

Determinación del módulo de Poisson del concreto mediante correlación digital de imágenes

Determination of the Poisson's ratio of concrete using digital image correlation

Juan B. Pascual-Francisco^a, Cristian A. Cabrera-Higuera^b, Jorge M. Gutiérrez-Vaquero^b, Alexander López-González^{b,*}, Adán Jiménez-Montoya^c, Javier Hernández-Pérez^a

^a Departamento de Mecatrónica, Universidad Politécnica de Pachuca, Carretera Pachuca-Cd. Sahagún Km. 20, Ex-Hacienda de Santa Barbara, Zempoala 43830, Hidalgo, México.

^b Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chiapas, Boulevard Belisario Domínguez Km 1081, Col. Terán, Tuxtla Gutiérrez 29050, Chiapas, México.

^c División de Ingeniería Civil, Tecnológico Nacional de México TES-San Felipe del Progreso, San Felipe del Progreso 50640, México.

Resumen

La caracterización de propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad y el de Poisson es fundamental para predecir el comportamiento mecánico de los materiales y optimizar el diseño estructural. El módulo de Poisson, en particular, presenta retos experimentales debido a que requiere alta precisión en la medición de pequeñas deformaciones. Este trabajo propone una metodología experimental para la determinación del módulo de Poisson en materiales de concreto mediante correlación digital de imágenes (DIC). Se elaboraron muestras cúbicas de dos diferentes diseños de mezclas de concreto. El arreglo experimental consiste de un sistema de aplicación de fuerza de compresión uniaxial y un sistema de medición de deformaciones basado en DIC. Este sistema monitorea simultáneamente las deformaciones en las direcciones axial y transversal, a partir de las cuales se calcula el módulo de Poisson. Los resultados muestran que esta metodología es una alternativa confiable para caracterizar esta propiedad mecánica del concreto mediante ensayos de compresión.

Palabras Clave: Módulo de Poisson, Ensayo de compresión, Correlación digital de imágenes, Resistencia a la compresión.

Abstract

The characterization of mechanical properties such as the modulus of elasticity and Poisson's ratio is essential for predicting the mechanical behavior of materials and optimizing the structural design. Poisson's ratio, in particular, presents experimental challenges due to that it requires high precision in measuring small deformations. This study proposes an experimental methodology for determining Poisson's ratio in concrete materials using Digital Image Correlation (DIC). Cubic samples were prepared from two different concrete mix design. The experimental setup includes a uniaxial compression loading system and a deformation measurement system based on DIC. This system simultaneously measures the strains in the axial and transverse directions, from which Poisson's ratio is calculated. The results demonstrate that this methodology is a reliable alternative for characterizing this mechanical property of concrete through compression testing.

Keywords: Poisson's ratio, Compression test, Digital image correlation, Compressive strength.

1. Introducción

El estudio de las propiedades mecánicas del concreto, especialmente la resistencia a la compresión y el módulo de Poisson, es esencial para entender su desempeño estructural bajo diversas condiciones de carga. Estas propiedades están influenciadas principalmente por el tiempo y el tipo de curado, los cuales afectan la hidratación del cemento y el desarrollo de

la microestructura del concreto. El curado adecuado garantiza una mayor resistencia y durabilidad del material, mejorando sus características mecánicas a medida que el proceso de hidratación progresa (Neville, 2012). La relación entre el tiempo de curado y el desarrollo de la resistencia a la compresión es bien conocida, evidenciando un aumento significativo en los primeros 28 días, estabilizándose posteriormente a largo plazo (Mehta & Monteiro, 2014). Si

*Autor para la correspondencia: alexander.lopez@unach.mx

Correo electrónico: jbpascualf@hotmail.com (Juan B. Pascual-Francisco), cristian.cabrera63@unach.mx (Cristian A. Cabrera-Higuera), jorge.gutierrez@unach.mx (Jorge M. Gutiérrez-Vaquero), alexander.lopez@unach.mx (Alexander López-González), adan.jm@sfelipeprogreso.tecnm.mx (Adán Jiménez-Montoya), jahdez@upp.edu.mx (Javier Hernández-Pérez).

