

INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS EN EL COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Tridone, Valeria ^a; Peralta, María Haydée ^b

Ingenieras Civiles, Facultad de Ingeniería UNICEN, Av. Del Valle 5737, Olavarría, Argentina

vtroidone@fio.unicen.edu.ar^a, mperalta@fio.unicen.edu.ar^b

RESUMEN

La variación de las características dinámicas de un elemento estructural de hormigón permite inferir información sobre su desempeño. En este trabajo se presenta una primera etapa de análisis, a escala de laboratorio, de la influencia de dicha variación en la evaluación del comportamiento en elementos estructurales. Para este estudio, se prepararon probetas de hormigón H-30 y se determinaron sus módulos de elasticidad estáticos y dinámicos mediante ensayos estándar siguiendo las normativas ASTM C469 y ASTM C215. Los ensayos se realizaron en probetas sanas y sometidas a cargas incrementales hasta alcanzar el 60% de la carga de rotura. Las relaciones entre los valores de los módulos determinan una correlación entre ellos. Los resultados obtenidos se utilizaron en modelos numéricos para contrastar el comportamiento a partir del análisis tensional. La variación de las características dinámicas podía convertirse en un indicador para evaluar estructuras de hormigón en servicio, lo cual motiva una próxima etapa de análisis a una escala más cercana a la realidad.

ABSTRACT

The variation of the dynamic characteristics of a concrete structural element provides information about its performance. This paper presents a first stage of analysis, at laboratory scale, of the influence of this variation in the evaluation of the behavior of structural elements. For this study, H-30 concrete specimens were prepared, and their static and dynamic moduli of elasticity were determined using ASTM C-469 and ASTM C215-19 standards. Tests were performed on undamaged specimens and subjected to incremental loads up to 60% of the ultimate load. The ratios between the module values determine a correlation between them. The experimentally obtained data were used in numerical models to contrast the behavior from the stress analysis. The results obtained were used in numerical models to contrast the behavior from stress analysis. The variation of dynamic characteristics could become an indicator to evaluate concrete structures in service, motivating a next phase of analysis at a scale closer to reality.

Organiza:

INTRODUCCIÓN

Las estructuras de hormigón se proyectan y construyen en base a requisitos mínimos de seguridad, estabilidad y funcionalidad (Perdrix, 2013). Esto permite que, durante un periodo de tiempo, denominado vida útil de diseño, puedan tener un uso normal sin costos inesperados de mantenimiento o reparación. Actualmente existen numerosas construcciones cuya vida útil de diseño fue superada, y aun así continúan siendo aptas para su uso (Alexander & Beushausen, 2019). No obstante, es necesario monitorear su respuesta estructural para detectar daños en una etapa temprana, evaluar permanentemente su estado de salud y garantizar su seguridad operativa (Chang et al., 2003).

En los últimos años, debido a los adelantos en tecnología de instrumentación y procesamiento digital de señales, los métodos no destructivos para la detección de daños en estructuras civiles han ganado especial atención (Palazzo, 2000). En este sentido, existe una gran variedad de métodos de identificación de daño basados en el cambio de las propiedades dinámicas. Una de las más utilizadas es la medición de vibraciones, dada la facilidad de adquisición de datos y la obtención de información global sobre las condiciones estructurales (Hanif et al., 2018).

La medición de vibraciones se realiza por medio de sensores ubicados en distintos puntos de la estructura, que perciben las vibraciones mecánicas y las transforman en señales eléctricas, típicamente medidas en Volts (Rodríguez Suesca, 2021). La respuesta dinámica de la estructura puede caracterizarse por sus parámetros dinámicos, que son sus frecuencias naturales, coeficientes de amortiguamiento y formas modales. La presencia de un daño, como lo es una fisura, modifica estas frecuencias naturales de vibración (Palazzo, 2000). El uso de parámetros dinámicos para identificar el daño en estructuras de ingeniería civil fue estudiado por Salawu, 1997 y Zou et al, 2000.

