

La influencia del fraguado térmico en las propiedades de durabilidad de los elementos prefabricados de hormigón

■ J. R. Mackechnie, Concrete NZ, Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda
H. Beushausen, Universidad de Ciudad del Cabo, Sudáfrica
A. Scott y V. Shah, Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda

En los últimos años, ingenieros de proyecto y fabricantes de prefabricados han debatido mucho sobre el tipo y la duración del tratamiento posterior de componentes de hormigón. Para acelerar el desarrollo de la resistencia inicial, el tratamiento posterior se realiza frecuentemente con temperaturas elevadas y, por regla general, la duración requerida del tratamiento posterior se determina en base al concepto de la maduración. Sin embargo, este tipo de fraguado térmico se asocia a veces con una estructura de poros más gruesa del hormigón y, por tanto, con una menor durabilidad. El efecto real del tratamiento posterior sobre la durabilidad de los componentes de hormigón puede evaluarse utilizando el concepto de rendimiento equivalente. En el presente estudio, se estudiaron las influencias de la temperatura y la duración del tratamiento térmico en las propiedades de durabilidad del hormigón. Los resultados muestran que, en muchos casos, el tratamiento posterior de los hormigones típicos para elementos prefabricados puede terminarse después de 24 horas sin efectos negativos sobre la durabilidad.

La diferencia que suele producirse habitualmente entre la resistencia proyectada y la resistencia real de los elementos prefabricados de hormigón, así como la influencia del tratamiento posterior con calor, restan relevancia a las directrices convencionales del tratamiento posterior cuando se trata de la producción de prefabricados [1]. Las diferencias extrínsecas (procesamiento) e intrínsecas (material) entre el hormigón in situ y el hormigón prefabricado pueden permitir una reducción del tiempo de tratamiento posterior de este último, sin que esto afecte necesariamente a la resistencia o durabilidad del hormigón a largo plazo. En este documento se estudia cómo se puede evaluar el tiempo de tratamiento posterior necesario mediante la determinación de la madurez o de la durabilidad equivalente.

Tratamiento posterior con calor y efectos en las propiedades del hormigón

El tratamiento térmico del hormigón promueve la rápida hidratación del cemento, aumentando de esta forma la re-

sistencia inicial, pero también hace que los productos de hidratación se dispongan cerca de la superficie del grano de cemento, reduciendo así el suministro de agua posterior al grano de cemento, lo que a su vez también reduce el grado de hidratación posterior [2]. Esto afecta a la distribución de radios de los poros dentro de la estructura del hormigón, haciendo que se formen proporcionalmente más poros medianos y grandes debido a la reducción del grado de hidratación, lo que a su vez potencialmente puede conducir a una reducción de la durabilidad [3]. Temperaturas iniciales elevadas, por encima de los 60 °C también pueden hacer que la microestructura del hormigón se aún más gruesa y, de esta forma, reducir considerablemente el beneficio previsto de una maduración más temprana [4].

El planteamiento de la madurez, que puede utilizarse para evaluar el tiempo requerido del tratamiento posterior, se basa en el supuesto de que la resistencia a la compresión permite evaluar la estructura general de los poros [5]. Sin embargo, la determinación de la madurez no permite una evaluación directa de aquellas propiedades de la estructura de los poros que también influyen en la durabilidad. Esto se ilustra en la Figura 1, donde una madurez equivalente de los elementos de hormigón prefabricado en comparación con el curado húmedo estándar requeriría un tratamiento posterior nocturno continuo a 60 °C (véase también [6]).

Algunas normas, como p. ej. la australiana AS 3600, permiten utilizar el método de la madurez para determinar el tiempo necesario del tratamiento posterior, que suele ser cuando el hormigón ha alcanzado el 80% de su resistencia proyectada (p. ej. 24 MPa para un hormigón con una resistencia proyectada de 30 MPa) [7]. En la presente investigación, se utilizó el método de durabilidad equivalente para estudiar la influencia del fraguado térmico en las propiedades de resistencia y de durabilidad del hormigón.

