da resistência à tração por compressão diametral, assumindo a relação desta com a resistência à compressão; ii) o tipo de cimento utilizado; iii) a incorporação de um aditivo repelente à água; e iv) a condição particular de exposição ambiental a que as amostras foram submetidas por um período ininterrupto de 6 anos. Essa condição de exposição correspondeu à de ciclos não regulares de umedecimento-secagem ao ar. O tempo de exposição a cada condição particular não foi uma variável considerada no estudo. Ressalta-se que aproximadamente a cada dois meses o nível de água nos recipientes onde as amostras estavam alojadas era renovado.

Deve-se esclarecer que esse desenvolvimento é a continuidade de pesquisas anteriores (Guzmán et al., 2018; Guzmán et al., 2019; Guzmán, 2023), em que foram avaliadas a resistividade elétrica do concreto e o potencial de corrosão desenvolvido nesses casos.

2. CARBONATAÇÃO DO CONCRETO

Como observado, o líquido contido na solução porosa do concreto de cobertura e dada sua alta alcalinidade, permite a preservação de uma camada de óxido protetor ao redor das armaduras, conhecida como filme passivo. Na presença de umidade e oxigênio, esse filme passivo impede a dissolução do ferro, impossibilitando a corrosão dos reforços. No entanto, essa proteção pode desaparecer quando o filme passivo é destruído como resultado da perda de alcalinidade (pH < 9) do concreto de revestimento (Behnood et al., 2016). O fenômeno da carbonatação do concreto é uma das causas dessa despassivação.

A carbonatação ocorre quando o dióxido de carbono do ar (CO₂) entra no concreto através de seus poros e reage com os hidróxidos da fase líquida intersticial e com os compostos hidratados do cimento, de tal forma que o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂), hidróxido de sódio (Na(OH)) e hidróxido de potássio (K(OH)) presentes na solução dos poros são carbonatados. Essas reações podem ser simplificadas a partir das seguintes equações (Broomfield, 2023):



Desta forma, a acidificação da solução porosa do concreto (Pu et al., 2012) causada pela carbonatação quebra a camada passiva da armadura de aço e inicia-se a corrosão da armadura de aço.

Deve-se notar que, ao contrário da maioria dos outros ácidos, o ácido carbônico não ataca a pasta de cimento, mas simplesmente neutraliza os álcalis presentes na solução dos poros, formando principalmente carbonato de cálcio que os reveste.

Uma vez iniciada a carbonatação, começa a se desenvolver uma frente (dc) que avança para o interior do concreto. O mecanismo de transporte ou movimento da carbonatação dentro do concreto é explicado pela teoria da difusão e é descrito pela primeira lei de Fick, de acordo com a seguinte equação (Broomfield, 2023):

$$dc = kc t^{1/2} \quad (3)$$

O avanço da face (dc) depende da raiz quadrada do tempo (t) ao qual o concreto é exposto, da taxa de carbonatação (kc) que depende da difusividade efetiva do CO_2 através do concreto, e da concentração desse gás no ambiente de exposição. Este progresso é simples de detectar e medir usando a solução de fenolftaleína dissolvida em álcool etílico como indicador de pH (UNE 112-011, 2011). A fenolftaleína assume uma cor vermelho-púrpura para valores de $pH > 9,5$ (concreto não carbonatado) e torna-se incolor para valores de $pH < 8$ (concreto carbonatado). Para valores intermediários, muda para rosa pálido.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A avaliação qualitativa da frente carbonática foi realizada em um grupo de 12 amostras, cada uma composta por três corpos de prova, que foram mantidos por aproximadamente seis anos em uma determinada condição de exposição ambiental, que tinha a ver com submeter os espécimes a ciclos alternados não regulares de submersão. imersão parcial e secagem ao ar (Figura 2). O tempo de cada ciclo de exposição não foi estabelecido como variável de estudo e, conseqüentemente, não controlado, resultando no mesmo para cada amostra. Deve-se notar que o nível de água nos recipientes onde as amostras foram mantidas foi renovado aproximadamente a cada dois meses.

