

DEFORMABILIDAD DE MORTERO Y HORMIGÓN EN EL CONTEXTO DE IMBIBICIÓN CAPILAR

Natalia Alderete¹, Yury Villagran Zaccardi^{1,2}, Nele De Belie¹

¹ Magnel-Vandepitte Laboratory for Structural Engineering and Building Materials, Ghent University, Campus Ardoyen, B-9052 Gent, Bélgica, NataliaMariel.Alderete@ugent.be

² LEMIT, CONICET, La Plata, Argentina

RESUMEN

Generalmente, las deformaciones en el hormigón están asociadas con cargas mecánicas. Sin embargo, el ingreso de agua mediante fuerzas capilares (succión/imbibición capilar) también genera deformaciones en los materiales cementíceos. La retención de agua en la estructura del silicato de calcio hidratado (C-S-H) conlleva un hinchamiento. Las deformaciones externas asociadas a este proceso están asociadas a la naturaleza higroscópica de la matriz cementícea, particularmente del C-S-H, la porosidad y las restricciones dentro de dicha matriz. Similarmente, otras deformaciones del hormigón también están relacionadas con dichos parámetros. Por lo tanto, resulta interesante comparar la deformación provocada durante succión capilar y otras deformaciones sufridas por el hormigón (como contracción por secado). Este trabajo presenta una comparación entre los valores de deformación medidos durante imbibición capilar y aquellos en la literatura referidos a contracción por secado. Considerar al hormigón como un material completamente rígido durante imbibición capilar no describe completamente el fenómeno.

Palabras claves: succión/imbibición capilar, deformaciones, silicato de calcio hidratado, durabilidad, propiedades de transporte

INTRODUCCIÓN

Las deformaciones en el hormigón son normalmente asociadas con cargas externas mecánicas. Sin embargo, la variación en el contenido de humedad y en particular la exposición al ingreso de agua mediante fuerzas capilares (succión/imbibición capilar) también genera deformaciones en los materiales cementíceos. En este contexto, el término imbibición podría resultar más apropiado al de succión, ya que el primero considera una deformación asociada al proceso de transporte mientras que el segundo concibe a un material rígido. De hecho, estas deformaciones probablemente son las causantes de la desviación de la linealidad del incremento de peso con respecto a la raíz cuadrada del tiempo. Dicha falta de linealidad, también conocida como comportamiento anómalo, surgiría en materiales cementíceos debido a la retención de agua en la estructura del silicato de calcio hidratado (C-S-H), que causa una variación volumétrica (hinchamiento). Este proceso ha sido descrito de manera teórica considerando un modelo mejorado a base de la raíz cuarta del tiempo [1]. A su vez, la principal hipótesis de dicho modelo (i.e. las deformaciones causadas por el hinchamiento del C-S-H) fueron demostradas experimentalmente [2]. Estas deformaciones externas están determinadas por la naturaleza higroscópica de la matriz cementícea, particularmente del C-S-H, la porosidad y las restricciones internas en dicha matriz. Similarmente, otras deformaciones del

hormigón relacionadas con la humedad (como ser creep o contracción por secado) también están vinculadas con dichos parámetros. Por lo tanto, resulta interesante comparar la deformación provocada durante la imbibición capilar y otras deformaciones sufridas por el hormigón.

Las deformaciones diferidas sufridas por el hormigón durante su vida en servicio varían de acuerdo a su origen, la duración de la exposición y la fuente de deformación. En la literatura se puede encontrar una variedad de estudios sobre las deformaciones debido a la combinación de cargas y ataque por sulfatos o cloruros [3], cargas mecánicas de larga duración que causan creep [4,5], fatiga [6], contracción por secado [7], y otros. Particularmente para el caso de creep y contracción por secado, la respuesta de la matriz cementícea depende de la humedad relativa a la que se encuentre expuesta y el contenido de C-S-H (que es la fase más deformable de la matriz). La deformabilidad de un material sólido compuesto, especialmente tan complejo como el hormigón, resulta relevante desde un punto de vista teórico como práctico. En este sentido, Thomas y Jennings [8] presentaron un modelo mediante al cual el grado de restricción de un compuesto puede ser determinado. Para lo cual, la porosidad, la cantidad de fases deformables y la cantidad de fases no deformables deben ser conocidas. Así, es posible obtener un análisis más detallado de la relación entre las deformaciones y la composición del material.