Estudios experimentales

Los estudios experimentales se dividieron en dos partes: Ensayos con hormigón de alta resistencia realizados en la



■ El Dr. James Mackechnie es Director de Educación, Formación y Desarrollo de Concrete New Zealand con sede en Christchurch, Nueva Zelanda. Además es Investigador Senior Adjunto en la Universidad de Canterbury y Ex-presidente de la Learned Society of Concrete New Zealand. Cuenta con más de treinta años de experiencia en la investigación y el desarrollo de materiales de construcción de hormigón, aplicados a los ámbitos de la ciencia, el asesoramiento y el diseño estructural, tanto en Nueva Zelanda como en Sudáfrica. Su investigación se centra en la durabilidad del hormigón y en las adiciones para hormigón. james@concretenz.org.nz



■ El Prof. Dr. Hans Beushausen es Profesor de Ciencias de Materiales de Construcción e Ingeniería Estructural y Director del Instituto de Investigación de Materiales de Hormigón de la Universidad de Ciudad del Cabo (UCT), Sudáfrica. Tras completar sus estudios de Ingeniería Civil en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Hamburgo (a finales de los años 1990), obtuvo su Maestría en Ciencias (MSc) en la UCT en 2000 y se doctoró en 2005. Sus intereses de investigación abarcan la tecnología del hormigón, la durabilidad y la predicción de la vida útil de estructuras de hormigón, así como el saneamiento de hormigón. Desde el año 2004 es editor de PHI. Hans.beushausen@uct.ac.za



■ Vineet Shah es investigador postdoctoral en el Departamento de Ingeniería Civil y de Recursos Naturales de la Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda. Culminó su doctorado en Ingeniería Civil en 2018 en el IIT de Delhi, India. Su principal área de investigación abarca la caracterización e hidratación de ligantes de bajo contenido en carbono y la comprensión de la influencia del tipo de ligante en la durabilidad a largo plazo del hormigón bajo la influencia de la carbonatación. vineet.shah@canterbury.ac.nz



■ Allan Scott es Profesor Asociado de Ingeniería Civil y Materiales Sostenibles en la Universidad de Canterbury, Nueva Zelanda. Su trabajo de investigación se centra en el desarrollo de materiales de construcción sostenibles (como los sistemas ligantes de silicato de magnesio), la determinación del rendimiento estructural residual y los procesos de degradación en estructuras de hormigón armado con corrosión y dañadas por sismos, así como las posibilidades de utilización de recursos in situ (in situ resource utilization; ISRU, por sus siglas en inglés) para materiales de construcción extraterrestres. allan.scott@canterbury.ac.nz

Universidad de Ciudad del Cabo (UCT) en Sudáfrica y ensayos con hormigón de resistencia moderada a alta en la Universidad de Canterbury (UC) en Nueva Zelanda. Los experimentos en la UCT tenían como objetivo estudiar la influencia general de las temperaturas de curado en la microestructura del hormigón. Los experimentos realizados en la UC tenían como objetivo comparar el rendimiento de hormigones in situ típicos con hormigones de elementos prefabricados para evaluar los requisitos de construcción asociados.

En ambos estudios se utilizaron dos tipos diferentes de cemento producidos en Nueva Zelanda: un CEM I de uso general (GP) y un cemento de alta resistencia (HE) típico para fabricación de prefabricados. Los aditivos para hormigón utilizados y sus cantidades de adición se aplicaron de acuerdo a la práctica habitual en la respectiva industria de prefabricados [8].

Hormigón de alta resistencia para la producción de prefabricados

Los estudios experimentales en la UCT se llevaron a cabo con dos diseños de mezcla de hormigón utilizando la composición mostrada en la tabla 1. El árido grueso estaba compuesto por grauvaca y como árido fino se utilizó una mezcla local (50/50) de arena de duna natural y grauvaca triturada.

Los ensayos de los hormigones abarcaron la determinación de la evolución de la resistencia a la compresión (medida en cubos de 100 mm de longitud de arista) y la determinación de las propiedades de durabilidad según el método sudamericano de permeabilidad al oxígeno [9 - 11]. El Índice de Permeabilidad al Oxígeno (Oxygen Permeability Index; OPI por sus siglas en inglés) proporciona una evaluación práctica y fiable de la estructura de los poros del hormigón y de la conectividad de los poros, y se utiliza en Sudáfrica para el diseño y el control de calidad de estructuras de hormigón