Foram utilizados corpos de prova medindo 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura (IRAM 1534, 2004), enquanto os materiais relatados em sua preparação foram cimento Portland pozolânico (CPP-40) e cimento de adição (CPF-40), ambos atendendo à respectiva norma (IRAM 50000, 2000); Granulados naturais laminados de dimensão máxima de 19 mm; e um aditivo impermeabilizante inorgânico identificado em sua ficha técnica como aditivo hidrorrepelente, incorporado à mistura fresca em dose correspondente a 10% da água de amassamento. Este aditivo apresenta uma suspensão de silicatos coloidais em uma emulsão aquosa líquida viscosa, amarelo pálido, que se distribui dentro da matriz cimentícia, bloqueando seus capilares e obtendo assim o efeito impermeabilizante. Por outro lado, esses silicatos reagem com a portlandita liberada pelo cimento, formando compostos insolúveis que também obstruem poros e capilares.



Figura 2. Condição de exposição dos espécimes a serem avaliados.

Já a barra embutida na face superior dos corpos de prova (Figura 3), correspondia a uma haste com diâmetro de 8 mm, fabricada em aço DNA 420 (IRAM/IAS U 500-528, 2022) e com profundidade embutida no concreto de aproximadamente 100 mm.



Figura 3. Barra embutida na face superior dos espécimes.

A Tabela 1 apresenta as referências e os materiais utilizados em cada uma das amostras avaliadas.

Tabela 1. Designação das amostras do estudo. Proporção de materiais em peças.

Desig.	A / C	Tipo de cimento	Tipo de aditivo	Cimento [kg/m ³]	Água [LTS/M ³]	Arena [kg/m ³]	Ripio [kg/m ³]	Aditivo [lts/m ³]
P-05	0.5	CPP-40 Pozolânico (P)	-	362	181	725	1086	-
Pág. 06	0.6			349	209	698	1047	-
Pág. 07	0.7			337	236	675	1012	-
P-05-H	0.5		repelente de água (H)	362	163	725	1086	18.1
P-06-H	0.6			349	189	698	1047	20.9
P-07-H	0.7			337	213	675	1012	23.6
F-05	0.5	CPF-40 Enchiment o (F)	-	362	181	725	1086	-
F-06	0.6			349	209	698	1047	-
F-07	0.7			337	236	675	1012	-
F-05-H	0.5		repelente de água (H)	362	163	725	1086	18.1
F-06-H	0.6			349	189	698	1047	20.9
F-07-H	0.7			337	213	675	1012	23.6

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para a avaliação da frente carbonática, os corpos de prova foram previamente submetidos ao ensaio de tração por compressão diametral (IRAM 1658, 1995) (Figura 4), que permitiu a obtenção de duas metades e, com ela, duas superfícies internas de avaliação. Embora os corpos de prova tivessem uma barra embutida, a partir do teste supracitado foi inferida a tensão de ruptura.

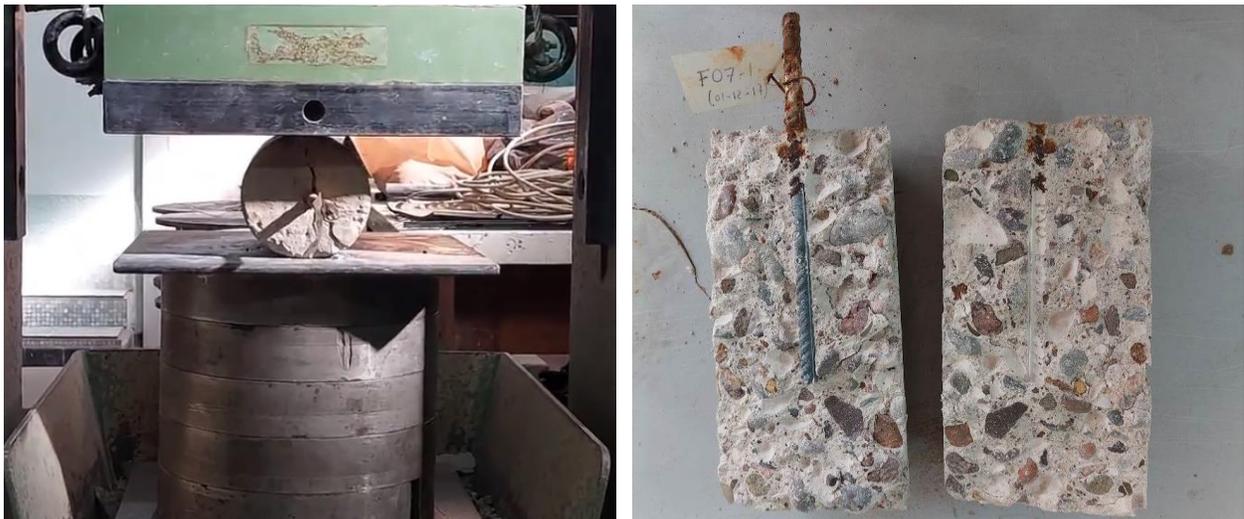


Figura 4. Esquerda.) Ensaio de tração por compressão diametral. Direito.) Metades obtidas do teste.

