

Caracterización mecánica de morteros en proceso de fraguado a partir de técnicas de impacto acústico y procesamiento de imágenes

I. Luviano-Soto y Y. Concha-Sánchez

*Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio C, Ciudad Universitaria. Francisco J. Mújica S/N. Col. Felicitas del Río. 58030, Morelia, Michoacán, México.
e-mail: itzel.luviano@umich.mx; yajaira.concha@umich.mx*

G. Arroyo-Correa y J. Vega-Cabrera

*Facultad de Cs. Físico-Matemáticas, “Mat. Luis Manuel Rivera Gutiérrez”, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Edificio Alfa, Ciudad Universitaria. Francisco J. Mújica S/N. Col. Felicitas del Río. C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México.
e-mail: garroyo@umich.mx; jose.vega.cabrera@umich.mx*

Received 13 October 2023; accepted 10 August 2024

En el campo de la Ingeniería Civil es de suma importancia la determinación de la resistencia a compresión axial de los elementos estructurales de una edificación, así como el diagnóstico de los mismos durante su vida útil, esto es posible con el uso de técnicas invasivas como no invasivas. En este trabajo se presentan los resultados experimentales de pruebas destructivas y no destructivas a especímenes de morteros fabricados a diversas proporciones de agregados pétreos y sometidos a esfuerzos de compresión axial hasta el punto de falla o ruptura. El método destructivo consistió en el uso de una prensa hidráulica para someter las muestras de morteros a esfuerzos de compresión. Los métodos no destructivos considerados fueron pruebas de impacto acústico y de procesamiento de las imágenes digitales mediante patrones de luz dispersada por la superficie del mortero bajo estudio para su caracterización entrópica. Las pruebas se realizaron en muestras cúbicas de mortero a diferentes edades durante su proceso de fraguado o curado durante un periodo de análisis de 28 días. Los resultados muestran una gran afinidad entre los métodos no destructivos para la caracterización mecánica a compresión y los métodos convencionales destructivos.

Descriptor: Pruebas no destructivas; impacto acústico; procesamiento de imágenes; entropía de imagen; caracterización mecánica.

In the field of civil engineering, the determination of the axial compression resistance of the structural elements of a building is of utmost importance, as well as their diagnosis during its service life. This is possible with the use of both invasive and non-invasive techniques. This work presents the experimental results of destructive and non-destructive tests on mortar specimens manufactured with various proportions of oil aggregates and subjected to axial compression stress up to the point of failure or rupture. The destructive method consisted of using a hydraulic press to subject the mortar samples to compression forces. The non-destructive methods considered were acoustic impact tests and digital image processing using light patterns scattered by the mortar's surface under study for its entropic characterization. The tests were performed on cubic mortar samples at different ages during their setting or curing process over an analysis period of 28 days. The results show a great affinity between non-destructive methods for compression mechanical characterization and the conventional destructive methods.

Keywords: Non-destructive tests; acoustic impact; image processing; image entropy; mechanical characterization.

DOI: <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.71.011301>

1. Introducción

El mortero es uno de los elementos más utilizados en el sector de la ingeniería civil por sus propiedades mecánicas, sin embargo, éste puede sufrir deterioro y agrietamientos a lo largo del tiempo, por lo que es importante el uso de técnicas de evaluación mecánica que permitan la toma de decisiones en su valoración estructural [1]. Una de las pruebas básicas para el diagnóstico de un material es la determinación de esfuerzos mecánicos a compresión, en donde la forma convencional para determinar la resistencia a compresión es de naturaleza destructiva, ya que el material es llevado hasta su punto de fractura quedando inutilizable [2].

Actualmente, gracias al desarrollo científico y tecnológico es posible realizar ensayos no destructivos (NDTs por sus

siglas en inglés), una tarea que implica la integración de varias disciplinas como la física, ingeniería en materiales, computación, métodos numéricos, entre otras, pero con mucha aplicabilidad. En el área de la ingeniería el uso de NDTs ha permitido avances significativos. Un ejemplo de ello son los trabajos de Ortega *et al.* [3], Anna Arizza *et al.* [4] y Carrasco *et al.* [5], quienes usan técnicas de ultrasonido para analizar la resistencia y textura de morteros, así como el trabajo de Žalský *et al.* [6] que utilizan martillos de impacto para estudiar la resistencia del mortero.

No obstante, para que los NDTs sean aceptados en la industria ingenieril, es necesario mostrar su nivel de confiabilidad [7], por lo que el presente trabajo tiene como objetivo realizar una evaluación de dos técnicas no destructivas como

una alternativa a los métodos convencionales. Estas técnicas fueron implementadas en muestras de especímenes cúbicos de mortero, los cuales fueron hidratados con agua hasta el punto de saturación para someterlos a un proceso de curado o fraguado a lo largo de 28 días, que es el periodo en el cual el mortero alcanza su resistencia máxima a compresión [8]. El trabajo es organizado como se detalla a continuación: en la Sec. 2 se describen brevemente los métodos no destructivos y destructivos utilizados para estudiar la estabilidad mecánica de estructuras; la Sec. 3 detalla la metodología experimental empleada en el presente trabajo; en la Sec. 4 se muestran los resultados obtenidos, los cuales son analizados en la Sec. 5 y, finalmente, la Sec. 6 contiene las conclusiones de la presente investigación.

2. Métodos destructivos y no destructivos

En la evaluación mecánica de materiales existe una gran variedad de técnicas para determinar la resistencia de un elemento. Actualmente uno de los métodos destructivos más comunes es el uso de prensas hidráulicas, en los cuales el material o elemento bajo prueba se somete a esfuerzos de compresión hasta llevarlo a su punto de ruptura o fractura, este es un ejemplo de pruebas destructivas; por otra parte, también es posible medir los esfuerzos en una superficie de un sólido de forma sistemática y no invasiva mediante el uso de NDTs avanzados [9,10]; por ejemplo, técnicas como el pulso ultrasónico, impacto acústico, técnicas electromagnéticas, refracción sísmica, fotoelásticidad, entre otras [11,12]. No obstante, muchos de estos NDTs enfrentan el desafío de requerir instrumentación compleja que es difícil de obtener. Por ello, en este trabajo se sugiere emplear técnicas de impacto acústico y procesamiento digital de imágenes para analizar el comportamiento mecánico del mortero, ya que éstas son técnicas relativamente económicas y se pueden utilizar de manera práctica en el sector ingenieril.

2.1. Pruebas convencionales

Una de las propiedades más evaluadas comúnmente en los morteros es su resistencia mecánica, ya que esta permite estimar tanto la durabilidad de la estructura como la rehabilitación de un componente. Por eso, las técnicas convencionales en la evaluación mecánica de los elementos estructurales suelen emplear métodos específicos para determinar su capacidad de carga. Existen diversas técnicas destructivas que se utilizan de forma convencional, entre las más frecuentemente empleadas están las pruebas de compresión, flexión, tensión y tracción uniaxial [13], en las cuales se utiliza maquinaria manual para llevar el elemento sometido a ensayo hasta el punto de falla o ruptura. Este tipo de pruebas se consideran de naturaleza destructiva. En este trabajo se emplean las pruebas convencionales de compresión axial simple para generar una comparación con NDTs.

