

Acondicionamiento de probetas para el ensayo de carbonatación acelerada

Specimen conditioning for the accelerated carbonation test

Francisco Ulibarrie, Sebastián Vanney

Centro de Investigación y Desarrollo para la Construcción y la Vivienda (CECOVI), Facultad Regional Santa Fe, UTN (Lavaisse 610, Santa Fe).

fulibarrie@frsf.utn.edu.ar; svanney@frsf.utn.edu.ar

Resumen

La carbonatación en el hormigón es un proceso que se manifiesta de forma natural en el ambiente. Se da cuando el dióxido de carbono (CO_2) presente en el aire ingresa al hormigón y se combina con el hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Este proceso se manifiesta generalmente de forma homogénea a través de lo que se conoce como “frente de carbonatación”. En hormigones armados, cuando dicho frente llega al hormigón que cubre la armadura, se rompe la protección del acero dejándolo expuesto a la corrosión.

Debido a la lentitud de este proceso en el ambiente natural, los investigadores han buscado la forma de representarlo en el laboratorio para poder acelerar el fenómeno.

A partir de trabajos y experiencias propias se detectó la necesidad de realizar un acondicionamiento a las probetas previo al ensayo de carbonatación acelerada. El objetivo de este trabajo es presentar los resultados del análisis realizado para la definición de la metodología adecuada para este acondicionamiento.

Palabras Claves: Carbonatación; Carbonatación Acelerada; Acondicionamiento; Cemento.

Abstract

Carbonation in concret is a process that occurs naturally in the environment. It occurs when the carbon dioxide (CO_2) present in the air enters the concrete and combines with the calcium hydroxide $\text{Ca}(\text{OH})_2$. This process is generally manifested in a homogeneous way through what is known as the “carbonation front”. In reinforced concrete, when said front reaches the concrete covering the reinforcement, the protection of the steel is broken, leaving it exposed to corrosion.

Due to the slowness of this in the natural environment, researchers have looked for a way to represent it in the laboratory to accelerate the phenomenon.

Based on our own work and experiences, the need to carry out a conditioning of the specimens prior to the accelerated carbonation test was detected. The objective of this work is to define a methodology for this conditioning.

Keywords: Carbonation, Accelerated Carbonation, Specimen Condition, Cement.

1. Introducción

La carbonatación es un fenómeno natural que ocurre en estructuras de hormigón. En el hormigón que no contiene acero de refuerzo se trata de un proceso de pocas consecuencias (Chavéz-Ulloa et al, 2013:4). Sin embargo, cuando se trata de hormigón armado la carbonatación juega un papel determinante.

Este proceso se da cuando el dióxido de carbono (CO_2) presente en el ambiente penetra en el interior del hormigón mediante poros o fisuras y se combina con el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) producido en el proceso de hidratación del cemento, formando carbonato de calcio (CaCO_3) (Chavéz-Ulloa et al, 2013:4) (Campos et al, 2016:2-3), (Alés – Flores et al, 2020:3), (Merah et al, 2017:2).

Una de las consecuencias de este proceso es la disminución del pH del hormigón de valores mayores a 12.5 (valores comunes en hormigones sanos o recientemente elaborados) a valores cercanos a 8 en zonas completamente carbonatadas (Chavéz-Ulloa et al, 2013:4), (Campos et al, 2016:2-3). Al bajar la alcalinidad del hormigón, la capa pasiva que recubre y protege a la armadura se rompe, quedando expuesta a los agentes que producen la corrosión (Campos et al, 2016:2-3).

La carbonatación se manifiesta de manera natural, es decir, ocurre cuando el hormigón está expuesto a condiciones de ambiente. Los procesos de carbonatación natural son generalmente muy lentos de forma que en determinados hormigones muy densos los efectos de este fenómeno pueden no aparecer hasta pasados varios años desde su puesta en servicio (Ocampo et al, 2010:2-3), (Chavéz-Ulloa et al, 2013:4).