Uma solução de fenolftaleína foi aplicada em cada superfície interna obtida, permitindo assim avaliar o progresso da frente carbonática. A Figura 5 mostra as superfícies internas de uma das amostras antes e depois do teste de carbonatação.



Figura 5. Superfícies internas antes do teste (esquerda) e depois do teste (direita).

Como esperado, parte da armadura embutida no espécime foi despassivada devido ao avanço da frente de carbonatação. Além disso, as condições de exposição sob as quais as amostras foram encontradas ao longo de 6 anos levaram ao início e subsequente propagação do processo corrosivo nesta seção da barra despassivada. A Figura 6 apresenta um dos casos avaliados, onde se observa a penetração alcançada pela frente carbonática e, com ela, a nítida delimitação entre a seção da barra corroída e a não corroída.

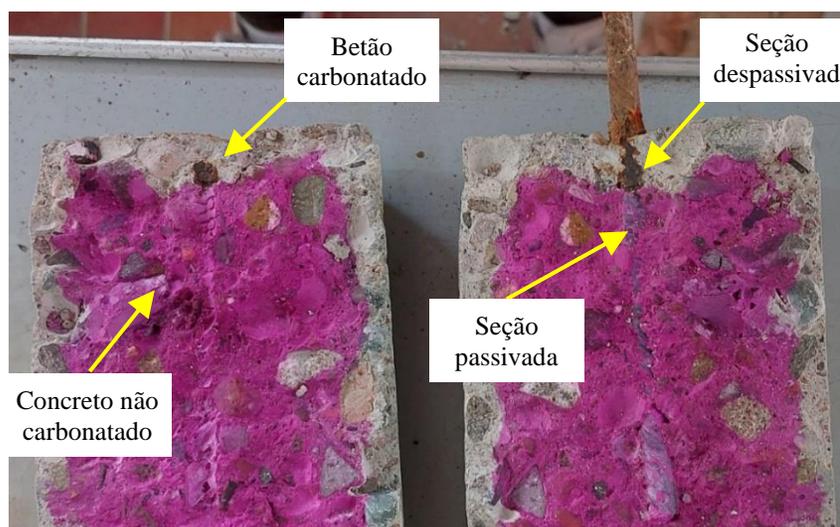


Figura 6. Avanço da frente de carbonatação. Seção de barra passivada e despassivada.

As condições de exposição às quais os espécimes foram submetidos ao longo do tempo significaram que diferentes áreas dos espécimes estavam sob diferentes microambientes. Enquanto a face inferior foi encontrada na maior parte do tempo submersa, a face superior acabou sendo a que passou a maior parte desse tempo ao ar livre. Portanto, a face inferior foi a que apresentou os ciclos mais longos de poros saturados, diferentemente do que ocorreu com a face superior. Essas condições particulares, entende-se, fizeram com que o avanço da frente carbonática na face inferior se desenvolvesse a uma velocidade menor. Isso se deve à maior dificuldade de dissolução de CO_2 na solução de poros saturados que essa área dos corpos de prova apresentou. Pelo contrário, essa

taxa de penetração foi maior na face superior, pois essa área foi a que apresentou os ciclos mais longos em condições de poros secos ou parcialmente saturados.

A Figura 7 mostra as diferenças observadas no avanço da frente de carbonatação entre as faces inferior e superior, para as amostras confeccionadas com cimento pozolânico (P) e cimento fillerado (F), e sem aditivo hidrorrepelente.



Figura 7. Avanço frontal de carbonato. Esquerda.) Amostras "P-0x". Direito.) Amostras "F-0x".

A Tabela 2 apresenta os resultados correspondentes à tensão de tração na compressão diametral (ft), indicando os valores determinados para cada um dos três corpos de prova que fazem parte de cada amostra de estudo. Também é indicado o resultado médio obtido para cada amostra, bem como o desvio padrão (Sn) e o coeficiente de variação (C.V.).