Este trabajo presenta una comparación entre los valores de deformación medidos durante imbibición capilar y aquellos en la literatura referidos a la contracción por secado. La comparación se muestra ventajosa en el sentido de que ambos procesos están relacionados con la higroscopicidad del C-S-H y el transporte de agua en la estructura de poros. Este análisis busca evidenciar que el grado de restricción influye tanto la contracción por secado como la imbibición capilar de manera similar.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se elaboraron muestras de mortero con una relación agua/ligante (a/l) igual a 0,45. El volumen de agregado (arena silícea) en el mortero representó el 60 %, por lo que esta mezcla se denominó S60. Para comparar el efecto del grado de restricción, también se elaboró un hormigón con a/l 0,45 y 75 % de volumen de agregado (denominado C75). Las muestras fueron curadas durante 28 días en cámara húmeda a 20 ± 2 °C y 95 ± 5 % humedad relativa. Las muestras fueron acondicionadas a 50 °C hasta las diferencias de una pesada consecutiva cada 24 h sea menor que 0.1 %, luego fueron envueltas en doble bolsa de plástico por dos semanas para asegurar una distribución homogénea de la humedad. Detalles sobre los materiales y la elaboración de las puede encontrarse en [2].

Para determinar las variaciones volumétricas durante la imbibición capilar se adosaron galgas extensométricas en cada muestra, en forma vertical a lo largo de la altura de la probeta (Figura 1). La deformación fue registrada continuamente durante todo el ensayo.

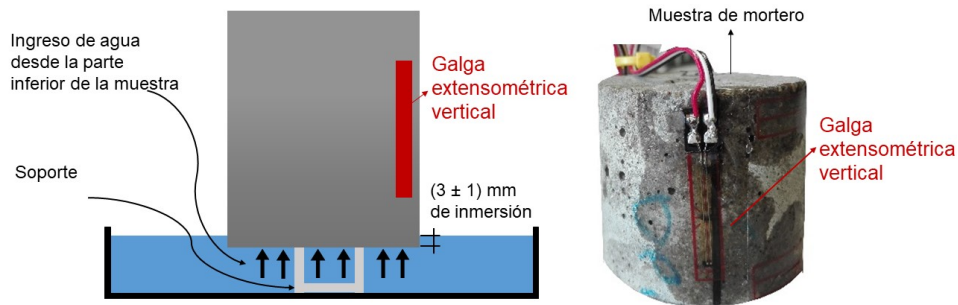


Figura 1: Esquema del ensayo y la posición de la galga extensométrica (izquierda), foto de la muestra de mortero con la galga extensométrica adherida (derecha).

Para la comparación con otras deformaciones en materiales cementíceos, se utilizaron los datos publicados por Wei et al [9]. Dichos autores evaluaron la contracción por secado en muestras de pasta (P) con $a/l = 0,45$ y en morteros también con $a/l = 0,45$ y con diferentes contenidos de arena cuarcítica (Q) como inclusiones no deformables. Se muestran los resultados de 3 morteros con 10 % (Q10), 30 % (Q30) y 55 % (Q55) del volumen total de la mezcla. Para mantener la trabajabilidad, utilizaron también un aditivo reductor de agua. Las muestras fueron ensayadas luego de 28 días de curado en agua saturada con cal. Las muestras fueron acondicionadas a 50 °C y 80 % humedad relativa por 3 días, y luego fueron guardadas en un contenedor sellado por 15 días.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

La Figura 2 muestra las deformaciones sufridas durante contracción por secado de P, Q10, Q30, Q55 y las deformaciones durante imbibición capilar de S60_V (representa la medición de la galga extensométrica en posición vertical). Para facilitar la comparación, se muestran los resultados de las deformaciones en valor absoluto respectivas a la contracción por secado (originalmente negativas) y las deformaciones durante imbibición capilar (originalmente positivas). La ganancia de peso por imbibición capilar ha sido analizada en publicaciones anteriores [2,10], donde puede ser consultada. Las deformaciones medidas pueden ser entonces únicamente asociadas a este proceso de transporte de agua por capilaridad. El interés del presente trabajo se limita entonces a verificar si estos resultados de deformación son comparables a los de Wei et al [9] respecto a la restricción impuesta por los agregados inertes en estos dos procesos de transporte diferentes. Es decir, vincular la deformación directamente con el estado higroscópico del C-S-H y con independencia del fenómeno de transporte involucrado. Si bien el pre-acondicionamiento de las muestras de Wei et al [9] y las muestras preparadas en este trabajo no son idénticos, se asume que la diferencia es de segundo orden y que prevalece el grado de restricción como factor determinante.