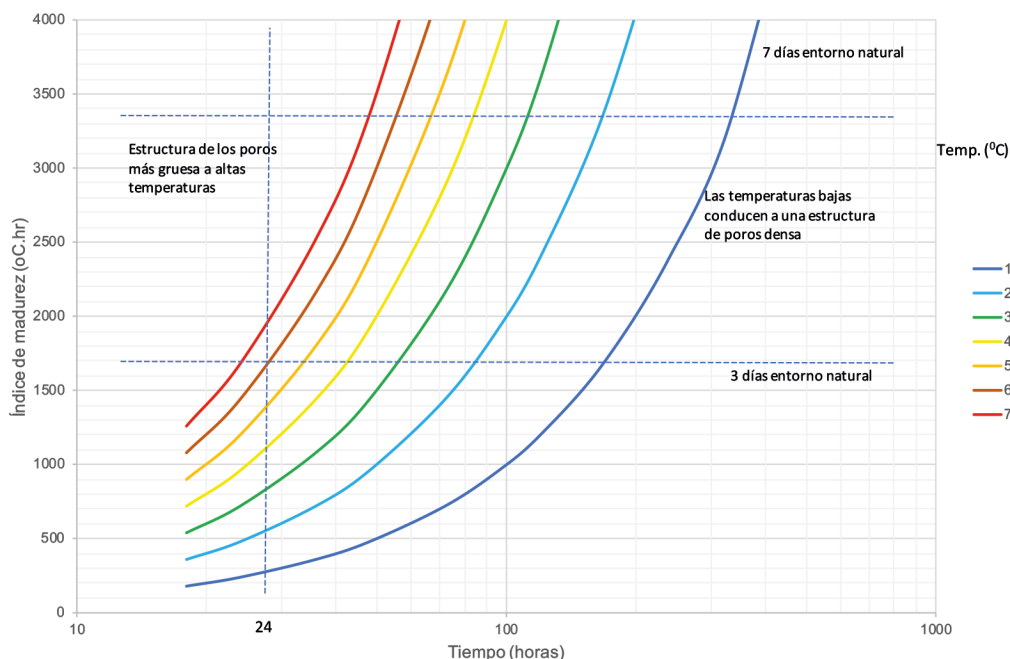


Fig. 1: Relación entre el índice de madurez y la temperatura de curado del hormigón (basado en [6])

para las clases de exposición XC (corrosión de la armadura por carbonatación). En particular, este método de ensayo permite determinar con gran fiabilidad las influencias de la composición de la mezcla, la compactación y las condiciones del tratamiento posterior en la microestructura del hormigón. Los cubos de hormigón se curaron en cinco condiciones de tratamiento posterior diferentes, como mostrado más abajo. El fraguado térmico se llevó a cabo de la siguiente forma: Después de la colada, dejar reposar las probetas durante 4 horas y sellarlas con una lámina de plástico para evitar la pérdida de agua - Colocar los moldes en un horno a temperatura ambiente y, en un plazo de 2 horas, dejar que la temperatura aumente hasta el valor requerido - Exponer las probetas a la temperatura de curado durante 18 horas y a continuación desmoldar - Almacenar a 23 °C y 50% de humedad del aire hasta que se haya alcanzado la edad de ensayo de 28 días.

- Tratamiento posterior a temperatura ambiente normal (23 °C, 50% de humedad del aire)
- Almacenamiento de agua (28 días)
- Tratamiento térmico a 40 °C
- Tratamiento térmico a 55 °C
- Tratamiento térmico a 70 °C

Tabla 1: Composición de la mezcla del hormigón de alta resistencia

Componente/propiedad	kg/m ³
Cemento Portland (GP o HE)	381
Agua	160
Arena (50/50 duna / triturada)	801
Áridos (19 mm)	1050
SP SikaViscoCrete -90 HE (ml)	1524
Acc SikaRapid -2 (ml)	2960
Relación agua/cemento	0,42

Tabla 2: Composición de las mezclas, hormigón para prefabricado y hormigón in situ (referencia) (kg/m³)

Componente/propiedad	GP30 Referencia	GP35 Referencia	GP40 Referencia	HE40 Referencia	GP45 Referencia	HE45 Referencia
Cemento Portland	265 GP	300 GP	360 GP	360 HE	380 GP	380 HE
Agua	162	165	165	158	165	158
Arena	885	875	875	885	860	870
Áridos bastos	1100	1050	1050	1050	1050	1050
Reductor de agua (ml)	1080	1500	1800	0	1900	0
Aireante (ml)	100	0	0	0	0	0
Superfluidificante (ml)	0	0	0	1900	0	2000
Relación agua/cemento	0,61	0,55	0,46	0,43	0,43	0,41
f _c , 28 días (MPa)	33,4	42,3	50,9	58,5	56,2	72,6

Mezclas con resistencias moderadas a altas

Las composiciones de las mezclas utilizadas en la Universidad de Canterbury se muestran en la tabla 2. Se llevaron a cabo estudios experimentales con dos mezclas de referencia y cuatro mezclas de hormigón para prefabricados. El hormigón de referencia se expuso inicialmente a una temperatura de 21 °C, en correspondencia con las condiciones comúnmente existentes para el hormigón in situ, antes de ser tratado posteriormente en húmedo durante tres o siete días. Similar al caso anterior, las mezclas para prefabricados se almacenaron en primer lugar a 21 °C durante cuatro horas. A continuación, en un plazo de dos horas, se aumentó la temperatura antes de exponer las probetas a 21, 30, 40 o 50 °C; tras otras 18 horas más, las probetas cilíndricas se desencofraron y la superficie de ensayo se expuso al secado (21 °C y 60% de humedad del aire).