bien, el proceso de curado del concreto en condiciones húmedas es lo ideal para alcanzar la resistencia mecánica esperada, en muchas aplicaciones reales el curado puede llegar a no ser realizado. En muchos casos se agregan aditivos a la mezcla que promueven la retención del agua y mantienen la humedad interna del concreto durante el periodo de fraguado (Chyliński et al., 2022). Sin embargo, generalmente estos aditivos son químicos que pueden tener impactos ambientales negativos. Por lo tanto, es importante explorar nuevas alternativas ecológicas que permitan promover un proceso de curado al aire libre sin comprometer la resistencia del concreto.

A diferencia de la resistencia a la compresión, el módulo de Poisson ha sido menos estudiado debido a la dificultad de medirlo de manera precisa en los elementos de concreto. Sin embargo, se ha demostrado que esta propiedad varía en función del tiempo de curado y de los métodos de curado empleados, con un aumento de rigidez y una disminución de la deformación lateral conforme el concreto madura (Persson, 1999).

La técnica de correlación digital de imágenes (DIC) ha emergido como una herramienta avanzada para medir desplazamientos y deformaciones en 2D y 3D de manera precisa y no invasiva. La DIC permite registrar y analizar las deformaciones en la superficie del material estudiado bajo carga, proporcionando una medición directa de la relación de Poisson sin necesidad de contacto físico con el material (Bello et al., 2023). Esta técnica ha demostrado ser eficaz para estudiar la deformación en diferentes materiales incluyendo metálicos (Zheng et al., 2020), poliméricos (Pascual-Francisco et al., 2020; Sotomayor-del-Moral et al., 2022) y concreto (Bhosale & Prakash, 2020; Hernández-Pérez et al., 2025; Suchánek et al., 2018; S. Yang et al., 2024), capturando las distribuciones de esfuerzos y deformaciones de forma detallada (Y. Yang et al., 2024).

A pesar de los avances en el uso de la DIC para medir el módulo de Poisson en diferentes materiales de ingeniería, existen pocos estudios que exploren esta técnica en la obtención de esta propiedad mecánica en concretos. En este artículo, se presenta una metodología experimental para la obtención del módulo de Poisson en concretos mediante ensayos de compresión utilizando probetas cúbicas. Adicionalmente, con el objetivo de evaluar si el nopal como aditivo en un concreto sin curar (al aire libre) puede lograr propiedades mecánicas comparables a las de un concreto estándar bajo condiciones de curado ideales (inmersión en agua), se prepararon muestras adicionadas con fibra de nopal en polvo, además de las muestras patrón.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño de las mezclas de concreto

Se analizaron dos tipos de concreto: patrón y concreto con adición, con relación agua/cemento de 0.46 y diseñados para una resistencia característica de $f'_c = 350 \text{ kg/cm}^2$, de acuerdo a la norma ACI-211 (American Concrete Institute, 2022). En la Tabla 1 se resumen los materiales y sus respectivas proporciones para las mezclas estudiadas. La mezcla con adición consiste en la incorporación de fibras de nopal (polvo de nopal deshidratado de grado alimenticio, de la

marca Diquítra), con una relación de 4 % del peso del cemento, manteniendo las proporciones mostradas en la Tabla 1.

Tabla 1: Composición de las mezclas.

Materiales	Características
Cemento Portland	CPC 30 R-RS
Agua	Sin contaminantes
Agregado grueso (grava granítica)	Tamaño máximo nominal 25 mm, densidad de 2.6 kg/cm^3 , 2.14% de absorción de agua y peso volumétrico de 1570 kg/m^3 .
Agregado fino (de río)	Densidad de 2.219 g/cm^3 , 2 % de absorción de agua y módulo de finura de 2.8.