Actualmente, las vibraciones medidas se comparan con normas y criterios existentes a nivel internacional, a efectos de adoptar medidas que aseguren una respuesta adecuada en servicio para las condiciones evaluadas y efectuar recomendaciones. Existen experiencias de evaluación y diagnóstico de comportamiento de estructuras de puentes de hormigón en base a la obtención de las características dinámicas y su respuesta, a partir de mediciones in situ y sobre modelos computacionales (Peralta et al., 2020; Peralta et al., 2008).

Investigaciones recientes sugirieron que la medición de las frecuencias naturales se ven afectadas por otros factores además del daño estructural, como lo son los cambios en las condiciones de temperatura y humedad. También, se informan problemas asociados con las propiedades modales por su baja sensibilidad a ciertos tipos de daño estructural. (Avci et al., 2021; Hanif et al., 2018; Popovics, 2008; Yang et al., 2021)

No obstante, se considera que estas críticas no son suficientes para descartar estos

Organiza:

métodos, sino que merecen una continuidad y profundidad en el estudio. El análisis dinámico de las estructuras constituye una técnica apropiada para evaluar daño estructural y/o afectación de la capacidad portante. Se pretende que las investigaciones en curso, y las futuras, puedan ayudar a resolver estas dificultades aportando a una metodología de análisis dinámico de mayor solidez para su aplicación.

En este trabajo se presenta una primera etapa de análisis planteada a escala de laboratorio, con el objetivo de observar la influencia de dichas variaciones en la evaluación del comportamiento en elementos estructurales. Se analiza la variación de la frecuencia natural del hormigón a distintas edades y tiempos de curado, y se la correlaciona con el módulo de elasticidad. De esta manera, se logra obtener las tensiones y deformaciones de las probetas ensayadas, sanas y fisuradas, mediante la caracterización de las propiedades del material obtenida a partir de la medición de vibraciones.

Obtención del módulo de elasticidad a partir de ensayos dinámicos.

El módulo de elasticidad E , también conocido como módulo de Young, es un parámetro clave en el diseño del hormigón armado. Se define como la "relación entre la tensión axial y la deformación axial para un material sometido a una carga uniaxial" (Popovics, 2008). Se utiliza en el proceso de diseño estructural, adoptándose un valor aproximado dado por las especificaciones y reglamentos vigentes en cada país. Estas normas suelen exigir que se cumpla un valor específico de E para garantizar que la integridad estructural del edificio sea satisfactoria y evitar deformaciones excesivas (Trifone, 2017).

Se definen dos tipos distintos de módulos: el módulo de elasticidad estático (E_c), que se conoce simplemente como E , y el módulo de elasticidad dinámico (E_d) (del Olmo, 1986). El primero se obtiene de acuerdo a la norma ASTM C469. Sin embargo, para el caso de evaluaciones estructurales en construcciones existentes, se requiere un gran número de probetas para obtener un valor representativo fiable, y es difícil proporcionar una evaluación suficiente debido a las limitaciones de tiempo y a la dificultad de los ensayos. Un método alternativo consiste en obtener un E_d empleando para ello ensayos no destructivos.

Algunos de los métodos dinámicos de ensayos no destructivos más utilizados para estimar el módulo de elasticidad de estructuras in situ son: los métodos de velocidad de impulsos ultrasónicos, los métodos de frecuencia de resonancia, entre otras técnicas de propagación de ondas. Para determinar el E_d a partir de la medición de vibraciones se utiliza la ecuación (1), de acuerdo a la norma ASTM C215.

$$E_d = C M n^2 \quad (1)$$

Organiza:

donde n es la frecuencia fundamental transversal en Hz, M en la masa de la probeta en kg y C un coeficiente que depende de las dimensiones de la probeta.

Es importante resaltar que la magnitud obtenida al determinar el módulo dinámico E_d es mayor que su módulo estático correspondiente, E_c , aproximadamente un 20% a 30% (Salman & Al-Amawee, 2006).