La resistencia a la carbonatación y la resistencia a los cloruros del hormigón fueron evaluadas tras 28 días de tiempo de curado mediante ensayos de carbonatación acelerada y mediante ensayo de migración de cloruros (NT Build 492) [12 - 14].

Los estudios experimentales abarcaron los siguientes métodos de ensayo:

- Resistencia a la compresión (1, 7 y 28 días).
- Los ensayos de migración de cloruro se realizaron de acuerdo con la norma NT Build 492, en los cuales la migración de cloruro resultante se mide después de aplicar una diferencia de potencial de 30 V durante 24 horas [13].
- La carbonatación acelerada se determinó según la norma ISO 1920, exponiendo las probetas de hormigón a una concentración elevada de dióxido de carbono (2,5%) durante un período de 56 días [14].

Resultados de la investigación

La influencia del fraguado térmico en el desarrollo de la resistencia a la compresión

La influencia del tratamiento térmico en el desarrollo de la resistencia a la compresión en base a los resultados obtenidos en la UCT se muestra en las figuras 2 y 3 (incluyendo barras de error para la desviación estándar). Como esperado, en comparación con el hormigón curado en agua o en condiciones ambientales, el fraguado térmico conduce a resistencias inicialmente más altas, especialmente a una edad temprana, con valores considerablemente más altos en el primer día tras la fabricación. Tras un periodo de 28 días, la resistencia a la compresión de las probetas con fraguado térmico seguía siendo superior a la de las probetas curadas en condiciones ambientales, especialmente en el caso del hormigón producido con cemento de uso general (GP). En líneas generales, en este estudio no se observó ningún efecto negativo significativo del fraguado térmico sobre la resistencia a la compresión en edades avanzadas.

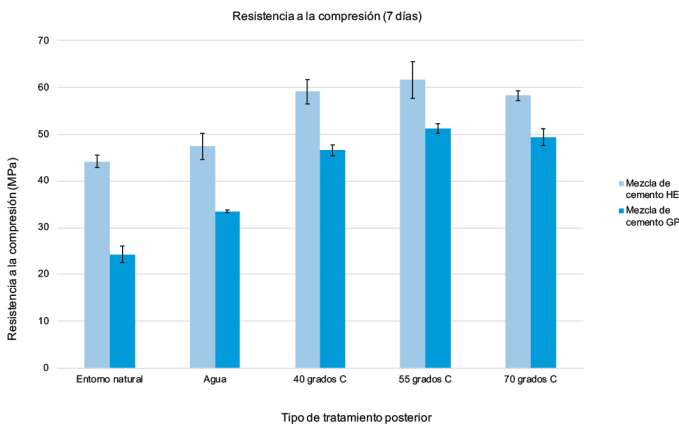


Fig. 2: Influencia de la temperatura inicial del tratamiento posterior en la resistencia a la compresión de 24 horas

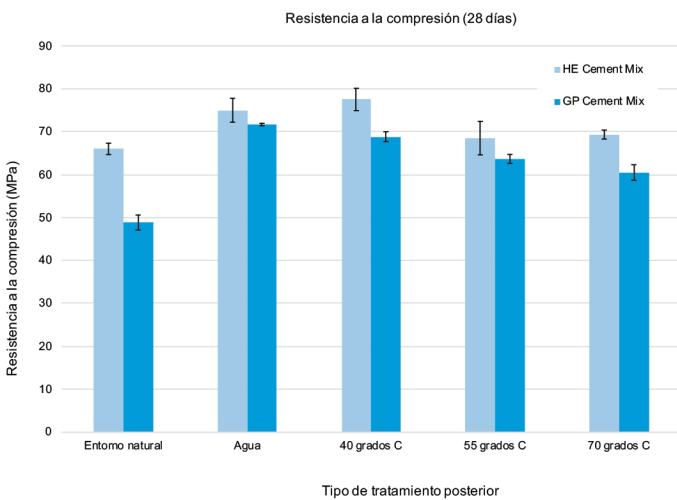


Fig. 3: Influencia de la temperatura inicial del tratamiento posterior en la resistencia a la compresión a los 28 días

Coefficiente de permeabilidad

Los resultados de los ensayos de permeabilidad al oxígeno se muestran en la figura 4. Un valor más bajo indica un hormigón con mayor durabilidad. En líneas generales, el fraguado térmico no tuvo ningún efecto negativo sobre las propiedades de durabilidad de las composiciones de mezcla estudiadas, independientemente del tipo de cemento. Para todas las temperaturas de curado, el coeficiente de permeabilidad se correspondió con los valores medidos en las probetas almacenadas completamente en agua y fue considerablemente inferior al del hormigón curado en condiciones ambientales simuladas.