2.2. Preparación de las muestras

En este estudio se fabricaron dos tipos de probetas: cilíndricas y cúbicas. Las probetas cilíndricas se usaron para los ensayos de resistencia a la compresión de los concretos. Por otro lado, las probetas cúbicas se usaron para la implementación de la técnica DIC, ya que uno de los requisitos de esta técnica es que las muestras tengan superficies planas. Las muestras cilíndricas se manufacturaron mediante moldes de acero de 10 cm de diámetro por 20 cm de alto, y las cúbicas mediante moldes de $15 \times 15 \times 15 \text{ cm}$. Las probetas cilíndricas se realizaron de acuerdo a la Norma NMX C159 ONNCCE 2016 (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., 2016), mientras que las cúbicas mediante la norma UNE-EN 12390-3:2019 (Organización Europea de Normalización, 2019). Ambas muestras fueron desmoldadas a las 24 horas. Las muestras patrón se colocaron en un cuarto de curado por inmersión, de acuerdo a las mismas normas mencionadas, mientras que las muestras con nopal se curaron al aire libre dentro del laboratorio. Los ensayos se realizaron para 3 tiempos de curado: 7 días, 14 días y 28 días. Tanto para las muestras cilíndricas como para las cúbicas, se realizaron 3 y 2 pruebas de repetibilidad, respectivamente.

Antes de realizar los ensayos de compresión, se preparó una de las caras de cada muestra cúbica para la medición mediante correlación digital de imágenes (DIC). Para ello, primero se aplicó una capa de pintura blanca sobre la superficie con una brocha. Luego de dejar secar durante unos minutos, se generó un patrón moteado utilizando plumones de color negro. El patrón de moteado debe ser uniforme y con buen contraste. En la Figura 1 se muestra un ejemplo de una probeta con patrón de moteado.

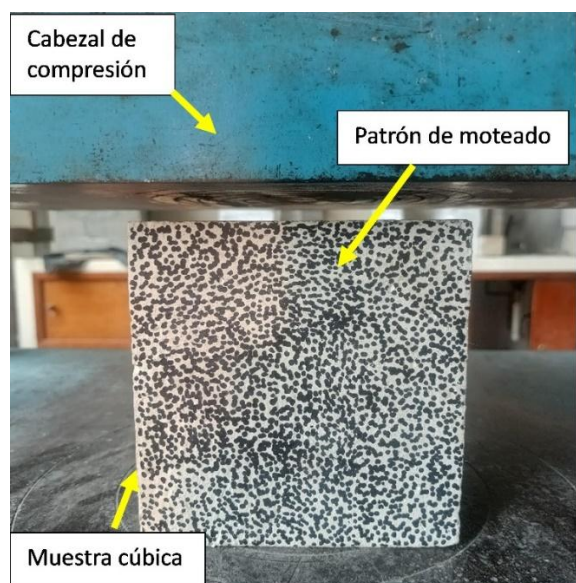


Figura 1: Muestra de concreto con patrón de moteado.

2.3. Arreglo experimental

El arreglo experimental implementado en este trabajo se muestra en la Figura 2. Consiste de una máquina de compresión uniaxial (FORNEY Modelo LT-1150), con capacidad de 150 toneladas, y un sistema de medición de deformaciones basado en correlación digital de imágenes (DIC). El sistema DIC consta de una cámara CCD Phantom con resolución de 1632x1200 píxeles, una tarjeta digitalizadora y un software de procesamiento (ISTRA 4D). El proceso de calibración del sistema consiste en posicionar una tarjeta de calibración en el mismo plano en que se colocaría la cara de la probeta a analizar, y capturar 8 imágenes. Esto con la finalidad de que el software ISTRA 4D establezca la relación entre las dimensiones del campo de visión y el número de píxeles en la imagen. Para el experimento, la cámara se posicionó a una distancia de 0.92 m, abarcando un campo de visión de 30x20 cm. Como la prueba de compresión es un proceso cuasi estático, es decir, el incremento de la fuerza de compresión y de la deformación es progresiva, la velocidad de adquisición se estableció a 1 fotograma por segundo. La adquisición de las imágenes con la aplicación de la carga de compresión se hizo de manera manual. Es decir, al momento de iniciar la prueba se acciona simultáneamente el clic del botón de iniciación de la captura de imágenes y el botón de encendido de la máquina de compresión. El conjunto de imágenes registrada durante cada prueba se guardó en la memoria de la computadora para ser procesado posteriormente. La velocidad de aplicación de la carga de compresión fue de 100 kg/s en promedio. La duración de las pruebas varía entre cada muestra, dependiendo de su resistencia a la compresión (entre 6 y 7 minutos).