La lentitud del proceso ha llevado a algunos investigadores a realizar estudios acelerados utilizando porcentajes de $\text{CO}_{2(g)}$ mayores que el atmosférico para intentar predecir su comportamiento a largo plazo y de esta manera obtener información rápida y segura sobre este fenómeno (Ocampo et al, 2010:2-3), (Chavéz-Ulloa et al, 2013:4), (Merah et al, 2017:3).

La necesidad de contar con una cámara de carbonatación acelerada es obtener información anticipada que aproxime los datos que se obtendrían en el sitio de exposición del medio ambiente natural, controlando en este caso las variables ambientales que mayor efecto puedan tener en este proceso como son la temperatura, humedad relativa y concentración de CO_2 (Chavéz-Ulloa et al, 2013: 4).

Algunos autores (Rebolledo, 2015) (Norma Española UNE 83993-1:2009) consideraron incorporar un proceso de aclimatación de probetas previo al ensayo de carbonatación acelerada. Teniendo en cuenta sus trabajos, en el presente escrito se reflejarán algunas experiencias realizadas con probetas de cemento con el objetivo de determinar una metodología de acondicionamiento para las mismas.

2. Metodología

Se moldearon 6 series de 6 probetas prismáticas de 1x1x6 cm cada una. Estas dimensiones fueron establecidas en función del tipo de molde disponible y del tamaño de la cámara a utilizar. Todas las probetas se elaboraron con la misma dosificación, la cual se determinó mediante el ensayo de pasta de consistencia normal y los tiempos de mezclado fueron los establecidos en la Norma IRAM 1612:2016.

Luego se vertió la mezcla en un molde metálico para obtener probetas prismáticas. El molde fue previamente pincelado con desmoldante dejando una pequeña película con el fin de facilitar el desmolde. Luego se dejó reposar las probetas cubiertas con un trapo húmedo durante 24 hs.

A continuación, las probetas fueron desmoldadas, rotuladas y colocadas en la Cámara de Curado, recipiente repleto de agua a temperatura ambiente controlada. Se colocaron de manera que el líquido tenga contacto con ellas en todas sus caras durante un período de 28 días. La Cámara de Curado utilizada puede observarse en la Figura N°1.

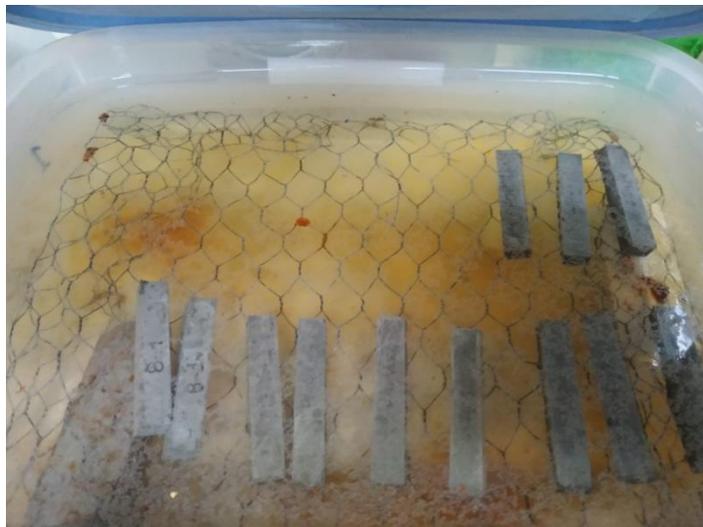


Figura N° 1: Curado de probetas.

2.1. Secado

Una vez transcurridos los 28 días de curado, las probetas fueron llevadas a una estufa para su secado con el fin de acelerar la pérdida de humedad generada en el curado.

El secado en estufa se realizó a una temperatura de 40°C, seleccionada para evitar fisuras y gradientes térmicos significativos sobre la probeta (Rebolledo, 2015).

El parámetro que se evaluó en esta etapa fue el periodo mínimo de secado, el cual se determinó en función de pesadas cada 24 hs.