Resistencia a los cloruros

Los ensayos realizados en la Universidad de Canterbury sobre la resistencia a los cloruros para hormigones de las clases de resistencia 30 y 35 MPa mostraron valores relativamente malos, incluso después de un almacenamiento en

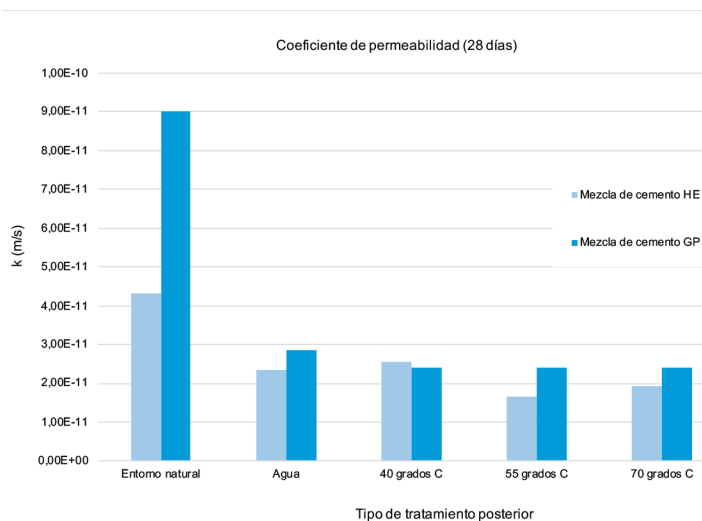


Fig. 4: Influencia de la temperatura inicial del tratamiento posterior en el coeficiente de permeabilidad

húmedo durante tres o siete días (fig. 5). Los coeficientes de migración de cloruros determinados a partir de los valores de los ensayos fueron superiores a $18 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, mientras que el hormigón para prefabricados mostró una resistencia a los cloruros entre moderada y buena, con coeficientes de difusión entre $6-15 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. La temperatura inicial óptima para el tratamiento posterior fue de unos 40 °C; cuando la temperatura se aumentó a 50 °C se midieron coeficientes de difusión más altos. Otros investigadores ya han descrito un efecto similar del tratamiento térmico [15, 16]. En general, el hormigón que contenía cemento HE presentó coeficientes de migración menores en comparación con hormigones similares fabricados con cemento GP.

Carbonatación acelerada

La carbonatación acelerada se determinó según la norma ISO 1920, exponiendo las probetas de hormigón con una edad de 28 días a una concentración de dióxido de carbono de 2,5%. La profundidad de carbonatación se determinó tras 56 días de exposición en la cámara de carbonatación (fig. 6). Los resultados muestran que las mezclas de hormigón para prefabricados tienen una profundidad de carbonatación similar o inferior y, por tanto, una mayor durabilidad en comparación con el hormigón de referencia, incluso sin un curado húmedo activo. Las profundidades de carbonatación también disminuyeron con el aumento de la madurez inducido por el calentamiento del hormigón (las temperaturas de curado iniciales más altas resultaron en una mayor resistencia a la carbonatación).

Discusión

Para determinar el tiempo necesario del tratamiento posterior, la mera observación de la madurez del hormigón a altas temperaturas de curado sólo proporciona una imagen insuficiente y, por lo general, sólo es aplicable para temperaturas inferiores a 50 °C. Además, la estimación de la durabilidad del hormigón a partir de la resistencia a la compresión es equívoca, algo que es especialmente válido para hormigo-