Tabela 2. Resistência à tração à tração.

Designação	FT1 [MPa]	ft2 [MPa]	ft3 [MPa]	FT médio [MPa]	Sn [MPa]	C.V. [%]
P-05	2.76	2.95	2.87	2.86	0.08	2.7
Pág. 06	2.65	2.59	2.76	2.67	0.07	2.6
Pág. 07	2.61	2.68	2.72	2.67	0.05	1.7
P-05-H	3.81	3.51	3.67	3.66	0.12	3.3
P-06-H	2.59	2.42	2.51	2.51	0.07	2.8
P-07-H	1.77	1.96	1.90	1.88	0.08	4.2
F-05	3.42	3.57	3.32	3.44	0.10	3.0
F-06	2.76	2.66	2.97	2.80	0.13	4.6
F-07	2.62	2.53	2.56	2.57	0.04	1.5
F-05-H	3.33	3.41	3.59	3.44	0.11	3.2
F-06-H	2.47	2.41	2.29	2.39	0.07	3.1
F-07-H	2.27	2.28	2.33	2.29	0.03	1.1

Tabelas 3 e 4 e com a mesma análise estatística indicada para a Tabela 2, são apresentados os resultados obtidos para a profundidade de avanço da frente carbonática (dc), tanto para a face inferior dos corpos de prova quanto para sua face superior.

Por fim, a Tabela 5 apresenta a determinação da velocidade de carbonatação (k_c) obtida a partir da equação (1), levando em consideração os resultados do avanço da frente indicados nas Tabelas 3 e 4, e o tempo de exposição (t) de 6 anos a que as amostras foram submetidas desde sua elaboração até o momento das medições realizadas.

Tabela 3. Frente carbonatada na parte inferior para um tempo de exposição de 6 anos.

Designação	Parte inferior dianteira do carbonato				Sn [MPa]	C.V. [%]
	DC1 [mm]	DC2 [mm]	DC3 [mm]	DC média [mm]		
P-05	9.7	8.1	9.3	9.0	0.7	7.5
Pág. 06	9.5	11.8	9.0	10.1	1.2	12.1
Pág. 07	11.6	11.6	9.7	11.0	0.9	8.2
P-05-H	10.4	11.6	11.2	11.1	0.5	4.5
P-06-H	12.0	14.5	12.5	13.0	1.1	8.3
P-07-H	16.8	13.3	14.5	14.9	1.5	9.8
F-05	7.2	6.0	8.4	7.2	1.0	13.6
F-06	8.2	11.0	8.0	9.1	1.4	15.1
F-07	8.7	10.1	8.5	9.1	0.7	7.8
F-05-H	8.9	6.5	6.3	7.2	1.2	16.3
F-06-H	8.0	9.5	9.7	9.1	0.8	8.4
F-07-H	10.7	9.9	9.6	10.1	0.5	4.6

Tabela 4. Frente carbonatada na face superior para um tempo de exposição de 6 anos.

Designação	Face superior frontal carbonatada				Sn [MPa]	C.V. [%]
	DC1 [mm]	DC2 [mm]	DC3 [mm]	DC média [mm]		
P-05	13.3	12.1	13.2	12.9	0.5	4.2
Pág. 06	13.8	14.3	11.3	13.1	1.3	10.0
Pág. 07	19.5	17.3	17.2	18.0	1.1	5.9
P-05-H	15.7	18.8	15.9	16.8	1.4	8.4
P-06-H	15.0	17.8	15.1	16.0	1.3	8.1
P-07-H	26.3	24.2	24.2	24.9	1.0	4.0
F-05	10.4	10.2	12.8	11.1	1.2	10.6
F-06	11.9	13.4	10.6	12.0	1.1	9.6
F-07	12.1	14.9	14.7	13.9	1.3	9.2
F-05-H	12.2	11.1	10.1	11.1	0.9	7.7
F-06-H	10.6	11.5	11.3	11.1	0.4	3.5
F-07-H	14.8	14.6	12.7	14.0	1.0	6.7

Tabela 5. Taxa média de carbonatação para um tempo de exposição de 6 anos.