Figura 2: Arreglo experimental del ensayo de compresión.

3. Resultados y análisis

La resistencia a la compresión promedio obtenida de los ensayos de compresión en probetas cilíndricas, para las tres edades de curado se reporta en la Tabla 2.

Tabla 2: Resistencia a la compresión promedio de los concretos (valores en kg/cm²).

Edad de curado (días)	Concreto patrón	Concreto + Nopal
7	291	284
14	306	327
28	348	332

Se puede observar que la resistencia a la compresión del concreto adicionado con nopal es ligeramente inferior a la del concreto de referencia. Si bien era previsible una reducción en la resistencia del concreto con nopal debido a que el curado se realizó al aire libre, dicha disminución representa únicamente un 4.6 % en comparación con el concreto curado en agua. Además, la resistencia del concreto con nopal ya no varía considerablemente después de los primeros 8 días, lo cual implica que el nopal ayuda a que el concreto alcance su resistencia más rápidamente. Este resultado sugiere que la adición de nopal contribuye a la retención de humedad durante el proceso de curado, lo cual previene el secado prematuro y favorece un fraguado adecuado. Considerando que el concreto no curado en agua suele perder entre un 10 y un 15 % de su resistencia a la compresión (Daniel Yaw Osei et al., 2020; Solís-Carcano et al., 2013), estos resultados preliminares indican que la incorporación de fibra de nopal representa una alternativa viable para la construcción de elementos estructurales de concreto, especialmente en condiciones donde el curado convencional no sea factible.

Para el análisis de las deformaciones unitarias en la dirección axial (eje y) y en la transversal (eje x), primero se define la región de interés (ROI, por sus siglas en inglés) sobre la cara de la muestra. En todos los casos, se usó un rectángulo para la región de interés, cubriendo lo más posible la superficie de la muestra, pero no tan cerca de las aristas, ya que en estas ocurren concentraciones de deformaciones que pueden afectar el cálculo del promedio de la deformación. El software ISTRA 4D calcula las deformaciones promedio que ocurren en el ROI para cada imagen y permite exportar estos datos en un archivo

.txt para su posterior análisis. En la Figura 3 se muestra el mapa de deformaciones en el ROI para una muestra analizada. El módulo de Poisson (ν) se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$\nu = \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y}, \quad (1)$$

donde ε_x y ε_y son los valores absolutos de las deformaciones unitarias en las direcciones transversal y axial, respectivamente. Para este cálculo se consideraron las deformaciones que ocurrieron durante el primer y segundo minuto de las pruebas o hasta donde se pueda observar un comportamiento lineal de la deformación en las direcciones axial y transversal. Por lo tanto, previo al cálculo del módulo de Poisson se graficaron las deformaciones tanto en x como en y , para determinar el número de imágenes hasta las cuales la muestra tiene un comportamiento de deformación lineal.

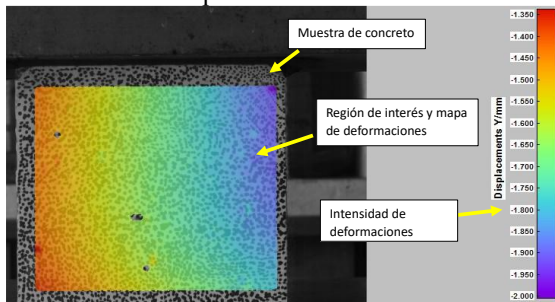


Figura 3: Mapa de deformaciones en una región de interés rectangular.