2.2. Pruebas acústicas

Dentro de los NDTs existen diferentes tipos de pruebas acústicas, tales como la velocidad de pulso, imágenes ultrasónicas, fusión radar, emisión acústica e impacto acústico [14]; de éstas se seleccionó la técnica de Impacto Acústico (IA), dado que este método es ideal para muestras de pequeño espesor y elementos estructurales con caras paralelas [15], tales como losas de concreto o muestras cúbicas.

El método de IA se basa en el análisis de frecuencia de respuesta de la estructura cuando se somete a un impacto y se ha demostrado que tiene hasta un 3 % de variación respecto a los métodos destructivos [16]; ésta técnica puede detectar fracturas y agrietamientos lineales y no lineales de hasta 0.025 mm de ancho [17,18].

2.3. Pruebas ópticas

Actualmente el uso de las cámaras digitales permite el registro de imágenes en cualquier momento, estas imágenes, con un procesamiento adecuado, posibilitan el estudio de diferentes elementos característicos de procesos físicos, biológicos y químicos. Como ejemplo, es posible supervisar el patrón de luz reflejada en la superficie de un objeto antes y después de aplicarle un esfuerzo mecánico específico [19]. La diferencia entre las imágenes, utilizando técnicas de procesamiento digital, permite medir la deformación que experimenta el objeto estudiado. La aplicación de técnicas ópticas no destructivas para el estudio de propiedades mecánicas de estructuras es bien conocida en el campo de la ingeniería [20]. En el caso específico de estructuras de concreto y mortero existen técnicas ópticas basadas en la Interferometría Electrónica de Patrones de Moteado (ESPI) [21,22], la cual, se basa en someter el objeto bajo estudio a cargas y obtener mapas de deformación que describen las zonas de esfuerzo asociando la superficie ópticamente rugosa de la muestra [23]. Sin embargo, en este trabajo se propone el analizar experimentalmente la rigidez de bloques de mortero mediante el procesamiento de imágenes obtenidas de los patrones de luz reflejada por los bloques de mortero, antes y después de ser sometidos a esfuerzos de compresión y calculando la entropía de imagen que está basada en la entropía de Shannon [24].

3. Metodología

3.1. Especímenes de mortero

En este estudio, se examinaron tres grupos distintos de bloques de mortero hidráulico (C1, C2 y C3) elaborados mediante el método manual [2], compuestos de cemento, arena fina y agua. Cada grupo contiene cuatro muestras de especímenes cúbicos (M1, M2, M3, M4) con arista de 5 cm. El grupo C1 fue diseñado con una mezcla de cemento:arena en una proporción de 1:2 y agua hasta saturación; los grupos C2 y C3 se diseñaron con proporciones de cemento:arena de 1:3 y 1:5, respectivamente.

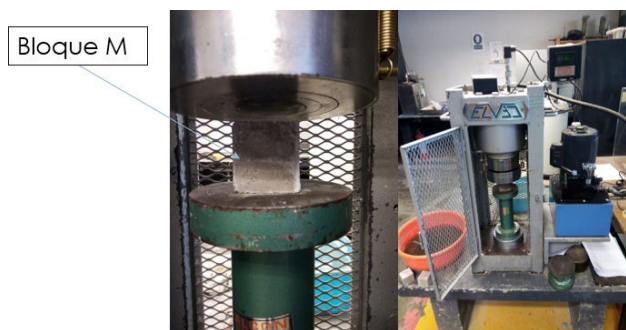


FIGURA 1. Pruebas destructivas mediante una prensa hidráulica.



FIGURA 2. Esquema de prueba de IA.

Los especímenes de cada conjunto se analizaron mediante pruebas de carga a compresión, de impacto acústico y de procesamiento de imágenes, las cuales se describen a continuación.

3.2. Pruebas destructivas

La Fig. 1 muestra la instrumentación utilizada para realizar las pruebas a compresión axial. El equipo consiste en una prensa hidráulica digital marca ALCON, la cual, mediante un manómetro Helicoid con capacidad de hasta 1,569,064 Newtons, se registra la carga a compresión hasta que el elemento alcanza su límite de falla; para realizar las pruebas fue necesario utilizar discos de neopreno para nivelar las caras del espécimen y posteriormente someterlo a carga axial.

3.3. Pruebas de impacto acústico

En la Fig. 2 se muestra el arreglo utilizado para las pruebas de IA, siguiendo los métodos estandarizados para poder efectuarlas [25]. El equipo utilizado proviene de la empresa PASCO.

El método IA está basado en la dinámica de la colisión elástica entre dos cuerpos, esta colisión se llevó a cabo mediante un balón de polipropileno sujeto a una cuerda, en configuración pendular, el cual impacta al espécimen de mortero bajo estudio. Se colocaron dos sensores para poder captar la respuesta al IA; un sensor se colocó en el sentido del impacto (sensor canal A), mientras que el otro fue dispuesto de manera transversal (sensor canal B). Cada prueba se efectuó en los especímenes tanto antes como después de ser sometidos a compresión. Las respuestas acústicas fueron

capturadas a través de los sensores y la interfaz electrónica ScienceWorkshop® 750, la cual transmitía los datos al software DataStudio que permite establecer la tasa de muestreo de las señales detectadas por los sensores (5000 muestras/segundo) y el tiempo de registro (6 ms). Las pruebas de IA se realizaron en tres ocasiones para disminuir la propagación de errores y posteriormente se promediaron. La información generada se extrajo en formato tabular y se procesó con el software OriginLab 9.0® para obtener la Transformada Rápida de Fourier, así como la frecuencia dominante de cada canal, para con ésta última y la masa del mortero obtener un coeficiente de rigidez empírico E descrito por la Ec. (1) propuesto como un modelo matemático para la interpretación de vibraciones [26], con este modelo se estimó el módulo elástico.

$$E = f^2 m^{2/3} \rho^{1/3}, \tag{1}$$

donde E es el coeficiente de elasticidad (Pa), f corresponde a la frecuencia dominante de cada canal (medida en Hz), m es la masa del mortero (Kg) y ρ la densidad (Kg/m³).