Designação	kc médio [mm/ano0,5]	
	Inferior	Maneira superior
P-05	3.7	5.3
Pág. 06	4.1	5.3
Pág. 07	4.5	7.3
P-05-H	4.5	6.9
P-06-H	5.3	6.5
P-07-H	6.1	10.2
F-05	2.9	4.5
F-06	3.7	4.9
F-07	3.7	5.7
F-05-H	2.9	4.5
F-06-H	3.7	4.5
F-07-H	4.1	6.1

Figura 8 e para cada uma das amostras do estudo, é apresentada a evolução do avanço da face carbonática em função da resistência à tração (ft). Observa-se que quanto maiores os valores de resistências obtidos nos ensaios, menor o avanço da frente carbonática (DC).

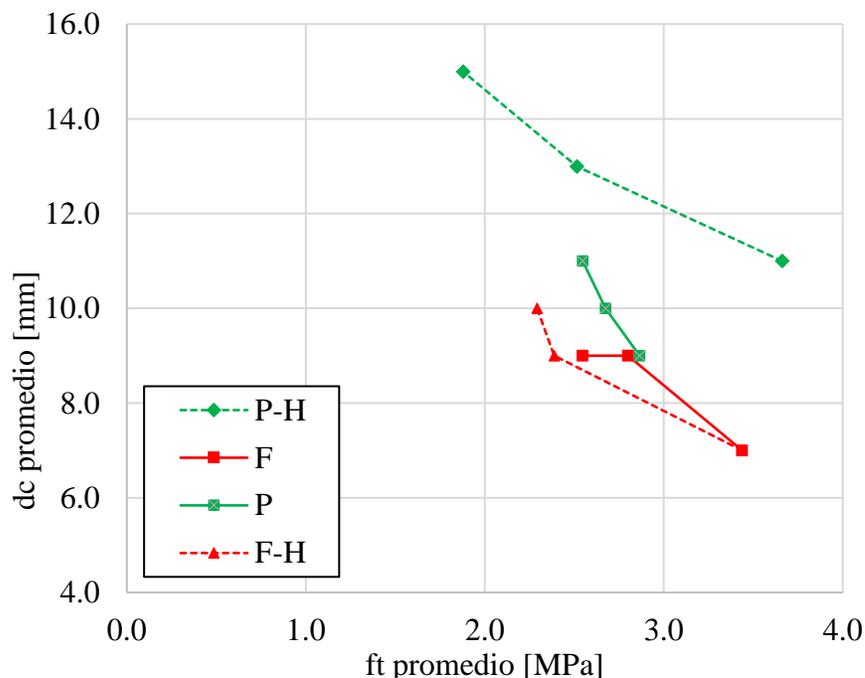


Figura 8. Tensão de tração vs. avanço da face carbonática na parte inferior.

Para níveis semelhantes de tensão de tração, o avanço da frente carbonática foi maior nas amostras confeccionadas com cimento pozolânico. Isso pode ser devido à menor reserva alcalina disponível devido ao consumo de portlandita resultante da reação pozolânica (de Medeiros et al., 2017). Quanto ao efeito do aditivo repelente de água, a incorporação dele levou a um ligeiro aumento na frente de carbonato. Isso pode ser devido ao fato de que esses aditivos são materiais hidrofóbicos

à base de sais de ácidos graxos, cálcio, amônio, etc., que reagem com a portlandita (Ramachandran, 1996), diminuindo novamente a reserva alcalina.

5. APLICAÇÃO DO CIRSOC 201 A ESTUDOS DE CASO

Do exposto e considerando como exemplo o de um elemento de betão armado que faz parte de uma estrutura de fundação, com classe de exposição ambiental A2 correspondente à corrosão por carbonatação (CIRSOC 201, 2005), em contacto vertical com o solo e com armaduras com diâmetro inferior a 16 mm, o revestimento mínimo necessário seria de 30 mm. A partir das velocidades de carbonatação k_c determinadas na Tabela 5, seria possível obter o tempo que deveria decorrer desde o comissionamento do concreto até que a carbonatação atinja o local das armaduras. A Tabela 6 apresenta os valores desses tempos por meio do modelo preditivo (equação 1) aplicado às amostras do estudo.

O tempo decorrido desde o comissionamento do concreto até que a frente carbonática atinja o local da armadura é conhecido como período de iniciação. A partir desse momento, inicia-se o período definido como propagação, período em que se desenvolve a corrosão da armadura (Tuutti, 1982). Por outro lado, a vida útil de uma estrutura é definida como um momento em que ela deixa de ser capaz de atender a requisitos essenciais, como segurança, funcionalidade e aparência estética. Essa vida útil é constituída pelo período de tempo de início e parte ou todo o período de tempo de propagação.