La diferencia que existe entre ambos módulos es consecuencia de que la heterogeneidad propia del hormigón produce respuestas proporcionalmente diferentes en el material (distintos grados de deformación), cuando sobre él actúan tensiones de magnitudes diferentes. En el ensayo estático, sobre el hormigón actúa la fluencia, deformación que no llega a manifestarse en el ensayo dinámico. En otras palabras, los métodos de ensayo dinámicos aplican muy poca fuerza en comparación con la carga estática, con lo cual los métodos de ensayo dinámicos no darán lugar a deformaciones adicionales del hormigón (Trifone, 2017).

Esta diferencia entre los dos módulos no es una magnitud constante, sino que aumenta con el valor de las resistencias del hormigón y, además, para una dosificación determinada, esta diferencia se incrementa con la edad del hormigón.

En este trabajo se emplea la relación obtenida entre el E_c de acuerdo a ASTM C469 y el E_d de acuerdo a ASTM C215 para el caso de estudio.

DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Se elaboraron cuatro probetas prismáticas con un hormigón H-30 de consistencia normal, con una relación agua/cemento de 0,5, y con un asentamiento de 4 cm medido en Cono de Abrams. Los moldes fueron de 52 cm de largo por 7,5 cm de ancho y 10,25 cm de alto. Además, se moldearon probetas cilíndricas por edad para determinar la resistencia a compresión (ASTM C39) y el módulo de elasticidad estático mediante el ensayo a compresión según ASTM C469. El procedimiento seguido y los ensayos realizados fueron:

1. Se reservaron los moldes en un ambiente con temperatura y humedad controladas durante 24 h.
2. Las probetas de hormigón (identificadas como VT01, VT02, VT03 y VT04) se desmoldaron y se colocaron en piletas de curado llenas de agua saturada con cal a 22 ± 2 °C.
3. A los 14 días se retiraron las probetas VT01 y VT02. Se ensayaron dinámicamente, con el equipamiento que se observa en la Figura 01.
4. A los 21 días se retiraron las probetas VT03 y VT04. Se ensayaron dinámicamente las cuatro probetas.
5. Se determinó la carga máxima de rotura de las probetas VT02 y VT03 mediante ensayo a flexión por carga central. Luego, se cargaron de forma incremental las probetas VT01 y VT04 hasta alcanzar el 60% de la carga de rotura para su probeta

Organiza:

- equivalente (VT01 respecto de VT02 y VT04 respecto de VT03). Con esta condición de carga, se considera la existencia de daño en las probetas.
6. Se realizaron ensayos dinámicos de las probetas VT01 y VT04 para esta nueva condición de las probetas con daño.
 7. A los 21 días se retiraron las probetas cilíndricas de la pileta de curado y se efectuó el ensayo a compresión para una de ellas. Se obtuvo la carga máxima de rotura a compresión. Con este dato, se ensayó la segunda probeta cilíndrica según ASTM C469 y se determinó el módulo de elasticidad estático.
 8. A los 90, 120 y 150 días se ensayaron dinámicamente las probetas VT01 y VT04.

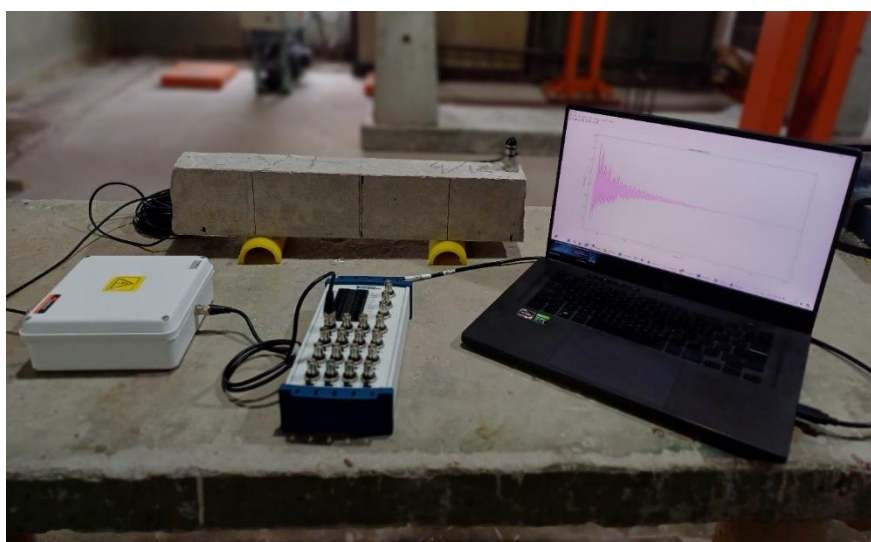


Figura 01. Equipamiento de laboratorio.