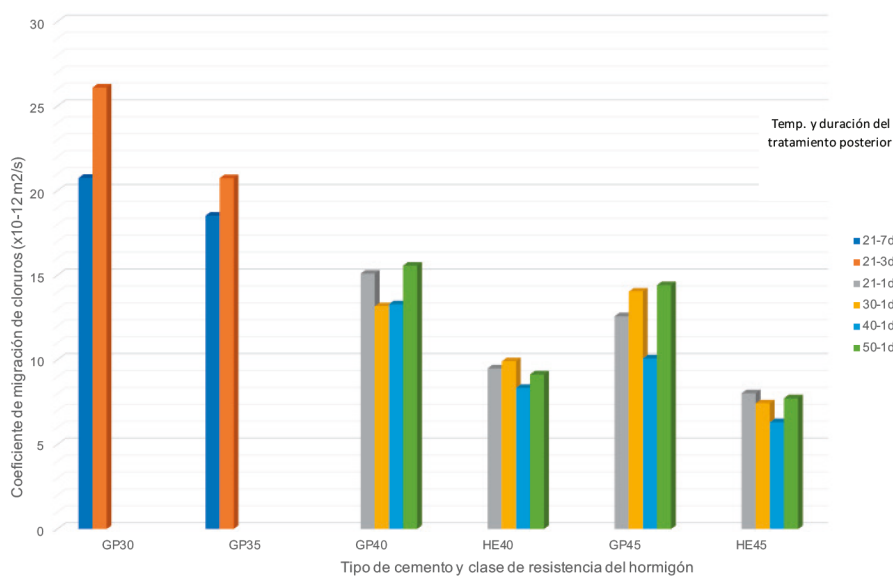


Fig. 5: Coeficientes de migración de cloruros medidos tras 28 días de tiempo de curado

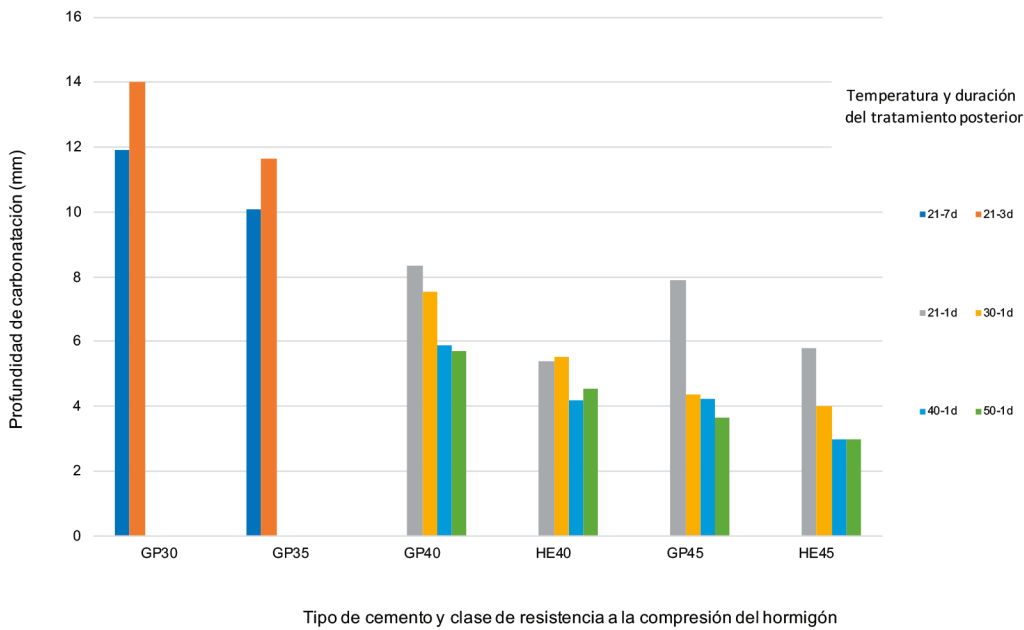


Fig. 6: Resultados de los ensayos de carbonatación acelerada tras 56 días de exposición

nes producidos con ligantes de reactividad lenta, como p. ej. hormigones con cenizas volantes. Esto puede apreciarse en la figura 7, donde se compara la resistencia a la compresión tras la finalización del correspondiente tratamiento posterior con el coeficiente de migración de cloruros a los 28

días. Mientras que el hormigón para prefabricados con tratamiento posterior de 24 horas mostró una relación razonable con la madurez (p. ej., una resistencia al cloruro de moderada a buena con una resistencia superior a 24 MPa), los hormigones de referencia, si bien en algunos casos mostraron resis-