2.2. Estacionamiento

La etapa de estacionamiento busca conseguir que las probetas lleguen a las condiciones finales con la que ingresarán a la cámara de carbonatación. Estas condiciones de temperatura (21 ± 5 °C) y humedad ($65 \pm 5\%$) se establecieron según lo indicado en experiencias previas (Dang et al, 2021:3).

Para el estacionamiento se colocaron las probetas en un recipiente de polietileno expandido con un espesor de paredes de 2 cm aproximadamente. Con el fin de lograr el contacto del aire del recinto con todas las caras de cada probeta, estas se colocaron sobre una rejilla que las mantenía en suspensión. También se colocó un recipiente con sales (silica-gel) y otro con agua para brindar las condiciones de humedad a las probetas y un termohigrómetro para registrar los cambios de condiciones. Por último, se tapó el recipiente y se lo colocó en un ambiente de temperatura controlada. El recipiente mencionado se ilustra en la Figura N°2.

En esta etapa, nuevamente lo que se buscó definir fue el periodo mínimo en que las probetas deben permanecer en Estacionamiento para alcanzar un equilibrio con las condiciones ambientes definidas. Esto se realizó registrando pesadas cada 24 hs.

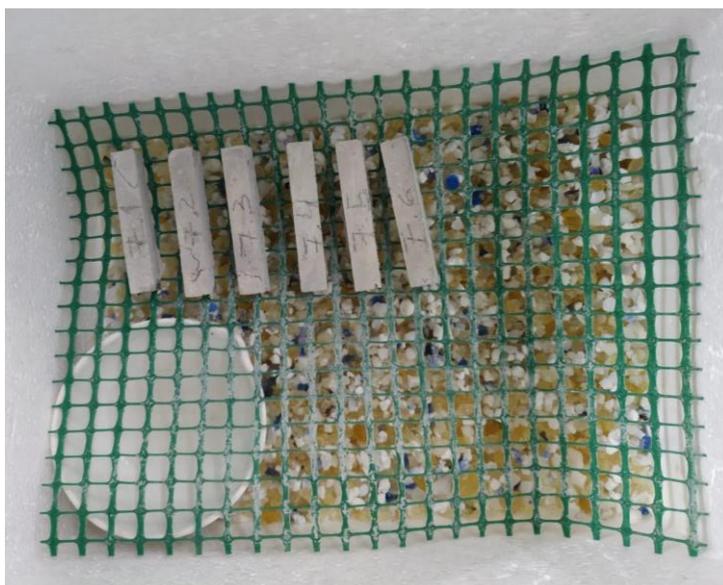


Figura N° 2: Cámara de estacionamiento.

2.3. Ensayo de carbonatación acelerada

Una vez cumplido el periodo de estacionamiento cada serie fue separada en dos grupos de 3 probetas cada uno: un grupo ingresó a la cámara de carbonatación acelerada (DC) y otro grupo permaneció fuera de la misma (AC). Esto se realizó para tener parámetros de comparación entre una probeta en condiciones naturales y una probeta sometida a la carbonatación acelerada.

Las 3 probetas correspondientes al grupo AC fueron ensayadas con las mismas condiciones de Temperatura y Humedad con las que venían de la Etapa de Estacionamiento. Por el contrario, las probetas del grupo DC fueron ensayadas según las condiciones y variables de exposición que se detallan en la Tabla N°1.

Condiciones del ensayo en la Cámara de Carbonatación						
	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 5	Serie 6
Cantidad de Días	3	2	3	4	4	7
Temperatura (°C)	22.4	21.2	21.5	22.2	21.7	21.7
Humedad (%)	70	60	49	53	55	57
Presión Inicial (bar)	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	0.8
Presión Final (bar)	0.4	0(*)	0.4	0.75	0.8	0.47
*Perdió todo el gas						

Tabla N° 1: Condiciones del ensayo en la Cámara de Carbonatación.