La medición de las frecuencias de las probetas prismáticas fue realizada mediante el método de resonancia por impacto normalizado según ASTM C215: Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens. El método consiste en someter una probeta prismática de hormigón simple a una carga de impacto.

Para ello se apoya la probeta sobre soportes de plástico blando en los puntos nodales ($0,244 L$) de cada extremo, donde L es la longitud de la probeta. Para el caso de las probetas construidas, esta distancia es 11,5 cm. Para excitar y medir la frecuencia de resonancia máxima, se golpea la probeta en el centro con un martillo de 250 gr. Se mide la respuesta mediante un acelerómetro 5514B de Metrix colocado en uno de los extremos de la viga. En la Figura 2 se muestra el esquema de medición del modo transversal de acuerdo a ASTM C215.

Organiza:

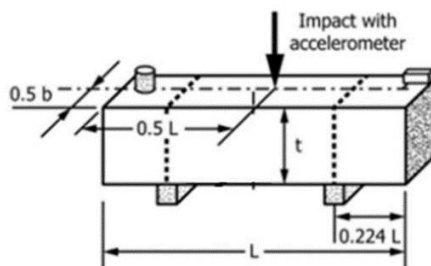


Figura 2. Esquema del ensayo dinámico.

Se evalúa su respuesta ante una vibración elástica, determinando así su frecuencia de resonancia del modo transversal. Esta frecuencia corresponde a la amplitud máxima de vibración. Aplicando la Transformada de Fourier a la señal anterior, y dividiéndola por su valor máximo, se obtiene la respuesta con amplitud normalizada en todo el rango de frecuencia tal como se muestra en la Figura 03. El valor de frecuencia donde se encuentra la amplitud máxima se corresponde con la frecuencia natural, resultando, para esta probeta, una frecuencia natural de 1435 Hz.

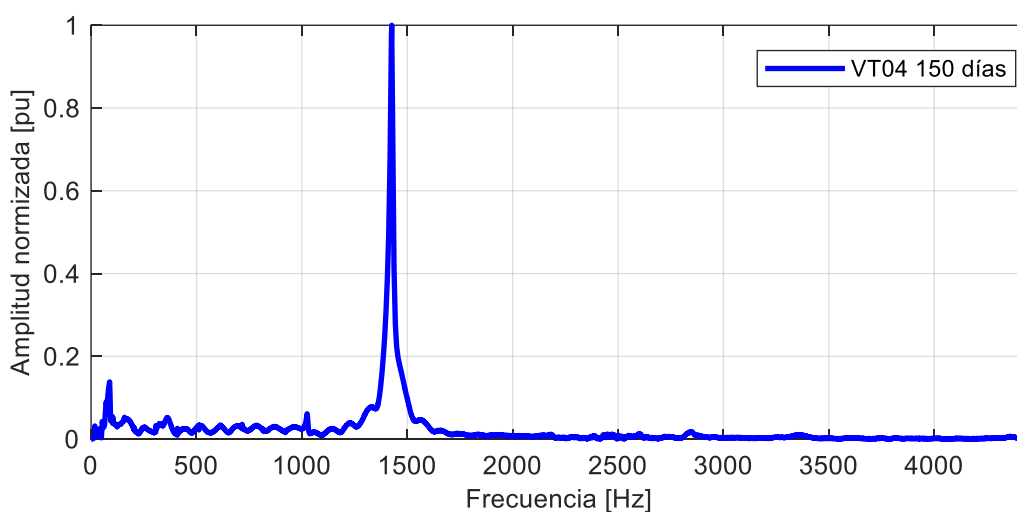


Figura 03. Respuesta al impulso en el dominio de la frecuencia.