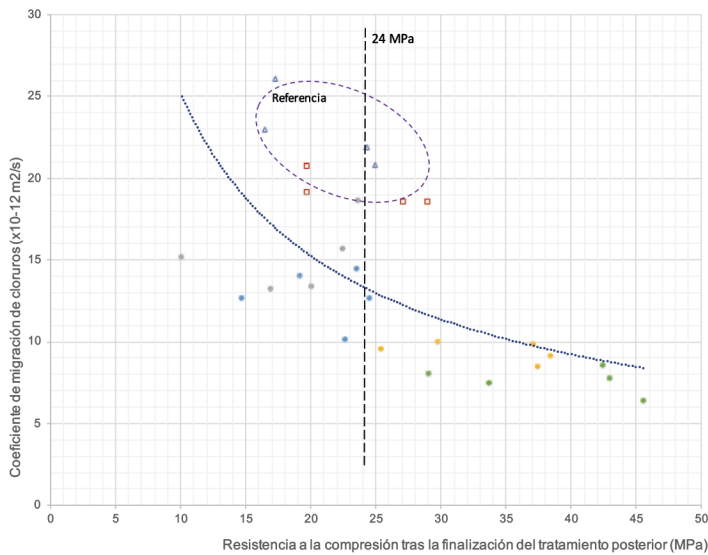
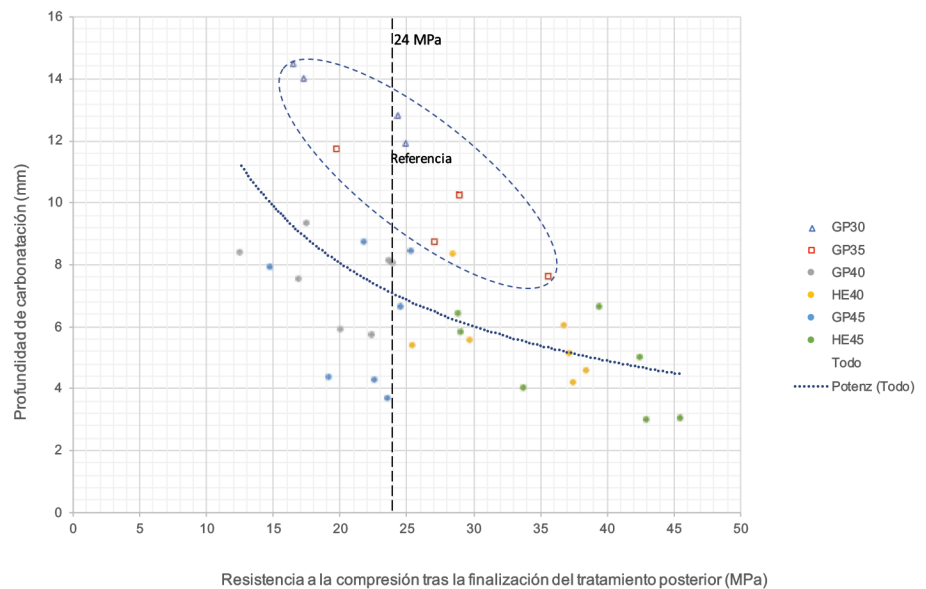


Fig. 7: Comparación de la resistencia a la compresión tras la finalización del respectivo tratamiento posterior con el coeficiente de migración de cloruros a los 28 días

Fig. 8: Comparación de la resistencia a la compresión (tras la finalización del respectivo tratamiento posterior) con la profundidad de carbonatación



tencias superiores a 24 MPa, mostraron sin embargo valores bajos de resistencia a los cloruros.

De forma similar, la utilización del planteamiento del índice de madurez no proporciona una base fiable para predecir la resistencia a la carbonatación, algo que se constató sobre todo para los hormigones de referencia con una resistencia moderada de unos 30 MPa. Esto se muestra en la figura 8: en los ensayos según la norma ISO 1920, el hormigón de referencia con menor resistencia mostró sistemáticamente mayores profundidades de carbonatación en comparación con el hormigón para prefabricados.

Recomendaciones

Cuando los productores de prefabricados de hormigón, debido a los requisitos de resistencia inicial, utilizan un hormigón con una resistencia superior a la requerida en el proyecto de construcción, esto no permite únicamente una manipulación más temprana, sino que también suele generar un mayor potencial de durabilidad. Esta mejora en la calidad de la microestructura del hormigón también se hace evidente

cuando el curado inicial se lleva a cabo sin tratamiento activo por humedad. Para aprovechar las ventajas asociadas en la producción, debería desarrollarse un método de control de calidad con el cual pudiera optimizarse las composiciones de las mezclas y los métodos de producción. Una posibilidad práctica sería utilizar métodos de ensayo basados en el rendimiento en combinación con indicadores de durabilidad.

La experiencia en el suministro de elementos prefabricados de hormigón revela que los prefabricados frecuentemente se fabrican con un hormigón de dos clases de resistencia superior a la especificada (p. ej., clase 40 MPa para 30 MPa o 45 MPa para 35 MPa). El presente estudio ha evidenciado que este procedimiento suele garantizar una durabilidad suficiente, incluso si los elementos prefabricados de hormigón no se someten a un tratamiento posterior activo con humedad.