En la Figura 4, se presenta un ejemplo de las curvas de deformación unitaria en función del tiempo obtenidas con el sistema DIC. Nótese que en los primeros 60 segundos de la prueba se tiene un comportamiento lineal. Entre los 60 y 70 s, se observa una ligera curvatura y, después de los 70 s se aprecia nuevamente una relación lineal en la deformación. Para determinar con precisión la región elástica es necesario tener el diagrama esfuerzo-deformación. Debido a las limitaciones de la máquina de compresión no fue posible sincronizar la adquisición de los datos de carga y deformación, por lo tanto, no se pudo determinar el diagrama esfuerzo-deformación. No obstante, dado que para el cálculo de la relación de Poisson únicamente se requiere la información de las deformaciones unitarias en las direcciones longitudinal y transversal, el diagrama esfuerzo-deformación no fue relevante en este estudio. Por lo tanto, la Ecuación (1) se aplica en la región lineal de la primera parte de la gráfica de deformaciones. Si bien, en la Figura 4 puede observarse un comportamiento lineal de la deformación después de los 70 s, estos valores no fueron considerados en el cálculo del módulo de Poisson ya que se desconoce si el material en esta etapa todavía se encuentra en la región elástica o en la región plástica.

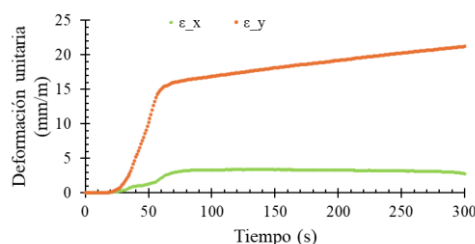


Figura 4: Curvas de deformaciones unitarias axial y transversal.

En la Figura 5 se muestra un ejemplo comparativo de las gráficas del módulo de Poisson para los dos concretos. Cabe señalar que, debido a que las deformaciones unitarias en los primeros instantes de la prueba son muy pequeñas, especialmente las deformaciones transversales, los resultados de la relación de Poisson son muy dispersas. Sin embargo, una vez que las deformaciones tienen una tendencia bien definida, los valores de la relación de Poisson se empiezan a estabilizar. Nótese que en los primeros segundos el módulo de Poisson varía desde 0.1 a 0.5 pero después de los 30 s empieza a tener una tendencia comprendida entre 0.1 a 0.2. Este proceso se aplicó para todas las muestras analizadas. Los promedios de la relación de Poisson para los dos concretos estudiados se muestran en la Tabla 3.

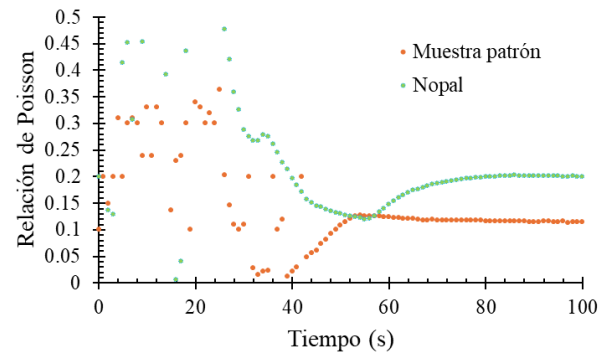


Figura 5: Curva de módulo de Poisson de los concretos estudiados a 28 días de curado.

Tabla 3: Módulo de Poisson de los concretos estudiados para las tres edades de curado.