Determinación experimental de E

A partir del ensayo a compresión de las probetas cilíndricas de hormigón, se determinaron experimentalmente por medición directa la tensión aplicada al hormigón y la deformación resultante. El módulo de elasticidad en condiciones de carga estática (E_c) se obtuvo mediante la relación entre ambas magnitudes (del Olmo, 1986).

El proceso realizado, normalizado según ASTM C469, consistió en un registro a intervalos regulares de la carga aplicada y de la deformación longitudinal. Con estos

Organiza:

datos, se trazó una curva y se determinó la pendiente de la secante en la gráfica esfuerzo-deformación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las mediciones de frecuencia obtenidos a partir del ensayo dinámico se presentan en la Tabla 01. Allí se muestran las frecuencias obtenidas para las diferentes probetas durante los primeros 21 días en su condición sana. Se observa que la resistencia aumenta con el tiempo, así como también una mayor resistencia en las probetas con mayor tiempo de curado.

A los 21 días de curado, las probetas VT02 y VT03 se ensayan a flexión por tres puntos, con una carga central, para determinar su carga máxima de rotura. La probeta VT02 rompió con una carga de 24050 kg y la probeta VT03 con una carga de 24950 kg. La mayor carga de rotura de la probeta VT03 se debe a la influencia de las condiciones de curado, ya que se mantuvo durante un mayor tiempo dentro de la cámara.

Para evaluar el daño, las probetas prismáticas VT01 y VT04 se ensayaron a flexión por tres puntos de forma incremental hasta que se alcanzó el 60% de la carga de rotura. Se considera que las probetas han superado el límite elástico, y al ser descargadas, presentan un daño remanente. Para determinar esta nueva condición, se repitió la medición de frecuencias, en el instante posterior al daño (a 21 días), y en los meses posteriores, a 90, 120 y 150 días.

Cada uno de los valores de frecuencia presentados en la Tabla 01, corresponde al promedio de tres mediciones según lo especificado en la norma ASTM C215. A su derecha, se encuentra la variación relativa de cada magnitud respecto a la anterior medida.

Edad	VT01		VT02		VT03	VT04	
	Frecuencia (Hz)	Δf	Frecuencia (Hz)	Δf	Frecuencia (Hz)	Frecuencia (Hz)	Δf
14 días	1450	-	1458	-	en cámara de curado		
21 días	1474	1,7%	1486	1,9%	1460	1491	-
21 días	1447	-1,8%				1473	-1,2%
90 días	1418	-2,0%				1444	-2,0%
120 días	1427	0,6%				1440	-0,3%
150 días	1415	-0,8%				1435	-0,3%

Tabla 01 - Valores de frecuencia obtenidos y su variación relativa

Organiza:

Los resultados presentados en la Tabla 01 muestran una marcada disminución de los valores de la frecuencia luego de producirse el daño, y posterior a los 90 días la frecuencia se mantiene constante. Esta variación se asocia a que los cambios microestructurales, como la formación de grietas y la desunión entre fases separadas en el hormigón, son responsables de los cambios en la frecuencia a esta escala de laboratorio.

En el caso de la probeta VT04 la diferencia en la variación de la frecuencia a 21 días observada antes y después de generado el daño es menor que en la probeta VT01. Esto puede estar asociado al contenido de humedad de la probeta VT04, debido a que se efectuó el ensayo en el momento que fue retirada de la cámara de curado húmedo.

En la Figura 04 se presenta un detalle del corrimiento de las frecuencias, al superponer las respuestas al impulso en el dominio de la frecuencia para la probeta VT01. Se observa la disminución de las mismas a medida que aumenta la edad, y un marcado corrimiento en el momento que la probeta es sometida a un esfuerzo de flexión, correspondiente al 60% de la carga de rotura, tal cual lo descrito anteriormente.