En general, los ingenieros de proyecto y los fabricantes de prefabricados de hormigón deberían tener en cuenta la mayor resistencia prevista y la consecuente mejor durabilidad en comparación con el hormigón in situ en su diseño constructivo y conceptual de los componentes.

Conclusiones

Los resultados del presente estudio muestran que el planTEAMIENTO del índice de madurez ofrece poca utilidad para estimar el tiempo necesario del tratamiento posterior para un hormigón de resistencia moderada. Esto quedó patente al comparar el rendimiento del cemento HE con el del cemento GP y también al analizar los cambios microestructurales que se producen a altas temperaturas de curado. Para elevadas temperaturas de curado, normalmente superiores a 50 - 60 °C, y para diferentes tipos de hormigón, los simples cálculos de madurez no suelen proporcionar una base fiable para evaluar las propiedades de durabilidad.

La calidad del recubrimiento de hormigón puede verse influenciada por la temperatura y la duración del tratamiento posterior aplicado en la fábrica de prefabricados. Este efecto puede controlarse y evaluarse con la implementación de un programa de control de calidad experimental adecuado, basado en la medición de indicadores sencillos de durabilidad.

Agradecimiento

La Universidad de Canterbury agradece la financiación por parte de Precast Sector of Concrete New Zealand, que permitió la compra de la cámara de carbonatación. ■

Bibliografía

- [1] American Society for Testing and Materials, ASTM C1074 - Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method, ASTM, 2017.
- [2] Verbeck, J.G. and Helmuth, R.H., 'Structures and physical properties of cement paste', Proc. 5th Int. Cong. Chem. Cem. Tokyo, (1968).
- [3] Reinhardt, R.-W. and Stegmaier, M., 'Influence of heat curing on the pore structure and compressive strength of SCC', Cement and Concrete Research, 36 (2006) 879-885.
- [4] Detwiler, R.J., Fapohunda, C.A. and Natale, J., 'Use of supplementary cementing materials to increase the resistance to chloride ion penetration of concretes cured at elevated temperatures', ACI Mater. J. 91 (1994), 63-66.
- [5] Ballim, Y. and Graham, P.C., 'A maturity approach to the rate of heat evolution in concretes', Mag. Conc. Res., 55 (2003) 249-256.
- [6] Mackechnie, J., Scott, A. (2019), 'Time to cessation of curing of concrete using the maturity method or by equivalent durability testing', Concrete NZ Conference, 2019.
- [7] Standards Australia, AS 3600:2018 - Concrete structures standard, 2018, Canberra, Australia.
- [8] Mackechnie, J., Scott, A., Beushausen, H., Shah, V. (2021), 'Time to Cessation of Curing for Precast Concrete Based on Equivalent Durability Performance', SESOC Journal - Structural Engineering Society of New Zealand, Vol. 34, April 2021, pp. 66 - 73.
- [9] Nganga, G., Alexander, M.G., Beushausen, H., 'Practical Implementation of the Durability Index performance-based design approach', Construction and Building Materials, Vol 45, August 2013, pp. 251-261, 2013.
- [10] South African Bureau of Standards (SABS). South African National Standard (SANS): Civil engineering test methods Part CO3-1: Concrete durability index testing - Preparation of test specimens (SANS 3001-CO3:2015). Pretoria. SABS Standards Division, 2015.
- [11] South African Bureau of Standards (SABS). South African National Standard (SANS): Civil engineering test methods Part CO3-2: Concrete durability index testing - Oxygen permeability test (SANS 3001-CO3-2:2015). Pretoria. SABS Standards Division, 2015.
- [12] Alexander, M.G. and Beushausen, H. (2019), 'Durability, service life and modelling for reinforced concrete structures - review and critique', Cement and Concrete Research, 122, 17-29.
- [13] Nordtest Method, NT Build 492 - Chloride migration coefficients from non-steady-state migration experiments, 1999, Finland.
- [14] International Standards Organization, ISO 1920-12: Determination of the carbonation resistance of concrete - accelerated carbonation method, Geneva, 2015.
- [15] Wang, Q., Shi, M., Wang, D., 'Influence of elevated curing temperature on the properties of cement paste and concrete at the same hydration degree', Wuhan Univ. of Tech. (2017) 1344-1351.
- [16] Garcia Calvo, J.L., Alonso, M.C., Fernandez Luco, L., Robles Velasco, M., 'Durability performance of sustainable self-compacting concretes in precast products due to heat curing', Constr. Build. Mater. 111, (2016) 379-385.