Nesse sentido, o Regulamento CIRSOC 201 (CIRSOC 201, 2005) estabelece uma vida útil em serviço de 50 anos. Portanto, com base nos resultados indicados na Tabela 6 e com relação à parte inferior dos corpos de prova, observa-se que apenas duas amostras, P-06-H e P-07-H, apresentaram t-tempos bem abaixo da vida útil indicada. Por outro lado, para a face superior, com exceção das amostras F-05, F-05-H e F-06-H, o restante novamente apresentou um tempo t significativamente menor do que o esperado para essa vida útil.

Tabela 6. Tempo t em anos para o início da eventual propagação da corrosão.

Desig.	Tempo t para uma CC = 30 mm	
	Inferior	Maneira superior
P-05	67	32
Pág. 06	54	32
Pág. 07	45	17
P-05-H	45	19
P-06-H	32	21
P-07-H	24	9
F-05	110	45
F-06	67	38
F-07	67	28
F-05-H	110	45
F-06-H	67	45
F-07-H	54	24

Assumindo então uma condição de serviço para os concretos avaliados sob o ambiente de exposição úmido-seco e com requisitos de revestimento de 30 mm, resultaria em geral e sem diferenciar o comportamento entre as faces, que amostras com relações a/c não superiores a 0,5 e com cimento fízió, a vida útil seria da ordem daquela estabelecida pela regulamentação. Por outro lado, diferenciando o comportamento entre as faces, para a condição particular da face que está

mais saturada ao longo do tempo, as relações a/c não superiores a 0,6 poderiam atender à vida útil, com exceção do caso P-06-H.

Por fim, o que foi apontado neste estudo qualitativo mostra a diferença de comportamento observada para a frente carbonática, dependendo, entre outras possíveis causas, da condição de exposição ao longo do tempo a que as faces das amostras foram particularmente submetidas, embora em geral fosse uma condição de umectação-secagem.

Se esses resultados forem validados em futuras pesquisas planejadas, isso poderá levar a uma recomendação para os regulamentos atualmente em vigor na República Argentina. Dessa forma, pode-se considerar uma diferenciação quanto à definição das classes de exposição ambiental, situação também definida por outros autores como microambientes, uma vez que se espera que o concreto em serviço esteja na condição de saturado, ou na condição de exposição ao ar livre.

Atualmente, essas condições ambientais, saturação ao ar livre, estão representadas nos regulamentos (CIRSOC 201, 2005) de forma geral sob o mesmo tipo de exposição.

6. CONCLUSÕES

Com base no estudo realizado e na interpretação qualitativa das tendências observadas nos resultados, são apresentadas as seguintes conclusões obtidas para as amostras do estudo:

- Quanto maior a resistência à tração devido à compressão diametral do concreto, menor o avanço da frente carbonatada. Este comportamento está em total concordância com a relação a/c.
- Para níveis semelhantes de resistência, o avanço da frente foi maior nas amostras feitas com cimento pozolânico em comparação com as amostras feitas com cimento fillerd.
- A incorporação do aditivo hidrorrepelente levou a um aumento no avanço da frente.
- Durante os 6 anos de exposição das amostras, o progresso foi mais profundo nas faces mais expostas ao ar livre do que nas faces mais saturadas.

7. OBRIGADO

À Secretaria de Ciência e Tecnologia da Universidade Tecnológica Nacional, pelo financiamento do Projeto PID 8573.

8. REFERÊNCIAS

Behnood, A., Van Tittelboom, K., De Belie, N. (2016), *Methods for measuring pH in concrete: A review*. Construction and Building Materials, 105, 176-188.

<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.032>

Broomfield, J. P. (2023), *Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair*. Crc Press. <https://doi.org/10.1201/9781003223016>

Castro, P., Sanjúan, M., Genescá, J. (2000), *Carbonation of concretes in the Mexican Gulf*. Building and Environment 35, 145-149. [doi.org/10.1016/S0360-1323\(99\)00009-8](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(99)00009-8)

CIRSOC 201 (2005), *Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*. INTI, Argentina. <https://www.inti.gov.ar/assets/uploads/files/cirsoc/vigencia-013/area100/area100a/reglamento201completo.pdf>

Dal Molin, D. (1988), *Fissuras en estructuras de concreto armado: Análisis das manifestacoes típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul*, Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