3.4. Pruebas de procesamiento de imagen

La Fig. 3 muestra el arreglo experimental básico para el procesamiento de imágenes, utilizando una fuente láser (He-Ne) y una fuente UV LED. Las imágenes de los patrones de luz dispersada por una cara del mortero bajo estudio se registraron, en un ambiente oscuro, green libre de luz ambiental a la fuente usada, protegido con cortinas negras para evitar la interferencia de luz externa, con las fuentes de luz montadas en una mesa óptica anti-vibratoria, con una cámara digital de un celular iPhone 12 de 12 Mpx. Se tomaron dos registros del

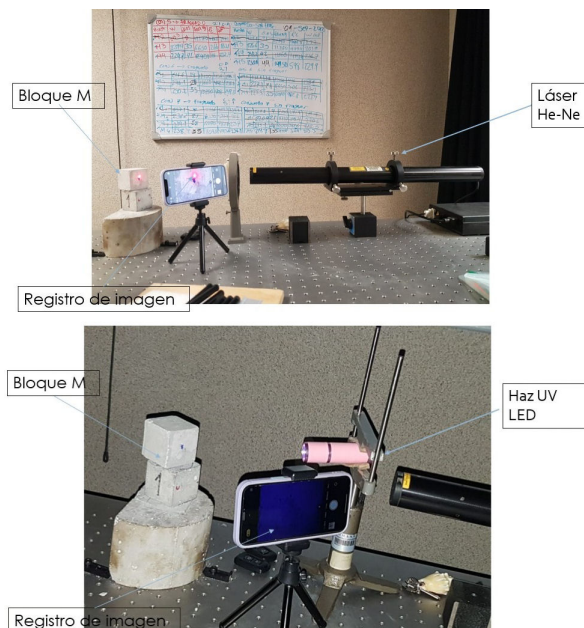


FIGURA 3. Instrumentación de pruebas ópticas con luz Láser He-Ne y luz dispersa UV LED.

patrón de luz dispersado por la cara del mortero antes y después de ser sometido a ruptura.

Los registros digitales se tomaron a un ángulo de 45°, esto con la finalidad de lograr una flexibilidad en el control y repetibilidad de las mediciones experimentales, así como una captura de imagen con características visuales apropiadas. Las imágenes se procesaron con el software Matlab 2021 en donde las imágenes en RGB se transformaron a imágenes en una escala de grises y se recortaron en una matriz de [601×601] píxeles, con éstas se determinó la entropía de imagen, la cual está basada en el concepto de entropía de Shannon conocida como la base de la información que existe en un sistema. Este concepto es aplicable a las imágenes, ya que éstas también son portadoras de información, aunque en lugar de probabilidades de ocurrencia de caracteres en un sistema (como es el caso de la entropía de Shannon), puede analizar la distribución de los valores de grises en la imagen [27].

TABLA I. Resistencia a compresión axial para el conjunto C1.

Descripción: Conjunto de bloques de mortero proporción 1:2 (cemento-arena), 261 gr de cemento y 510 gr arena

MUESTRA	Masa	Edad	Fr	Área	Rc	Masa
	Antes (fraguado)	Fr				Después
	gr	días	N	cm ²	kPa	gr
M1	235.80	7	49148.10	25	19659.24	233.80
M2	237.20	14	56996.10	25	22798.44	235.90
M3	236.80	21	53758.80	25	21503.52	235.40
M4	237.80	28	66511.80	25	26604.72	236.40

TABLA II. Resistencia a compresión axial para el conjunto C2.

Descripción: Conjunto de bloques de mortero proporción 1:3 (cemento-arena), 300 gr cemento y 900 gr arena

MUESTRA	Masa	Edad	Fr	Área	Rc	Masa
	Antes (fraguado)	Fr				Después
	gr	días	N	cm ²	kPa	gr
M1	228.30	7	29920.50	25	11968.20	225.60
M2	231.00	14	35512.20	25	14204.88	228.20
M3	230.00	21	37495.78	25	14998.31	227.80
M4	233.80	28	43589.10	25	17435.64	231.20

TABLA III. Resistencia a compresión axial para el conjunto C3.

Descripción: Conjunto de bloques de mortero proporción 1:8 (cemento-arena), 200 gr cemento y 1000 gr arena

MUESTRA	Masa	Edad	Fr	Área	Rc	Masa
	Antes (fraguado)	Fr				Después
	gr	días	N	cm ²	kPa	gr
M1	223.80	7	10398.60	25	4159.44	221.50
M2	223.90	14	13930.20	25	5572.08	220.80
M3	226.90	21	16627.95	25	6651.18	223.80
M4	223.40	28	20502.90	25	8201.16	220.50

La entropía de imagen esta definida por:

$$E_i = - \sum_{i=1}^N [p_i] \text{Ln}[p_i], \tag{2}$$

donde p_i es la probabilidad asociada al valor del tono de gris del i -ésimo píxel y N es el total de píxeles de la imagen analizada. E_i es la entropía de imagen que describe cuánta información existe en la misma, obtenida a partir de la suma de las probabilidades p_i por el logaritmo de la probabilidad de cada píxel valuado en escala de grises.

En este trabajo la Ec. (2) se aplica como sigue. Primero, se registra fotográficamente el patrón de intensidad de la luz dispersada por la muestra de mortero bajo estudio antes de su compresión a ruptura. Posteriormente, una vez que la muestra se ha llevado a su punto de ruptura, se registra la nueva imagen. Las dos imágenes se transforman a escala de grises, y se calcula su entropía según la Ec. (2).

4. Resultados experimentales

4.1. Ensayos destructivos

Las Tablas I, II y III muestran los resultados para las resistencias a compresión axial (Fr) para los conjuntos C1, C2 y C3, respectivamente; se registraron las masas antes y después de ruptura, los días de fraguado de cada una de las muestras al momento de la prueba, el área de aplicación de la fuerza distribuida y finalmente la resistencia a compresión (Rc) medida en kilopascales.

En la Fig. 4 se presenta de forma gráfica la evolución de la resistencia a compresión de los conjuntos, en cada prueba la resistencia de cada uno de los especímenes aumentó a medida del paso del tiempo hasta llegar a su resistencia última comprendida a la edad de 28 días, completando así el proceso de fraguado.

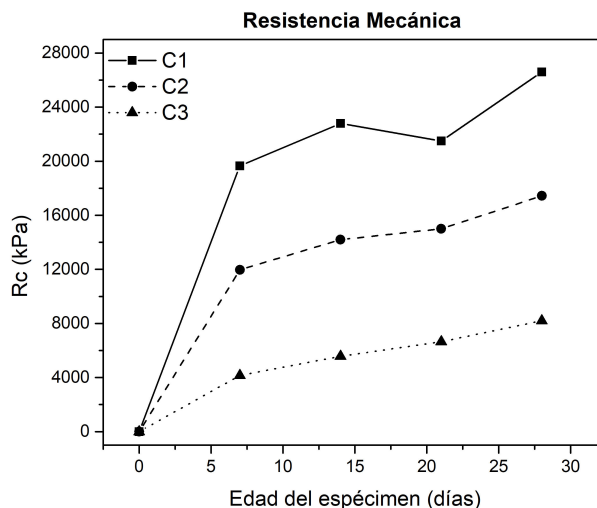


FIGURA 4. Resistencia mecánica de morteros a diferentes edades y proporciones; los puntos de cada gráfica corresponden, de izquierda a derecha, a las muestras M1, M2, M3 y M4, respectivamente.