Finalmente se determinó el grado de carbonatación de las probetas utilizando el método para medir pH mediante el uso de la técnica de la fenolftaleína. Los espesores carbonatados fueron medidos empleando una lupa de 60X.

3. Resultados

3.1. Tiempos definidos para cada etapa

Respecto del tiempo necesario de secado de las probetas en estufa, se evaluaron dos parámetros: (i) el tiempo necesario para eliminación total de la humedad y (ii) el tiempo requerido para que las probetas conserven el 50% de la humedad adquirida en el proceso de curado.

Los resultados obtenidos mediante la evaluación de pesadas sucesivas hasta constancia de masa determinaron que el tiempo requerido para la eliminación total de la humedad de las probetas cuando son secadas a 40°C es de 8 días.

Por su parte, el tiempo requerido para secar las probetas en estufa sin que perdieran su humedad por completo para así disminuir el periodo de estacionamiento se establece como óptimo para 3-4 días.

Esta última evaluación es importante ya que se detectó que, para obtener resultados apreciables, las probetas dentro de la cámara no deben estar completamente secas, sino que debían mantener cierto grado de humedad (entre el 50% y 70%) según (Dang et al,2021:3), (Sakr et al, 2020:3), (Gonzalez et al,2021:1).

A continuación, se discretizan los tiempos de secado de cada serie de probetas:

N° de Serie	Días en Estufa
1	8
2	8
3	6
4	3
5	5
6	3

Tabla N° 2: Tiempo en estufa de cada serie.

Una vez definido el tiempo de secado, el periodo de estacionamiento se definió en base a pesadas cada 24 hs. con el fin de determinar el tiempo que necesitan las probetas para llegar a una constancia de peso. En un principio este tiempo era de 21 días (Rebolledo, 2015).

En la Tabla N°3 se muestra un resumen de los tiempos de estacionamiento de cada serie:

N° de Serie	Días en Estacionamiento
1	26
2	21
3	28
4	15
5	15
6	15

Tabla N° 3: Tiempo en estacionamiento de cada serie.

Se puede observar que las primeras 3 series estuvieron más días en estacionamiento que las últimas ya que estas fueron las que sirvieron de parámetro para determinar el tiempo óptimo, determinado luego en 15 días.

Durante el ensayo se tuvo en cuenta que, al contar con una única cámara de estacionamiento y muchas series de probetas que debían utilizarla al mismo tiempo, el ingreso de probetas nuevas a la cámara podía modificar la humedad de las probetas que ya se estaban estacionando.

3.2. Resultados obtenidos de espesores de carbonatación durante el ensayo

La Tabla N° 4 presenta los resultados de espesores obtenidos para cada una de las series según se trate de AC o DC.

SERIE	Tiempo de Exposición	Presión	Temperatura	Humedad Relativa	Antes - Después	Promedio	Desviación
	hs	bar	°C	%		mm	
1	72	0,45	22,4	70	AC	0,0478	0,0313
					DC	0,1025	0,0746
2	48	0,25	21,2	60	AC	0,0737	0,0455
					DC	0,1107	0,0602
3	72	0,45	21,5	49	AC	0,0419	0,0398
					DC	0,0709	0,0596
4	96	0,775	22,22	53	AC	0,0125	0,0217
					DC	0,0956	0,1843
5	96	0,75	22,2	53	AC	0,0100	0,0135
					DC	0,0663	0,0749
6	96	0,635	21,7	56	AC	0,0055	0,0187
					DC	0,0281	0,0346

Tabla N° 4: Resumen de resultados.

A partir de estos resultados se llegaron a las siguientes definiciones:

- Las series 1 y 3 son comparables entre sí tanto ya que los resultados obtenidos para las AC como en las DC, debido a que cuentan con el mismo tiempo de exposición y las desviaciones de los valores correspondientes, son similares.
- Las series 4, 5 y 6 cuentan con el mismo tiempo de exposición, por lo que podrían ser comparadas entre sí. Analizando las desviaciones calculadas, se tendrá que estas son similares entre sí para la etapa del Ensayo AC, pero no ocurre lo mismo para la etapa DC, por lo que únicamente podrían compararse los promedios de estas 3 series sólo para la etapa AC.
- La serie 2 es la única que cuenta con un tiempo de exposición de 48 hs, por lo que no puede ser comparada con ninguna otra.