Los resultados muestran como el aumento de la inclusión de fases no deformables (arena cuarcítica) disminuye las deformaciones de contracción por secado. Wei et al. [9] indicaron que las inclusiones rígidas redujeron la contracción por secado debido al aumento del grado de restricción de las muestras. Esto concuerda con el modelo propuesto por Thomas y Jennings [8] y el análisis presentado en [2] sobre la aplicación de dicho modelo a los materiales cementíceos. Al considerar al hormigón como un conjunto de fases que se pueden deformar (principalmente el C-S-H) y fases inertes, la relación entre dichas fases y la porosidad determinan el grado de restricción del sistema. Así, las deformaciones son menores con mayor grado de restricción. Esto resulta aplicable tanto para la contracción por secado como para la imbibición capilar.

Aunque generalmente no se asume que los materiales cementíceos se deforman durante imbibición capilar, los resultados confirman deformaciones comparables a las de

contracción por secado. Si se contrastan las deformaciones a 28 días obtenidas por imbibición capilar en la galga extensométrica vertical y las deformaciones medidas por Wei et al. [9], los valores son similares (aunque la deformación de Q55 es ligeramente superior que S60_V). La porosidad - predominantemente influenciada por la a/l - es similar en ambas mezclas ($a/l = 0,45$ en ambos casos). El contenido de fases no deformables es 55 % de arena cuarcítica en Q55 y 60 % de arena silíceas en S60, lo que concuerda con la menor deformación sufrida por S60_V. La comparación muestra como el material cementíceo puede ser considerado un conjunto de fases deformables y no deformables más la fracción de poros. De esta manera, la contracción o expansión del C-S-H dependerá fundamentalmente del grado de restricción.

Esto demuestra que hay un mecanismo similar actuando en ambos procesos de deformación (secado e ingreso de agua), y que los parámetros más influyentes sean probablemente la porosidad y el contenido y condición higroscópica de las fases deformables. Sin embargo, en términos cuantitativos la comparación no debe ser tomada literalmente, ya que los esquemas de medición de deformaciones en el presente estudio y el de Wei et al. difieren, aportando información ligeramente disímil. Finalmente, las deformaciones medidas en el hormigón, con mayor grado de restricción debido a la presencia de agregado grueso, son menores que en el caso del mortero, lo cual confirma el aumento del grado de restricción interna. Estos resultados preliminares promueven la realización de mayores investigaciones que permitan confirmar estas hipótesis.

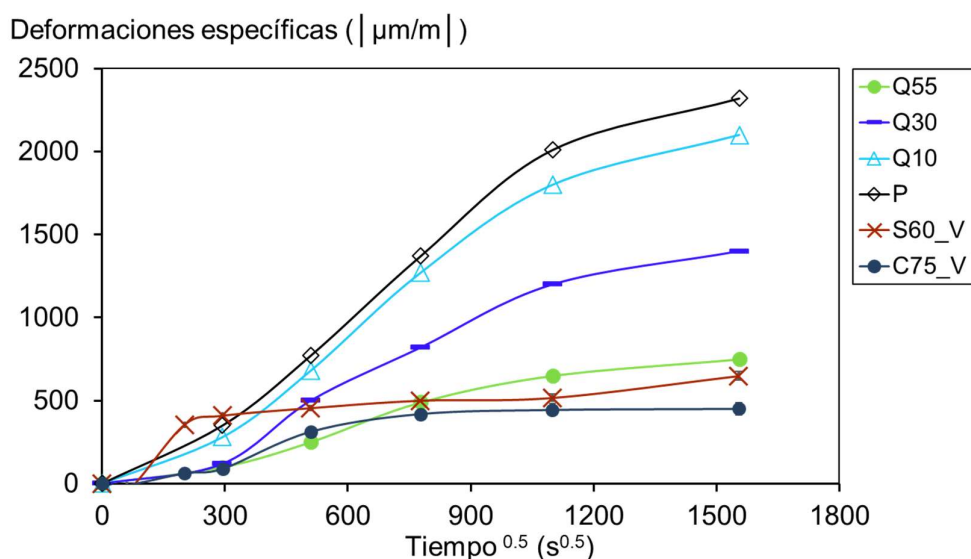


Figura 2: Deformaciones en pasta, mortero y hormigón debido a contracción por secado (P, Q10, Q30 y Q55) y a imbibición capilar (S60_V y C75_V).