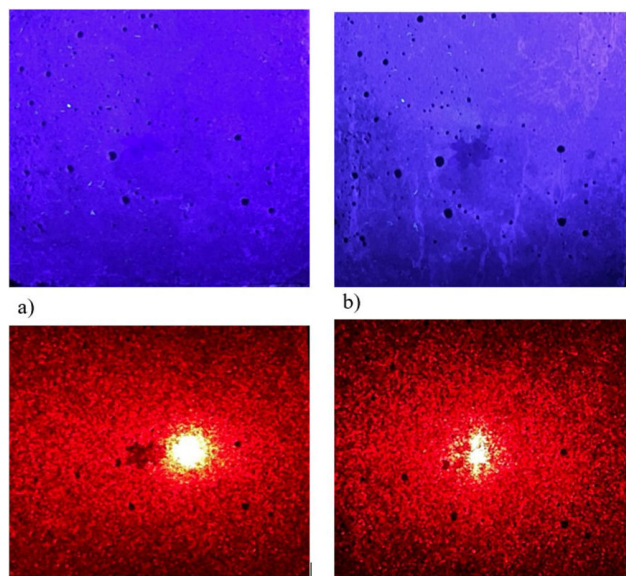


FIGURA 5. Imagen muestra de bloques de mortero; a) antes de ruptura y b) después de ruptura.

4.2. Entropía de imagen

En la Fig. 5 se muestra un ejemplo de las imágenes capturadas con las dos fuentes de luz empleadas, donde en la imagen a) se observa el espécimen antes de la ruptura y en la imagen b) se visualiza la muestra después de haber sido sometida a esfuerzos de compresión. Una vez obtenidos los registros fue necesario realizar un recorte de las imágenes, procurando evitar la zona de incidencia puntual del haz de luz proveniente

TABLA IV. Entropía de imagen del conjunto C1.

MUESTRA	Entropía	Entropía	Entropía	Entropía
	antes de Ruptura LÁSER	antes de Ruptura UV LED	después de Ruptura LÁSER	después de Ruptura UV LED
M1	7.2072	4.4519	7.4701	5.1015
M2	6.4902	5.6742	6.6129	5.8158
M3	6.5120	5.4724	6.8884	6.0637
M4	6.3648	5.6221	6.5755	6.3290

TABLA V. Entropía de imagen del conjunto C2.

MUESTRA	Entropía	Entropía	Entropía	Entropía
	antes de Ruptura LÁSER	antes de Ruptura UV LED	después de Ruptura LÁSER	después de Ruptura UV LED
M1	6.9242	5.5356	6.5830	5.7565
M2	6.3381	5.0423	6.2400	5.6559
M3	7.0008	5.6318	6.9618	5.4866
M4	7.0869	5.6182	6.9885	5.3750

TABLA VI. Entropía de imagen del conjunto C3.

MUESTRA	Entropía antes de Ruptura LÁSER	Entropía antes de Ruptura UV LED	Entropía después de Ruptura LÁSER	Entropía después de Ruptura UV LED
	M1	7.2072	4.4519	7.4701
M2	6.4902	5.6742	6.6129	5.8158
M3	6.5120	5.4724	6.8884	6.0637
M4	6.3648	5.6221	6.5755	6.3290

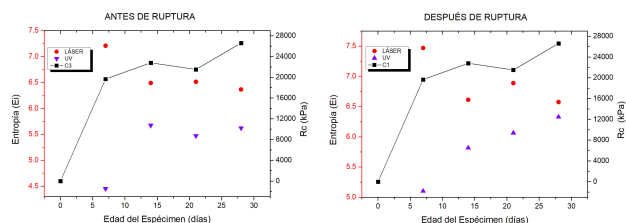


FIGURA 6. Entropía para el conjunto C1.

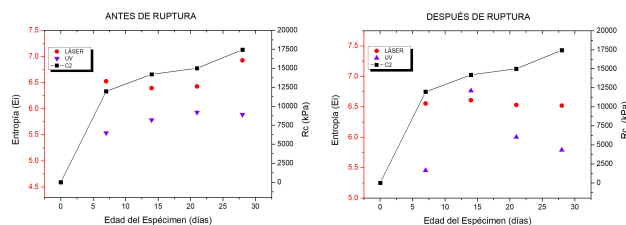


FIGURA 7. Entropía para el conjunto C2.

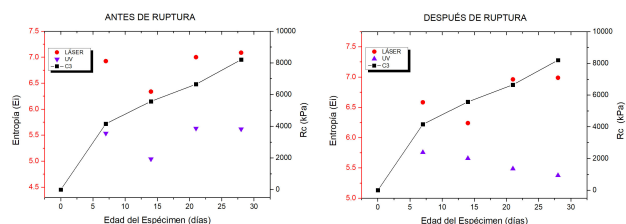


FIGURA 8. Entropía para el conjunto C3.

del láser He-Ne, ya que la saturación de píxeles lleva a una sobreestimación de la entropía de imagen. Para evitar esto, se optó por seleccionar una área de pixelado que no presentaba saturación, este proceso se realizó tanto en la imagen antes de ruptura y después de ruptura, para luz láser y luz UV LED: el recorte se realizó en un umbral de [601 × 601] píxeles.

La entropía de imagen obtenida por los registros digitales de los cubos de mortero se obtuvieron antes y después de someterlos a esfuerzos de compresión, los resultados del procesamiento de imágenes mediante la Ec. (2) se muestran en las Tablas IV, V y VI y en las Figs. 6, 7 y 8.

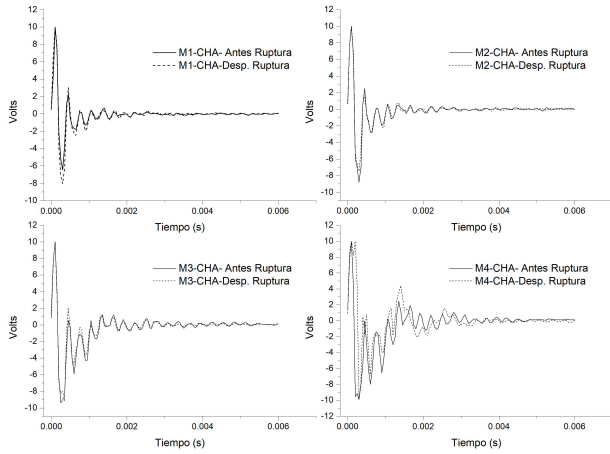


FIGURA 9. Respuesta acústica conjunto C1, antes y después de ser sometido a compresión, Canal A.