Edad de curado (días)	Concreto patrón	Concreto + Nopal
7	0.22 ± 0.04	0.22 ± 0.06
14	0.19 ± 0.05	0.22 ± 0.06
28	0.17 ± 0.07	0.23 ± 0.08

Los valores del módulo de Poisson obtenidos se encuentran dentro del rango de valores teóricos reportados para el concreto en la literatura (Persson, 1999; Suchánek et al., 2018). Se observa que el módulo de Poisson del concreto patrón es ligeramente menor que el que es adicionado con nopal. Esto es congruente con los resultados de las pruebas de compresión, ya que el módulo de Poisson está directamente relacionado con la resistencia de los materiales (Neville, 2012). Se sabe que los materiales más resistentes tienen una relación de Poisson más baja. Por otra parte, en el concreto patrón, la relación de Poisson tiende a reducirse con el tiempo de curado, lo cual implica que el material adquiere mayor resistencia con el tiempo de curado. En cambio, en el concreto con nopal la variación con la edad de curado es mínima, manteniéndose casi constante. Esto implica que el incremento en la resistencia del concreto con nopal con el tiempo es mínimo (como se puede comprobar en la Tabla 2). Este hallazgo sugiere que el nopal puede ser un buen aditivo que ayuda a alcanzar rápidamente la resistencia final del concreto, lo cual es muy deseable en aplicaciones donde se requiere un descimbrado prematuro o en construcciones rápidas.

En el diseño de elementos estructurales de concreto, comúnmente se utiliza un valor de 0.2 para el módulo de Poisson en los análisis de esfuerzos y deformaciones, de acuerdo a la norma ACI-318 (American Concrete Institute, 2019). No obstante, para obtener resultados más precisos, es recomendable emplear el valor real de esta propiedad, específico del material en cuestión, lo cual contribuye a un diseño más exacto y eficiente del elemento estructural. En este contexto, la aplicación de la técnica de correlación digital de imágenes (DIC) representa una alternativa confiable para la determinación experimental del módulo de Poisson. Asimismo, esta determinación experimental resulta útil en la evaluación de la resistencia mecánica del concreto mediante la técnica indirecta de velocidad de pulso ultrasónica (VPU), en la cual, entre otros parámetros, se requiere conocer el valor del módulo de Poisson.

4. Conclusiones

En este trabajo se implementó la técnica de correlación digital de imágenes (DIC) para caracterizar el módulo de Poisson en materiales de concreto. Los resultados obtenidos se encuentran dentro del rango de valores reportados en la literatura, lo que demuestra que el método DIC es una alternativa confiable para la evaluación experimental de esta propiedad mecánica. Al tratarse de una técnica de medición sin contacto, DIC permite generar un mapa de deformaciones en toda la superficie de la muestra, lo que contribuye a obtener resultados más precisos y representativos.

Se observó que el módulo de Poisson del concreto patrón tiende a disminuir con el incremento de la edad de curado, lo que indica que el material adquiere mayor rigidez y resistencia mecánica a medida que avanza el proceso de curado. Por otro lado, el concreto adicionado con nopal presentó poca variación en esta propiedad mecánica con el tiempo de curado, lo cual implica que el nopal puede ser un excelente aditivo para que el concreto alcance su resistencia máxima en poco tiempo. Para llegar a una conclusión determinante, en un trabajo futuro se propone la evaluación de distintas concentraciones de nopal como aditivo en el concreto para determinar la proporción óptima para alcanzar una máxima resistencia en menos tiempo de curado.

En trabajos futuros, la implementación un sistema de adquisición de datos sincronizado entre las mediciones con DIC y la carga proporcionada por máquina de compresión, permitirá obtener el diagrama esfuerzo-deformación y determinar el módulo de Young. Esta integración ampliará el potencial de la técnica DIC para la caracterización mecánica del concreto.

Agradecimientos

Los autores expresan su sincero agradecimiento a la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el otorgamiento de la beca posdoctoral número 8107509. Asimismo, agradecen a la Benemérita Universidad Autónoma de Chiapas por facilitar el acceso y el uso de los materiales e instrumentos del

Laboratorio de Mecánica de Suelos, Resistencia de Materiales y Tecnología del Concreto.