4. Conclusiones

- ✓ El tiempo óptimo mínimo que las probetas deben estar en la estufa a 40°C para alcanzar las condiciones necesarias para el ensayo de carbonatación acelerada es de 3 días.
- ✓ Para el estacionamiento, el tiempo óptimo resultó ser de 15 días. Se trata de un periodo mínimo, ya que no se detectaron inconvenientes en que las probetas permanezcan un mayor tiempo en estacionamiento.
- ✓ El proceso total de acondicionamiento resulta muy largo, siendo el curado su etapa más extensa, por lo que sería relevante pensar en la posibilidad de reducir este tiempo.
- ✓ No se pudo apreciar una variación importante en los espesores de carbonatación al realizar

este ajuste de tiempos de preacondicionamiento.

- ✓ Al no existir una metodología estandarizada para este tipo de ensayo, resulta relevante realizar tareas de investigación tendientes a establecer metodologías de ensayo que permitan luego realizar comparaciones con diferentes experiencias.

5. Reconocimientos

Se agradece la colaboración en el desarrollo de actividades a la Lic. Anabela Guillarducci y a Dianela González. Especialmente agradecemos a la Universidad Tecnológica Nacional por su financiación, al CECOVI (FRSF- UTN) por brindar los medios tecnológicos para realizar nuestra propuesta.

6. Referencias

- Chávez-Ulloa, E., Pérez López, T., Reyes Trujeque, J., & Corvo Pérez, F. (2013). "Deterioro de estructuras de concreto por carbonatación en medio ambiente marino tropical y cámara de carbonatación acelerada". *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 36(2), 104-113.
- Campos Silva, A. R., Fajardo, G., & Mendoza-Rangel, J. M. (2016). "Estudio del comportamiento del avance de la carbonatación del concreto reforzado en ambiente natural y acelerado".
- Flores – Alés, V., Rodríguez Romero, M., Romero – Hermidia, I. Esquivias, L. (2020). "Caracterización de morteros mixtos de cal obtenida del reciclado de fosfoyeso", *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 59, 3, 129 – 136.
- Merah, A., & Krobba, B. (2017). "Effect of the carbonatation and the type of cement (CEM I, CEM II) on the ductility and the compressive strength of concrete". *Construction and Building Materials*, 148, 874-886.
- Ocampo, I., Vuanello, O., Ortúzar, R., Seminara, H., Paez, G., Ibarbe, I., y otros. (2010). "Estudio de la Carbonatación Acelerada en Probetas de Hormigón Armado". VI Congreso Internacional sobre Patología y Recuperación de Estructuras, Córdoba, Argentina, 2, 3 y 4 de junio 2010.
- Sakr, M., & Bassuoni, M. (2021). "Performance of concrete under accelerated physical salt attack and carbonation". *Cement and Concrete Research*, 141, 106324.
- Rebolledo, Nuria (2015). "Módulo 6: Durabilidad, conservación y recuperación del patrimonio construido", Curso de Posgrado de Estudios Mayores (máster) de la Construcción, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Madrid, España.
- Norma Española UNE 83993-1:2009.
- Norma 1612 Método de ensayo para la determinación de la consistencia normal: 2016.
- Dang, V., Ogawa, Y., Bui, P., & Kawai, K. (2021). "Effects of chloride ions on the durability and mechanical properties of sea sand concrete incorporating supplementary cementitious materials under an accelerated carbonation condition". *Construction and Building Materials*, 274(7), 122016.
- Gonzalez, D., Peirano, S., Guillarducci, A. (2021). "Prototipo de cámara de carbonatación acelerada". Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Santa Fe, Santa Fe, Argentina.