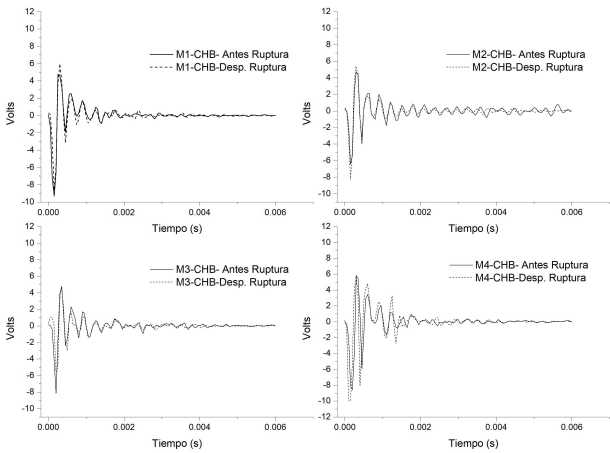


FIGURA 10. Respuesta acústica conjunto C1, antes y después de ser sometido a compresión, Canal B.

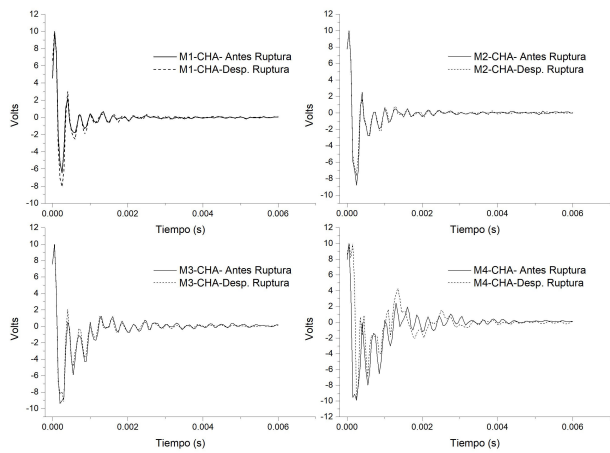


FIGURA 11. Respuesta acústica conjunto C2, antes y después de ser sometido a compresión, Canal A.

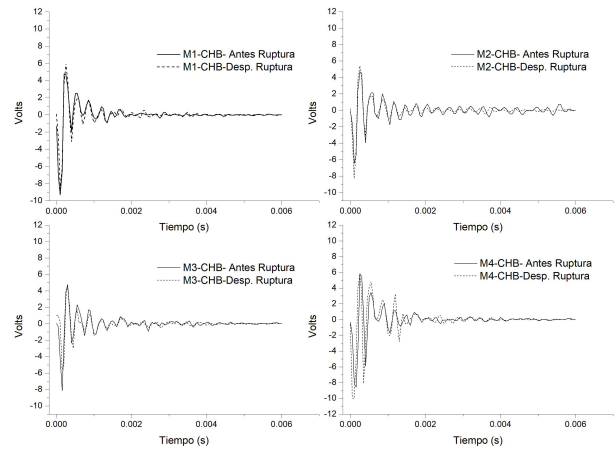


FIGURA 12. Respuesta acústica conjunto C2, antes y después de ser sometido a compresión, Canal B.

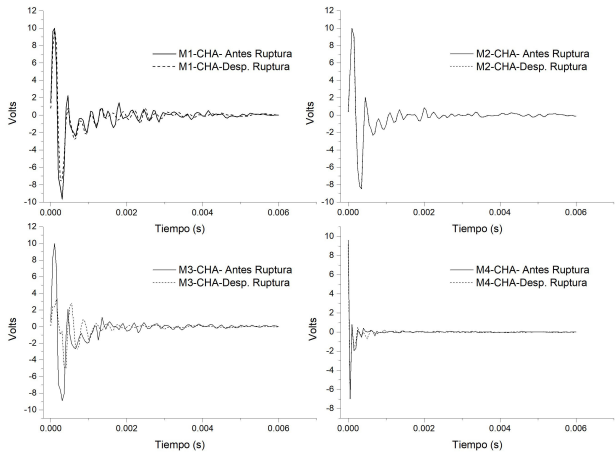


FIGURA 13. Respuesta acústica conjunto C3, antes y después de ser sometido a compresión, Canal A.

4.3. Impacto acústico

Los resultados del test de impacto acústico se muestran en las Figs. 9, 10, 11, 12, 13 y 14, en donde se observan las lecturas por el canal A y el canal B antes y después de someter las muestras a carga axial.

En las Figs. 9 y 10 se presenta el conjunto C1, en el cual, tanto para el canal A como el B se tiene un corrimiento en las ondas, sobre todo en el espécimen M4. En las Figs. 11 y 12, se muestra el conjunto C2 para los dos canales analizados, en donde nuevamente la muestra M4 es la que presenta los corrimientos más notables antes y después de la falla de la muestra. El mismo comportamiento se presenta en el conjunto C3, mostrado en las Figs. 13 y 14.

En las Figs. 15, 16 y 17 se presentan los espectros de Fourier generados a partir de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para los conjuntos C1, C2 y C3 antes y después de la ruptura.

En los espectros de Fourier son claramente visibles las frecuencias dominantes con las cuales se puede estimar el

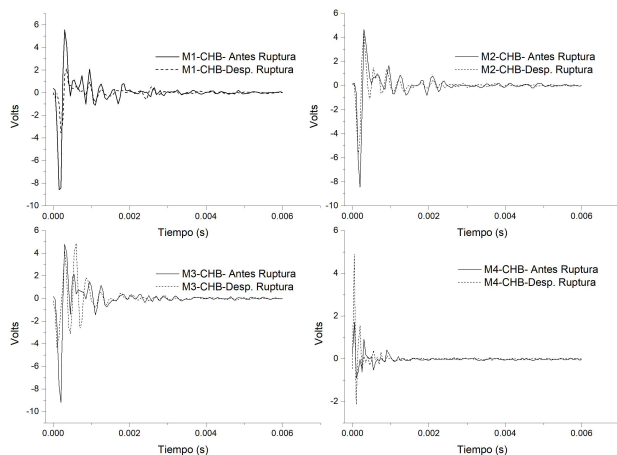


FIGURA 14. Respuesta acústica conjunto C3, antes y después de ser sometido a compresión, Canal B.

TABLA VII. Coeficiente de elasticidad para el conjunto C1.

MUESTRA	Edad (días)	Antes de Ruptura		Después de Ruptura	
		E (CHA) kPa	E (CHB) kPa	E (CHA) kPa	E (CHB) kPa
M1	7	46512.56	51537.46	46118.05	56338.12
M2	14	41993.20	51843.45	46532.29	56844.15
M3	21	46709.81	57061.02	51450.04	56723.67
M4	28	56366.46	56366.46	56034.61	56034.61

TABLA VIII. Coeficiente de elasticidad para el conjunto C2.