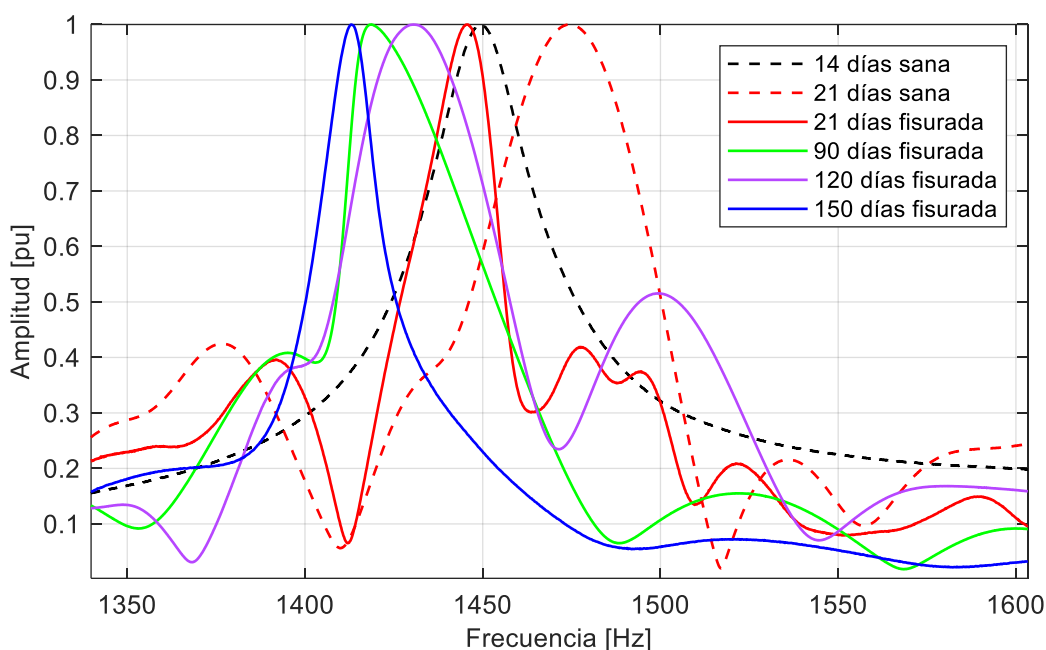


Figura 04. Respuesta al impulso en el dominio de la frecuencia para la probeta VT01.

El módulo de elasticidad dinámico se calculó según la norma correspondiente, y en concordancia con la bibliografía, resultó ser superior al módulo de elasticidad estático. Las relaciones entre los diferentes valores de módulos calculados se trazaron entre sí para determinar la correlación entre ellos.

Organiza:

El módulo de elasticidad estático (E_c) obtenido del ensayo de la probeta cilíndrica (según ASTM C469) fue de 34000 MPa, y el dinámico (E_d) obtenido de la probeta VT02 (según ASTM C215) fue 43000 MPa. Ambos se determinaron para la edad de 21 días. Por ende, el factor de correlación determinado experimentalmente para este caso de estudio se muestra en la ecuación (2):

$$E_d = 1,26 E_c \quad (2)$$

En la Tabla 02 se presentan las relaciones entre los módulos dinámicos, determinados a partir de la ecuación (1), y los módulos estáticos determinados según la ecuación (2). Se puede observar que, pese a que si bien existe una variación de frecuencias, cuando se comparan con la variación del módulo de elasticidad se deduce que no es significativa para afectar el comportamiento del material en este ensayo.

Edad	VT01			VT04		
	Frecuencia (Hz)	Ed (Mpa)	Ee (Mpa)	Frecuencia (Hz)	Ed (Mpa)	Ee (Mpa)
14 días	1450	-	-			
21 días	1474	42801	33969	1474	43790	34754
21 días	1447	41191	32691	1447	42714	33900
90 días	1428	40165	31877	1428	41096	32616
120 días	1427	40106	31830	1427	40840	32413
150 días	1413	39453	31312	1435	40576	32203

Tabla 02 – Módulos de elasticidad dinámicos y estáticos

A partir de los valores de E_c obtenidos se caracteriza al material hormigón en los parámetros de entrada a un software de elementos finitos. Se modelan las condiciones de ensayo a flexión descritas en el punto 5 de la sección *Descripción de los Ensayos*, logrando simular el comportamiento de la probeta ante una carga en el centro, cuya magnitud es el 60% la carga de rotura. Los resultados son similares por la semejanza en el valor del módulo y se muestran en la Figura 04.