Referencias

- American Concrete Institute. (2022). ACI PRC-211.1-22: Selecting Proportions for Normal-Density and High-Density Concrete-Guide.
- American Concrete Institute. (2019). ACI 318-19: Building Code Requirements for Structural Concrete.
- Bello, I., González-Fontebao, B., Wardeh, G., & Martínez-Abella, F. (2023). Characterization of concrete behavior under cyclic loading using 2D digital image correlation. *Journal of Building Engineering*, 78, 107709. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107709>
- Bhosale, A. B., & Prakash, S. S. (2020). Crack Propagation Analysis of Synthetic vs. Steel vs. Hybrid Fibre-Reinforced Concrete Beams Using Digital Image Correlation Technique. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 14(1), 57. <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00427-8>
- Chyliński, F., Michalik, A., & Kozicki, M. (2022). Effectiveness of Curing Compounds for Concrete. *Materials*, 15(7), 2699. <https://doi.org/10.3390/ma15072699>
- Daniel Yaw Osei, Zakari Mustapha, & Mohammed D.H. Zebilila. (2020). Compressive Strength of Concrete Using Different Curing Methods. *Journal of Social and Development Sciences*, 10(3(S)), 30–38. [https://doi.org/10.22610/jsds.v10i3\(S\).2983](https://doi.org/10.22610/jsds.v10i3(S).2983)
- Hernández-Pérez, J., Pascual-Francisco, J. B., López-González, A., Jiménez-Montoya, A., & Susarrey-Huerta, O. (2025). Flexural Behavior of Concrete Slabs Reinforced with Embedded 3D Steel Trusses. *Buildings*, 15(13), 2144. <https://doi.org/10.3390/buildings15132144>
- Mehta, P. K., & Monteiro, Paulo. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
- Neville, A. M. (2012). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education.
- Norma Mexicana NMX-C-159-ONNCE-2016. (2016). *Industria de la construcción - Concretos - Elaboración y curado de especímenes para ensayos*.
- Pascual-Francisco, J. B., Farfan-Cabrera, L. I., & Susarrey-Huerta, O. (2020). Characterization of tension set behavior of a silicone rubber at different loads and temperatures via digital image correlation. *Polymer Testing*, 81, 106226. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106226>
- Persson, B. (1999). Poisson's ratio of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 29(10), 1647–1653. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(99\)00159-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00159-3)
- Solís-Carcano, R. G., Moreno, E. I., & Serrano-Zebadua, C. (2013). Influencia del tiempo de curado húmedo en la resistencia y durabilidad del concreto en clima tropical. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 4(2), 15–25.
- Sotomayor-del-Moral, J. A., Pascual-Francisco, J. B., Susarrey-Huerta, O., Resendiz-Calderon, C. D., Gallardo-Hernández, E. A., & Farfan-Cabrera, L. I. (2022). Characterization of Viscoelastic Poisson's Ratio of Engineering Elastomers via DIC-Based Creep Testing. *Polymers*, 14(9), 1837. <https://doi.org/10.3390/polym14091837>
- Suchánek, V., Bednarz, T., & Svojanovský, T. (2018). Usage of Digital Image Correlation (DIC) in Determination of Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Special Concrete. *Solid State Phenomena*, 272, 154–159. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.272.154>
- UNE-EN 12390-3. (2019). *Ensayos de hormigón endurecido. Parte 3: Resistencia a la compresión de probetas*. España.
- Yang, S., Liu, H., Mao, L., Li, F., Wei, B., Ju, Y., & Hild, F. (2024). Damage quantification in concrete under uniaxial compression using microcomputed tomography and digital volume correlation with consideration of heterogeneity. *Mechanics of Materials*, 199, 105178. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2024.105178>
- Yang, Y., Xu, C., Xia, L., Yang, J., Dong, Z., & Wu, G. (2024). Experimental study on static performance of ballastless track slabs reinforced by new FRP trusses. *Engineering Structures*, 316, 118566. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.118566>
- Zheng, Q., Mashiwa, N., & Furushima, T. (2020). Evaluation of large plastic deformation for metals by a non-contacting technique using digital image correlation with laser speckles. *Materials & Design*, 191, 108626. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108626>