MUESTRA	Edad (días)	Antes de Ruptura		Después de Ruptura	
		E (CHA) kPa	E (CHB) kPa	E (CHA) kPa	E (CHB) kPa
M1	7	45033.15	55012.80	39939.57	54362.19
M2	14	40895.57	55663.41	49876.37	45013.43
M3	21	50269.79	55422.44	21035.83	54892.32
M4	28	41391.27	51100.33	36509.42	45605.19

TABLA IX. Coeficiente de elasticidad para el conjunto C3.

MUESTRA	Edad (días)	Antes de Ruptura		Después de Ruptura	
		E (CHA) kPa	E (CHB) kPa	E (CHA) kPa	E (CHB) kPa
M1	7	3962.09	4891.47	3921.37	4368.18
M2	14	4129.02	7340.48	4071.85	7980.83
M3	21	5374.56	6713.55	4695.81	7337.20
M4	28	7695.65	7695.65	7772.18	7772.18

coeficiente de elasticidad E a partir de la Ec. (1) de cada uno de los bloques que componen los conjuntos en sus respectivos canales. En las Tablas VII, VIII y IX se presentan los cálculos de los coeficientes de elasticidad para sus diferentes muestras de los conjuntos C1, C2 y C3 respectivamente.

En las Figs. 15, 16 y 17 se muestran las comparativas correspondientes al coeficiente de elasticidad (E) obtenidos a partir de la Ec. (1) y el esfuerzo a compresión obtenido por métodos destructivos.

5. Discusión y análisis

En la Fig. 4 se observa que las muestras cúbicas de mortero fueron adquiriendo mayores resistencias a lo largo del tiempo, una propiedad característica del mortero al estar en el proceso de curado, alcanzando su resistencia mecánica máxima a los 28 días; se nota el comportamiento esperado para el conjunto C1 que tiene un mayor contenido de cemento, por lo que es el conjunto que alcanza la resistencia mecánica máxima, logrando una resistencia de 26604.75 kPa en el periodo de 28 días.

Respecto a los NDT de procesamiento digital de imagen se observa en la Tabla IV y la Fig. 6 que para el C1 la entropía calculada mediante luz dispersa UV LED tiene una tendencia similar a la resistencia mecánica de dicho conjunto, ya que se puede observar que las probetas o muestras M1, M2 y M4 aumentan sus resistencias a lo largo del tiempo. Sin embargo, la muestra M3 tiene una caída en la resistencia, probablemente debido al proceso de mezclado manual de los agregados pétreos, así como al varillado que se realiza para homogenizar la mezcla en el proceso de vertido al molde, proceso que se realiza para evitar la formación de burbujas de aire que tienden a disminuir la resistencia de la muestra, por lo que suponemos que tanto el varillado como el mezclado propiciaron la aparición de dichas burbujas de aire, disminuyendo la resistencia de esta muestra en particular. Esta misma tendencia se sugiere por la entropía medida por luz UV LED, ya que su valor entrópico va en aumento, a excepción de la muestra M3 que disminuye; en cuanto al haz láser se denota un comportamiento inverso a las cargas mecánicas, a mayores resistencias denota menores valores entrópicos, este comportamiento se mantiene tanto para el análisis de las muestras antes y después de ser sometidas a esfuerzos de compresión en el conjunto C1.

Para el conjunto C2 las entropías medidas por medio de luz UV LED antes de ser sometidos a cargas axiales muestran un comportamiento que sigue la tendencia de la resistencia mecánica del esfuerzo medido ya que ésta aumenta a medida que aumenta la resistencia a compresión del conjunto, este comportamiento se observa en la Tabla V y la Fig. 7. En esta última, la Fig. 7, para el conjunto C2, muestra en promedio, para ambas iluminaciones láser y UV LED, una tendencia creciente en la entropía antes de la ruptura, y una tendencia decreciente después de la ruptura. Este comportamiento, en principio, es esperado ya que después de la ruptura se produce un área de aplanamiento en la región en donde actúa el brazo de la máquina de compresión, lo que origina una disminución en la rugosidad de la muestra. Esto, sin embargo, no se presenta para el conjunto C1 y C3; para C3 solo el caso de iluminación UV LED presenta en promedio un comportamiento similar al caso C2, en tanto el resto de los resultados

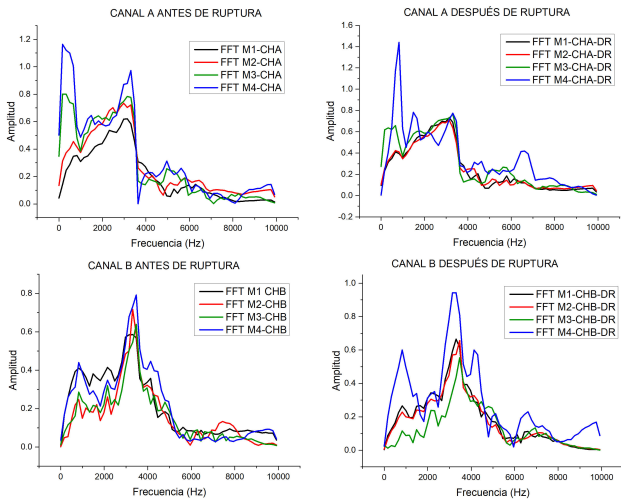


FIGURA 15. Coeficiente de elasticidad y esfuerzo del conjunto C1.

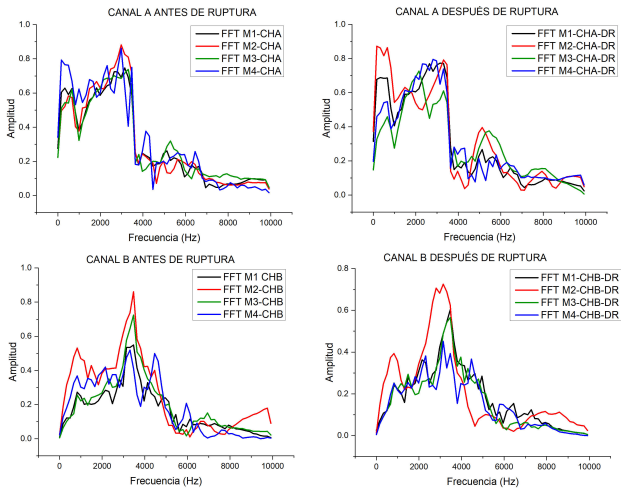


FIGURA 16. Coeficiente de elasticidad y esfuerzo del conjunto C2.