CONCLUSIONES

Las deformaciones sufridas por los materiales cementíceos por variaciones en el contenido de humedad están estrechamente relacionados con el grado de restricción de la mezcla. En este trabajo se muestran los resultados preliminares obtenidos al evaluar deformaciones durante capilaridad y su comparación con la contracción por secado. Las mediciones permiten dar por confirmado el concepto, mientras que restan estudios cuantitativos que brinden cuantificaciones al respecto. Las comparaciones realizadas entre los resultados de contracción por secado de la literatura y de imbibición capilar evidencian como en ambos casos las deformaciones están vinculadas con la cantidad fase deformable (principalmente C-S-H).

La información provista por este análisis nos impulsa a abandonar la visión del hormigón como material rígido durante la imbibición capilar. La consideración de la matriz cementícea como completamente rígida durante la imbibición capilar ha impedido por décadas que podamos describir completamente el fenómeno y por tanto no resulta adecuada. La visualización de las implicancias de la consideración del hormigón como material deformable contribuye a explicar el desarrollo anómalo de la imbibición capilar en materiales cementíceos.

REFERENCIAS

- [1] Villagrán Zaccardi YA, Alderete NM, De Belie N, "Improved model for capillary absorption in cementitious materials: Progress over the fourth root of time", *Cem. Concr. Res.* 100 (2017) 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.07.003>.
- [2] Alderete NM, Villagrán Zaccardi YA, De Belie N, "Physical evidence of swelling as the cause of anomalous capillary water uptake by cementitious materials", *Cem. Concr. Res.* 120 (2019) 256–266. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.001>.
- [3] Ye H, Fu C, Jin N, Jin X, "Influence of flexural loading on chloride ingress in concrete subjected to cyclic drying-wetting condition", *Comput. Concr.* 15 (2015) 183–198. <https://doi.org/10.12989/cac.2015.15.2.183>.
- [4] Van Mullen T, Reybrouck N, Criel P, Taerwe L, Caspeepele R, "Contemporary Analysis and Numerical Simulation of Revisited Long-Term Creep Tests on Reinforced Concrete Beams from the Sixties", *High Tech Concr. Where Technol. Eng. Meet - Proc. 2017 Fib Symp.* (2017) 2802–2809. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-59471-2>.
- [5] Bažant ZP, Kim JK, Panula L, "Improved prediction model for time-dependent deformations of concrete: Part 1-Shrinkage", *Mater. Struct.* 24 (1991) 327–345. <https://doi.org/10.1007/BF02472066>.
- [6] Jiang C, Gu X, Huang Q, Zhang W, "Deformation of concrete under high-cycle fatigue loads in uniaxial and eccentric compression", *Constr. Build. Mater.* 141 (2017) 379–392. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.023>.
- [7] *Fundamental Research on Creep and Shrinkage of Concrete (Conference)*, 1980., 1982. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-3716-7>.
- [8] Thomas JJ, Jennings HM, "Changes in the size of pores during shrinkage (or expansion) of cement paste and concrete", *Cem. Concr. Res.* 33 (2003) 1897–1900. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00167-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00167-4).
- [9] Wei Z, Falzone G, Wang B, Thiele A, Puerta-Falla G, Pilon L, Neithalath N, Sant G, "The durability of cementitious composites containing microencapsulated phase change materials", *Cem. Concr. Compos.* 81 (2017) 66–76. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.04.010>.
- [10] Alderete NM, Villagrán Zaccardi YA, De Belie N, "Experimental indication of imbibition during capillary water uptake in cementitious materials", in: *RILEM (Ed.), 4th Int. Conf. Serv. Life Des. Infrastructures (SLD4)*, RILEM, Delft, 2018: pp. 231–236. <https://doi.org/Corpus ID: 210758427>.