De Medeiros, M., Raisdorfer, J., Hoppe Filho, J., Medeiros-Junior, R. (2017). *Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 2, 1-9. <https://doi.org/10.1007/s41024-017-0023-z>

- Di Maio, A., Sota, J., Traversa, L. (1999), “*Patología de estructuras de hormigón. Análisis de algunos casos más relevantes ocurridos en la Argentina en los últimos años*”, III Congreso Iberoamericano de Patología de la Construcción y V Congreso Iberoamericano de Control de Calidad, La Habana, Cuba.
- Guzmán, M., Maldonado, G., Giolo, E. (2018), *Evaluación de la resistividad eléctrica del hormigón como parámetro de durabilidad frente a la corrosión del acero*, XXXVIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Lima, Perú.
- Guzmán, M., Maldonado, G., Roldan, V., Acosta, S., Dagne, C. (2019), *END para la valoración cualitativa del proceso corrosivo en probetas de hormigón armado con distintas características de diseño*, XII Congreso Regional de Ensayos No Destructivos y Estructurales CORENDE, Buenos Aires, Argentina.
- Guzmán, A. (2023), *Umbrales de resistividad para evaluar durabilidad del hormigón con hidrofugantes y diferentes relaciones agua/cemento*. Revista ALCONPAT, 13(3), 286-298. doi.org/10.21041/ra.v13i3.699
- Houst, Y., Wittmann, F. (2002), *Depth profiles of carbonates formed during natural carbonation*. Cement and Concrete Research 32, 1923-1930. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00908-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00908-0)
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (1995), *IRAM 1658: Determinación de la resistencia a la tracción simple por compresión diametral*. Buenos Aires, Argentina, IRAM. <https://www.iram.org.ar/>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2000), *IRAM 50000: Cemento para uso general*. Buenos Aires, Argentina, IRAM. <https://www.iram.org.ar/>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2004), *IRAM 1534: Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral*. Buenos Aires, Argentina, IRAM. <https://www.iram.org.ar/>
- Instituto Argentino de Normalización y Certificación (2022), *IRAM/IAS U 500-528: Barras de acero conformadas de dureza natural, para armadura en estructura de hormigón*. Buenos Aires, Argentina, IRAM. <https://www.iram.org.ar/>
- Irassar, E. (2001), *Durabilidad del hormigón estructural*, XIV Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón y Seminario de Durabilidad del Hormigón Estructural, Olavarría, Buenos Aires, Argentina.
- Leemann, A., Nygaard, P., Kaufmann, J., Loser, R. (2015). *Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete*. Cement and Concrete Composites 62, 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.020>
- Marcotte, T. (2001), *Characterization of chloride-induced corrosion products that form in steel-reinforced cementitious materials*, PhD Thesis in Mechanical Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Canada. <https://uwspace.uwaterloo.ca/bitstream/handle/10012/694/NQ65251.pdf?sequence=1>
- Priano, C., Señas, L. (2013), *Carbonatación de estructuras de hormigón ubicadas en ambiente urbano y rural*. International Journal of Innovation and Applied Studies, 2(1), 6-15. <http://www.issr-journals.org/ijias/>
- Pu, Q., Jiang, L., Xu, J., Chu, H., Xu, Y., Zhang, Y. (2012), *Evolution of pH and chemical composition of pore solution in carbonated concrete*. Construction and Building materials, 28(1), 519-524. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.006>
- Ramachandran, V. S. (1996). *Concrete admixtures handbook: properties, science and technology*. William Andrew. <https://www.sciencedirect.com/book/9780815513735/concrete-admixtures-handbook>
- Rao, N., Meena, T. (2017). *A review on carbonation study in concrete*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 263(3), IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/263/3/032011/pdf>

Trocónis, O., Romero, A., Andrade, C., Helene, P., Díaz, I. (1997), *Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado*. CYTED, Red Temática XV. B. Durabilidad de la armadura, Río de Janeiro, Brasil.

<https://repositorio.usp.br/item/000923678>

Tuutti, K. (1982), *Corrosion of steel in concrete*. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm. <https://lucris.lub.lu.se/ws/portalfiles/portal/4709458/3173290.pdf>

UNE 112-011 (2011), *Corrosión en armaduras. Determinación de la profundidad de carbonatación en hormigones endurecidos y puestos en servicio*. AENOR, Asociación Española de Normalización y Certificación.

<https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0047865>