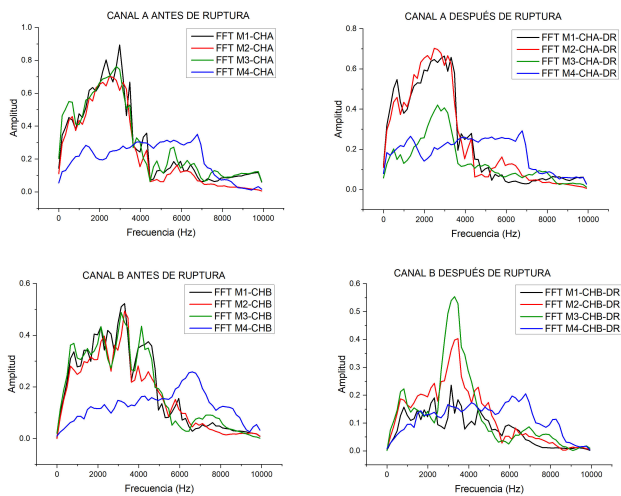


FIGURA 17. Coeficiente de elasticidad y esfuerzo del conjunto C3.

muestra un comportamiento parcial al esperado. Creemos que estas discrepancias pudieran explicarse en errores de alineación al iluminar las muestras.

Para el conjunto C3, la Tabla VI y la Fig. 8 en las pruebas entrópicas se observa una tendencia gradual en aumento, a excepción de la muestra M1 correspondiente a la edad de 7 días de curado, esta muestra adquiere un alto valor entrópico y posteriormente en la muestra M2 disminuye para volver a aumentar en las pruebas consecutivas.

Los resultados obtenidos del impacto acústico muestran diferencias entre las señales captadas por los dos sensores, Figs. 9-14, lo cual es de esperarse por la naturaleza inhomogénea del mortero [28,29]. Esta discrepancia no puede explicarse como una diferencia de fase entre las señales, como lo evidencian los espectros de Fourier mostrados en las Figs. 15-17 correspondientes a los conjuntos C1, C2 y C3 respectivamente. Las frecuencias dominantes, corresponden a las frecuencias de resonancia de máxima amplitud de los espectros, permiten, vía la Ec. (1), la estimación del coeficiente de elasticidad E , Tablas VII-IX. Nótese que hay una buena concordancia entre los valores de E y los de la resistencia a compresión, Figs. 18-20.

Respecto al conjunto C1, en la Fig. 18 se observa que los valores del coeficiente de elasticidad obtenidos por la técnica

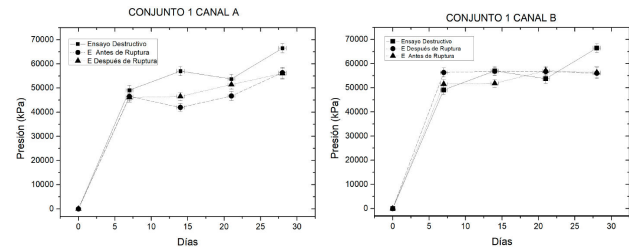


FIGURE 18. Coeficiente de elasticidad y esfuerzo del conjunto C1.

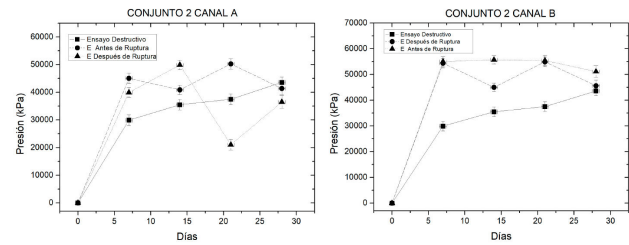


FIGURE 19. Coeficiente de elasticidad y esfuerzo del conjunto C2.

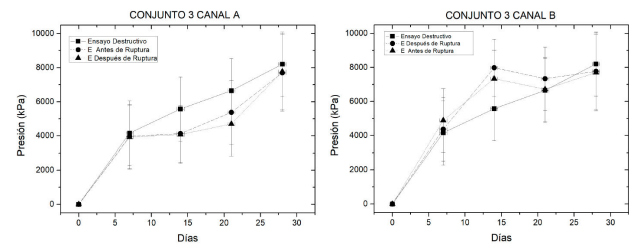


FIGURE 20. Coeficiente de elasticidad y esfuerzo del conjunto C3.

de IA son valores relativamente cercanos a los obtenidos por métodos convencionales, en donde el canal correspondiente al sensor B, antes y después de ruptura, es el que genera valores más cercanos al esfuerzo obtenido por la prensa hidráulica; para el conjunto C2, en la Fig. 19, también se observan valores similares a los obtenidos por métodos destructivos, en este conjunto la prueba de IA en el canal A, antes de ser sometido a ruptura, es el canal que brinda los valores más similares al esfuerzo a compresión y por último, para el conjunto de morteros C3, Fig. 20, al igual que el conjunto C1, se obtuvieron valores cercanos a los registrados con la prensa hidráulica siendo el canal A (antes y después de ruptura) el sensor que registró los valores más similares a las técnicas destructivas, especialmente en las muestras M1 y M4.

Cabe aclarar que las Fig. 15-17 son los espectros de Fourier de las señales acústicas mostradas en las Figs. 9-11 sin filtraje alguno. La determinación precisa de las frecuencias fundamentales es afectada principalmente por el ruido existente en la señal. Para minimizar el error en la determinación de la frecuencia fundamental de los espectros de Fourier, se consideró solo la ventana de tiempo al inicio de la máxima amplitud de la señal temporal y se cortó a los 4 milisegundos. Esto permitió reducir el efecto del ruido intrínseco de la señal original.

De los conjuntos analizados por IA, el conjunto de morteros C1 es el que obtuvo los valores más cercanos al esfuerzo a compresión obtenido por métodos destructivos, logrando obtener un error relativo de 15.75 % y 0.26 % para el canal B después de ser sometido a ruptura, generando los valores más precisos de los tres conjuntos analizados.

6. Conclusiones

El mortero es uno de los materiales de construcción más ampliamente utilizado, cuya característica estructural más importante es su resistencia a compresión; la determinación de ésta mediante diferentes métodos no destructivos es un tema estudiado actualmente. Con base a la experimentación anteriormente presentada se puede concluir que los resultados de las pruebas de impacto acústico como un NDT es una herramienta alternativa eficaz para la caracterización mecánica, ya

que esta permite obtener el módulo de elasticidad del material estudiado mediante el coeficiente de elasticidad propuesto, pudiendo presentar una precisión de hasta 0.26 % respecto a las técnicas convencionales, deduciendo que este método es adecuado para la investigación rápida de elementos estructurales constituidos de mortero en ensayos de laboratorio y campo. Cabe mencionar que para reducir la influencia de los factores que alteren los resultados, la prueba debe repetirse al menos 3 veces en cada espécimen de prueba en un ambiente libre de ruidos externos al sistema.

Respecto a las pruebas de procesamiento de imágenes estas denotan ser una gran herramienta para caracterizar la tendencia del coeficiente de elasticidad, sobre todo al trabajar con luz dispersa ultravioleta UV LED, ya que las pruebas realizadas con ésta fueron las que lograron describir el comportamiento de la resistencia del material, sin embargo, es necesario desarrollar más esta técnica ya que al momento sólo es capaz de predecir la tendencia del comportamiento de la resistencia a compresión del elemento.