Organiza:

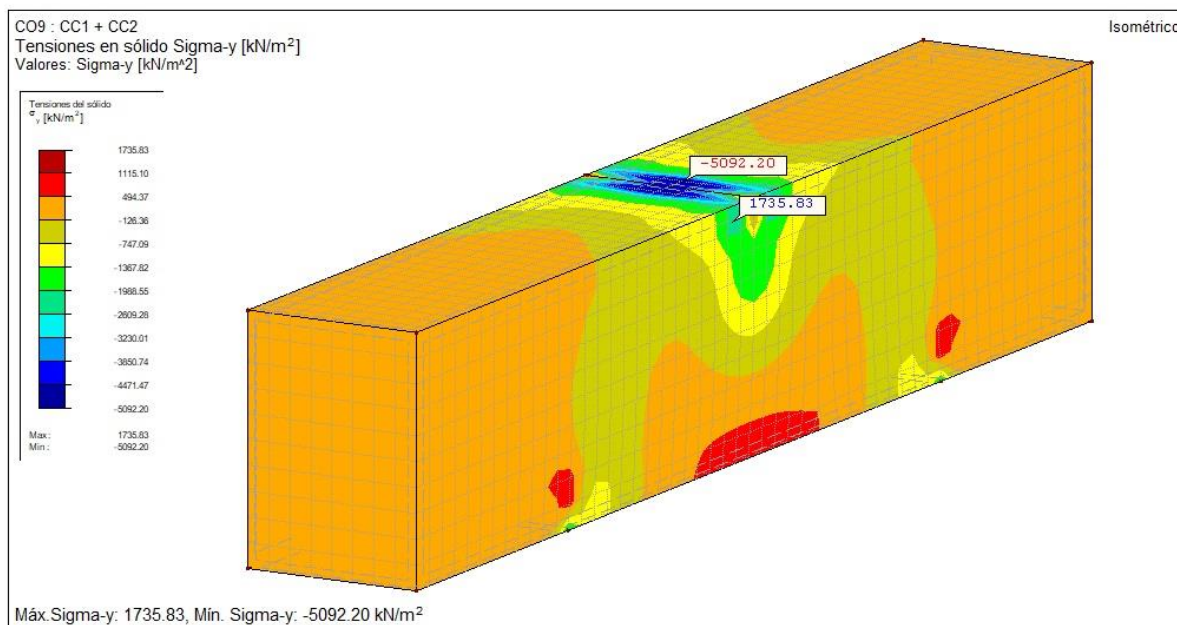


Figura 04. Tensiones en la probeta durante el ensayo a flexión con el valor de E_c obtenido mediante ensayo dinámico.

Esta modelización permite visualizar las tensiones a la que está sometida la probeta, caracterizada con un material cuya rigidez ha variado producto de la fisuración del hormigón.

CONCLUSIONES

En el hormigón se produce un fenómeno de no linealidad característico debido a la presencia de microfisuras. Estas microfisuras están presentes en la zona de transición interfacial, que es el eslabón débil entre los agregados y la pasta de cemento. Al aplicarse una carga, estas microgrietas se unen para formar grietas más grandes. Se observó que las mediciones de vibraciones son lo suficientemente sensibles como para detectar estas microfisuras.

Con los resultados en esta escala de análisis, es posible observar claramente el aumento de frecuencia asociado a un aumento del módulo de elasticidad debido al endurecimiento, así como una disminución marcada de la frecuencia al generarse un daño a nivel microestructural. Los cambios en las condiciones de temperatura y humedad que se dieron por la presencia de la probeta en cámara de curado, y por la variación de a temperatura ambiente, no son suficientes como para enmascarar esta variación debida al daño, al contrario de lo que afirman algunos autores.