Los resultados obtenidos nos llevan a concluir que las propuestas descritas en este trabajo pueden instrumentarse como técnicas alternas para analizar propiedades mecánicas de estructuras usadas en el sector ingenieril ya que, en la actualidad los métodos convencionales en la industria de la construcción se limitan a la utilización de técnicas destructivas. La aplicación de procesamiento de imágenes e impacto acústico puede ser una herramienta complementaria para determinar la estabilidad mecánica de diversos materiales. El objetivo de aplicar las técnicas descritas en este trabajo es mostrar su utilidad como pruebas no invasivas complementarias a las técnicas tradicionales usadas en el campo de la ingeniería. Dada la facilidad de implementación de las técnicas reportadas en este trabajo y con el avance tecnológico en los dispositivos celulares, bien se podría disponer en el corto plazo de un dispositivo compacto para monitorear en campo la vida útil de estructuras de concreto y mortero.

Agradecimientos

YCS agradece el apoyo financiero de parte de la CIC-UMSNH con número 8762877/2024.

1. T. Uomoto, *Non-destructive testing in civil engineering* 2000, 1st ed. (Elsevier, Berlin, Germany, 2000), pp. 230-283.
2. F. Pacheco-Torgal *et al.*, *Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes*, 1st ed. (Elsevier, 80 High St., Sawston, Cambridge, 2014), pp. 36-37.
3. J. M. Ortega *et al.*, Non-destructive evaluation of the effects of exposure environment in mortars using non-linear ultrasonic measurements, *Developments in the Built Environment* **14** (2023) 100142, <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100142>.
4. A. Arizzi, J. Martínez-Martínez, and G. Cultrone, Ultrasonic wave propagation through lime mortars: an alternative and non-destructive tool for textural characterization, *Materials and structures* **46** (2013) 1321, <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9976-1>.
5. E. Carrasco *et al.*, Characterization of mortars with iron ore tailings using destructive and nondestructive tests, *Construction and Building Materials* **131** (2017) 31, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.065>.

6. J. Žalsk'y *et al.*, Development of a new nondestructive method for the in-situ determination of mortar strength, *Buildings* **13** (2023) 273, <https://doi.org/10.3390/buildings13020273>.
7. I. Ivanchev, Investigation with Non-Destructive and Destructive Methods for Assessment of Concrete Compressive Strength, *Appl. Sci* **12** (2022) 12172, <https://doi.org/10.3390/app122312172>.
8. D. S. Guzmán, *Tecnología del concreto y del mortero*, 5th ed. (Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia, 2001), pp. 45-48.
9. C. A. Sciammarella and F. M. Sciammarella, *Experimental Mechanics of Solids*, 1st ed. (John Wiley & Sons, West Sussex, United Kingdom, 2012), pp. 207-249.
10. Y.-K. Zhu *et al.*, A review of optical NDT technologies, *Sensors* **11** (2011) 7773, <https://doi.org/10.3390/s110807773>.
11. R. Beutel *et al.*, Comparative performance tests and validation of NDT methods for concrete testing, *Journal of Nondestructive Evaluation* **27** (2008) 59, <https://doi.org/10.1007/s10921-008-0037-1>.
12. K. Ramesh and S. Sasikumar, Digital photoelasticity: Recent developments and diverse applications, *Optics and Lasers in Engineering* **135** (2020) 106186, <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106186>.
13. J. F. Lamond and J. H. Pielert, Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials, vol. 169 (ASTM international, West Conshohocken, USA, 2006), pp. 133-136.
14. C. Maierhofer, H.-W. Reinhardt, and G. Dobmann, *Nondestructive evaluation of reinforced concrete structures*, 1st ed. (Elsevier, Great Abington, Cambridge, 2010), pp. 466-487.
15. J.-P. Balayssac and V. Garnier, *Non-destructive Testing and Evaluation of Civil Engineering Structures*, 1st ed. (Elsevier, Great Britain and the United States, 2017), pp. 43-48.
16. M. Ohtsu, The history and development of acoustic emission in concrete engineering, *Magazine of Concrete Research* **48** (1996) 321, <https://doi.org/10.1680/macrc.1996.48.177.321>.
17. C.-C. Cheng and M. Sansalone, Determining the minimum crack width that can be detected using the impact-echo method Part 1: Experimental study, *Materials and Structures* **28** (1995) 74-82, <https://doi.org/10.1007/BF02473174>.
18. C.-C. Cheng and M. Sansalone, Determining the minimum crack width that can be detected using the impact-echo method Part 2. Numerical fracture analyses, *Materials and Structures* **28** (1995) 125-132, <https://doi.org/10.1007/BF02473219>.
19. E. Hecht, *Óptica*, 3rd ed. (Addison Wesley Iberoamericana S. A, 2000), pp. 86-100.
20. J. Butters and J. Leendertz, Holographic and video techniques applied to engineering measurement, *Measurement and Control* **4** (1971) 349, <https://doi.org/10.1177/002029407100401201>.
21. D. Zhu, B. Mobasher, and S. Rajan, Non-contacting strain measurement for cement-based composites in dynamic tensile testing, *Cement and Concrete Composites* **34** (2012) 147, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.09.011>.
22. H. N. Chen, R. K. L. Su, and J. J. Chen, Study on fracture properties of mortar based on electronic speckle pattern interferometry, In *Materials Science Forum*, vol. **893** (Trans Tech Publ, 2017) pp. 405-409, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.893.405>.
23. G. A. G. Méndez, *Inferometría electrónica de patrones de moteado y desplazamiento de fase simultáneo usando técnicas de polarización*, Tesis doctoral, Centro de Investigaciones Ópticas A.C. (2020), Disponible en <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1002/1186>.
24. Y. Karaca, *Multi-Chaos, Fractal and Multi-Fractional Artificial Intelligence of Different Complex Systems*, 1st ed. (Elsevier, University of Massachusetts Medical School, Worcester, MA, United States, 2022), pp. 231-243.
25. A. S. for Testing and Materials, *Standard Test Method for Measuring the P-Wave Speed and the Thickness of Concrete Plates Using the Impact-Echo Method*, Vol. **04.02** ed. (Annual book of ASTM Standards, Great Abington, Cambridge, 2000), pp. 1-11.
26. F. Duprat *et al.*, The acoustic impulse response method for measuring the overall firmness of fruit, *Journal of agricultural engineering research* **66** (1997) 251, <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0143>.
27. D. H. Pacheco, A. F. Ruiz, and A. T. Crispí, Paquete de Estadística Descriptiva para la Extracción de Rasgos en Imágenes, In *XIII Convention of Electrical Engineering CIE 2007* (2007) pp. 1-4.
28. B. A. Auld, *Acoustic fields and waves in solids*, Vol I, 1st ed. (Wiley-Interscience publication, Stanford University, 1973), pp. 333-395.
29. B. A. Auld, *Acoustic fields and waves in solids*, Vol. II, 1st ed. (Wiley-Interscience publication, Stanford University, 1973), pp. 1-12.