Organiza:

Se concluye que, si bien es clara la variación de frecuencia, esto no se traduce en un cambio del comportamiento del material ni se percibe en un análisis de tensiones y deformaciones. El orden de magnitud de la variación relativa de la frecuencia ante un daño debe ser superior para evidenciarse en estos modelos de análisis.

Como trabajo futuro se propone replicar el análisis en vigas de laboratorio de mayor tamaño y con armadura, evaluando el comportamiento ante escalones de carga y con un mayor avance del proceso de fisuración. Se pretende que las investigaciones presentes y futuras aporten mayor solidez a esta metodología para su aplicación al monitoreo de estructuras.

Colaboradores: Se agradece la colaboración para este trabajo del Dr. Ing. Oscar Cabrera y el Dr. Mg. Ing. Leonel Pico.

REFERENCIAS

- Alexander, M., & Beushausen, H. (2019). Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique. *Cement and Concrete Research*, 122, 17–29. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.04.018>
- Avcı, O., Abdeljaber, O., Kiranyaz, S., Hussein, M., Gabbouj, M., & Inman, D. J. (2021). A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147, 107077. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2020.107077>
- Chang, P. C., Flatau, A., & Liu, S. C. (2003). Review paper: Health monitoring of civil infrastructure. *Structural Health Monitoring*, 2(3), 257–267. <https://doi.org/10.1177/1475921703036169>
- del Olmo, C. (1986). Técnica electrodinámica para la medida del módulo de elasticidad de los materiales de construcción. (Equipo puesto a punto en el IETcc para la medida del módulo de elasticidad dinámico). *Informes de La Construcción*, 37(379), 21–32. <https://doi.org/10.3989/ic.1986.v37.i379.1770>
- Hanif, M. U., Ibrahim, Z., Ghaedi, K., Hashim, H., & Javanmardi, A. (2018). Damage assessment of reinforced concrete structures using a model-based nonlinear approach – A comprehensive review. *Construction and Building Materials*, 192, 846–865. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.115>
- Palazzo, G. L. (2000). *Identificación del daño estructural a través del cambio en las propiedades dinámicas*. Tesis de Magister. Instituto de Estructuras Arturo M.

Organiza:

Guzmán, Universidad Nacional de Tucumán.

- Peralta, M. H., Ercoli, N. L., Pico, L. O., Bacchiarello, R. O., La Malfa, S., & Correa, L. (2008). Análisis Numérico y Experimental de Vibraciones para la Evaluación del Comportamiento de un Puente. *Mecánica Computacional*, 25, 2033–2052.
- Peralta, M., Pico, L., Bacchiarello, R., & Ercoli, N. (2020). *Evaluación y diagnóstico de estructuras de uso público utilizando técnicas dinámicas*. Congresso Brasileiro de Patologia das Construções. doi: 10.4322/CBPAT.2020.278
- Perdrix, C. A. (2013). *Especificaciones de cálculo de la vida útil y estado límite de corrosión*. May 2013. Revista ALCONPAT 3(2):82 DOI: 10.21041/ra.v3i2.45
- Popovics, J. S. (2008). A Study of Static and Dynamic Modulus of Elasticity of Concrete. *CRC. February 2020 Journal of Materials in Civil Engineering* 32(5). DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003089
- Rodríguez Suesca, A. E. (2021). *Evaluación de vibraciones en el diagnóstico de estructuras: Estudio de comportamiento de estructuras en deterioro*. Tesis doctoral. Universidad de Granada.
- Salman, M., & Al-Amawee, H. (2006). The Ratio between Static and Dynamic Modulus of Elasticity in Normal and High Strength Concrete. *Journal of Engineering and Development*, 10, 163–174.
- Trifone, L. (2017). *A Study of the Correlation Between Static and Dynamic Modulus of Elasticity on Different Concrete Mixes*. <https://doi.org/10.33915/etd.6833>
- Yang, Y., Zhang, Y., & Tan, X. (2021). Review on Vibration-Based Structural Health Monitoring Techniques and Technical Codes. *Symmetry*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/sym13111998>

Organiza: