

Experimental and Numerical Evaluation of the Mechanical Behavior of Masonry Units and Piles with Artisanal and Industrial Bricks Using FEM

Henrry Josué Villanueva Bazán¹, Gabriel Jesús Cárdenas Marín², Dayanna Mayte Díaz Cerna³
^{1,2,3} UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE, henrry.villanueva@upn.edu.pe, N00244316@upn.pe, N00244316@upn.pe

Abstract—This study analyzes the mechanical behavior of masonry units and piles made with artisanal and industrial bricks through experimental tests and numerical simulations using the Finite Element Method (FEM). Axial compression tests were performed in the laboratory to determine the strength, deformation, and modulus of elasticity of each material. The experimental results showed significantly higher strength in industrial bricks, reaching up to 152.45 kg/cm² in units and 94.00 kg/cm² in piles, compared to 97.65 kg/cm² and 24.99 kg/cm² for artisanal bricks, respectively. Numerical models were subsequently calibrated in ABAQUS FEA, achieving a correlation of less than 3.75% with respect to physical tests. Common errors in experimentation, such as inadequate load application or omission of initial deformations, were also evaluated. The results highlight the importance of characterizing materials locally and adjusting constitutive models according to the region. Finally, it is proposed that FEM simulation, which also evaluates shear strength and calibrates a numerical model in ABAQUS with a margin of error of less than 3.75%, reinforcing the validity of the results, can be an effective tool for the structural design of masonry systems, especially in areas such as Cajamarca, where the use of artisanal brick is common.

Keywords—Masonry, Compression testing, Finite element analysis, Constitutive model and finite element analysis (FEA)

Evaluación Experimental y Numérica del Comportamiento Mecánico de Unidades y Pilas de Albañilería con Ladrillo Artesanal e Industrial mediante FEM

Henrry Josué Villanueva Bazán¹, Gabriel Jesús Cárdenas Marín¹, Dayanna Mayte Díaz Cerna³
^{1,2,3}UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE, henrry.villanueva@upn.edu.pe, N00244316@upn.pe, N00244316@upn.pe

Resumen—Este estudio analiza el comportamiento mecánico de unidades y pilas de albañilería fabricadas con ladrillos artesanales e industriales, mediante ensayos experimentales y simulaciones numéricas mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM). Se realizaron pruebas de compresión axial en laboratorio para determinar la resistencia, deformación y módulo de elasticidad de cada tipo de material. Los resultados experimentales evidenciaron una resistencia significativamente mayor en los ladrillos industriales, alcanzando hasta 152.45 kg/cm^2 en unidad y 94.00 kg/cm^2 en pila, frente a 97.65 kg/cm^2 y 24.99 kg/cm^2 del ladrillo artesanal, respectivamente. Posteriormente, se calibraron modelos numéricos en ABAQUS FEA, logrando una correlación inferior al 3.75 % respecto a los ensayos físicos. Se evaluaron además los errores comunes en la experimentación, como la aplicación inadecuada de carga o la omisión de deformaciones iniciales. Los resultados resaltan la importancia de caracterizar los materiales localmente y ajustar los modelos constitutivos según la región. Finalmente, se propone que la simulación FEM, También se evalúa la resistencia al corte y se calibra un modelo numérico en ABAQUS con un margen de error menor al 3.75 %, lo cual refuerza la validez de los resultados, cuando se calibra adecuadamente, puede ser una herramienta eficaz para el diseño estructural de sistemas de albañilería, especialmente en zonas como Cajamarca, donde el uso del ladrillo artesanal es frecuente.

Palabras clave—Albañilería, Ensayo a compresión, Elementos finitos, Modelo constitutivo y elementos finitos (FEA)

I. INTRODUCCIÓN

A nivel internacional, la albañilería ha sido ampliamente utilizada como sistema estructural en edificaciones de bajo y mediano costo, particularmente en zonas con alta densidad poblacional y limitaciones económicas [1]. En regiones sísmicamente activas como Asia y América Latina, se ha evidenciado que el colapso de estructuras de albañilería mal diseñadas o construidas ha sido una de las principales causas de pérdidas humanas y materiales en eventos como los terremotos de Haití (2010), México (2017) o Turquía (2023) [2].

En Latinoamérica, numerosos estudios han intentado caracterizar la resistencia mecánica de los materiales usados en la albañilería, sin embargo, estos esfuerzos tienden a concentrarse en zonas urbanas con acceso a productos industriales normalizados [3], [4]. Por el contrario, regiones rurales y altoandinas como Cajamarca, en Perú, utilizan en gran medida ladrillo artesanal y morteros empíricos, cuyas

propiedades varían significativamente en función del proceso de fabricación, el tipo de suelo local y la calidad del curado [5].

Desde el punto de vista estructural, existe una necesidad urgente de generar modelos físicos y numéricos ajustados a las condiciones reales de cada zona, ya que aplicar modelos genéricos o internacionales puede conducir a sobreestimaciones de resistencia o fallas prematuras. Por ejemplo, el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión de una pila de ladrillo artesanal en Cajamarca puede ser 30% menor que la estimada con valores normativos peruanos (E.070) [6].

El modelado numérico con elementos finitos (FEM) ha demostrado ser una herramienta eficaz para predecir el comportamiento de unidades y pilas de albañilería [7], pero su precisión depende de una correcta caracterización experimental local. Sin datos confiables, cualquier simulación estructural pierde validez práctica, especialmente cuando se trata de diseñar viviendas en zonas sísmicas como la sierra norte del Perú.

En el contexto peruano, y específicamente en la región de Cajamarca, el uso de ladrillos artesanales con bajo nivel de estandarización, junto con morteros de dosificación empírica, genera sistemas de albañilería cuya capacidad resistente y rigidez estructural no se ajustan necesariamente a los valores referenciales establecidos por la Norma Técnica E.070 del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) [8], [9]. Esta disparidad puede llevar a sobreestimaciones peligrosas del comportamiento estructural si se utilizan modelos FEM con parámetros no representativos de la realidad local [10].

Además, en contextos donde la autoconstrucción es común y la fiscalización técnica escasa, como en más del 70% de las viviendas rurales de Cajamarca, disponer de modelos estructurales validados puede ser clave para prevenir fallas estructurales, guiar normas técnicas adaptadas y orientar a gobiernos regionales en políticas de vivienda segura [8].

El comportamiento mecánico de la albañilería es inherentemente complejo debido a su naturaleza heterogénea, anisotrópica y frágil. La combinación de unidades (ladrillos o bloques) y mortero genera un sistema estructural compuesto que presenta discontinuidades, concentraciones de esfuerzos, fisuración progresiva y acoplamiento entre deformaciones axiales y laterales. Estas características hacen que los métodos clásicos de análisis estructural basados en simplificaciones

elásticas homogéneas no sean suficientes para describir con precisión la respuesta de muros, columnas o pilas de albañilería ante cargas reales [11], [12].

En este contexto, el método de los elementos finitos (FEM) se ha consolidado como una herramienta poderosa para simular el comportamiento físico de sistemas estructurales con alta fidelidad, permitiendo estudiar la distribución de tensiones, deformaciones, fisuras incipientes, zonas de concentración de esfuerzo, y efectos de confinamiento o restricción. A través de FEM es posible modelar de manera diferenciada los materiales constituyentes —ladrillo y mortero— o bien emplear modelos macrohomogéneos calibrados experimentalmente [13].

La necesidad de aplicar FEM en este estudio radica en tres aspectos fundamentales:

- **Calibración precisa del modelo estructural:** el análisis experimental proporciona datos puntuales sobre la resistencia y rigidez de unidades y pilas de ladrillo. No obstante, solo mediante simulaciones FEM es posible extrapolar estos datos a diferentes configuraciones estructurales y evaluar su comportamiento bajo condiciones no lineales o complejas [14].
- **Validación de hipótesis de diseño estructural:** los modelos numéricos permiten comprobar la influencia de variables como la altura del prisma, el espesor de la junta, la rigidez relativa entre mortero y ladrillo, y el confinamiento, sin necesidad de realizar múltiples ensayos físicos, lo que optimiza tiempo y recursos [15].
- **Generación de parámetros realistas para diseño sísmico:** en zonas como Cajamarca, donde predominan edificaciones de albañilería sin refuerzo y con materiales locales, el FEM calibrado permite estimar de forma confiable los parámetros estructurales que alimentan modelos de análisis sísmico de mayor escala, como métodos estáticos equivalentes o análisis dinámicos no lineales [16].

En suma, el análisis por elementos finitos no solo complementa el estudio experimental, sino que resulta esencial para desarrollar modelos predictivos del comportamiento estructural de la albañilería. Su aplicación en este proyecto permitirá identificar con mayor precisión los márgenes de seguridad estructural de los muros de ladrillo construidos con materiales locales, aportando así a la mejora del diseño y evaluación sísmica en contextos regionales.

Diversos estudios recientes han destacado el potencial del análisis por elementos finitos (FEM) para modelar el comportamiento estructural de la mampostería. Esta técnica ha demostrado ser particularmente útil para simular la distribución de tensiones, la aparición de fisuras y la degradación de la rigidez, aspectos críticos para la seguridad estructural de unidades y pilas de ladrillo.

Khan y Ali [17] propusieron un enfoque híbrido que combina el método analítico LADM con el FEM para resolver

ecuaciones diferenciales no lineales. Aunque el caso de estudio se basó en el modelo Brusselator, su aplicación es pertinente para materiales como la mampostería, que presentan comportamiento no lineal. Los autores reportaron un error menor al 3%, indicando alta precisión en la convergencia numérica del modelo propuesto.

Wang et al. [18] desarrollaron un modelo tridimensional simplificado en FEM para simular la resistividad de contacto entre materiales, con aplicaciones en zonas de interfaz como las juntas entre ladrillo y mortero. El modelo mostró una desviación menor al 5% respecto a los ensayos físicos, lo que valida su uso para representar interfaces estructurales con bajo costo computacional.

En otro contexto, Fang y Su [19] realizaron un análisis térmico-transitorio en cucharas de acero industrial utilizando FEM, obteniendo tensiones térmicas máximas de hasta 18.4 MPa. Aunque el material base difiere, el método puede extrapolarse a estructuras de mampostería expuestas a calor extremo, como en escenarios de incendio.

En el ámbito estructural, Bawono [20] aplicó un modelo FEM tridimensional para evaluar la resistencia al desgaste de pavimentos de concreto reforzado con fibras (ECC). La simulación identificó el inicio de la deformación plástica a partir de los 26 MPa, ofreciendo una base metodológica útil para estudiar el daño acumulativo en muros o pilas de albañilería sometidos a cargas repetitivas.

Uno de los estudios más significativos en el área es el de Drougkas, Roca y Molins [21], quienes validaron un modelo de daño-plasticidad para mampostería utilizando el software Abaqus. El modelo, basado en micro-modelado detallado, estimó una resistencia a compresión de 4.5 MPa ($\approx 45 \text{ kg/cm}^2$) y un módulo de elasticidad de 2400 MPa, con un error menor al 10% respecto a ensayos de laboratorio.

Nguyen, Lourenço y Roca [22]模拟aron pilas de ladrillo sometidas a carga axial empleando un modelo FEM con interacción explícita entre ladrillo y mortero. El modelo predijo la aparición de fisuración a 3.2 MPa ($\approx 32 \text{ kg/cm}^2$) y estimó el módulo de elasticidad entre 1200 y 1900 MPa, mostrando una excelente correlación con datos experimentales.

Nazimi et al. [23] llevaron a cabo un estudio con el objetivo de evaluar la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad de prismas de albañilería conformados por ladrillos de arcilla cocida y diferentes tipos de mortero. Aplicaron ensayos experimentales y, posteriormente, desarrollaron un modelo por elementos finitos (FEM) en Abaqus para simular el comportamiento mecánico de los especímenes. Se reportaron resistencias entre 5.4 y 13.7 MPa, y módulos de elasticidad entre 1,200 y 3,000 MPa, observándose una relación $\eta = E_m/f_m$ de hasta 230. Los autores concluyeron que, con una adecuada calibración, los modelos FEM son capaces de predecir de forma fiable el comportamiento estructural de la albañilería, considerando la influencia del tipo de ladrillo y del mortero.

En otro estudio, Abasi [24] analizó la influencia de la geometría del prisma sobre su resistencia, centrándose en la

relación altura/grosor (h/t). Utilizó un modelo microestructural FEM que consideraba explícitamente la interfaz ladrillo-mortero. Los resultados experimentales mostraron resistencias entre 6.4 y 9.8 MPa, las cuales fueron replicadas por el modelo numérico con un error inferior al 5%. Este estudio evidenció que la geometría del espécimen tiene un impacto relevante sobre la resistencia aparente y que es necesario incorporar factores correctivos cuando se realiza modelado estructural o evaluación normativa.

Zhu et al. [25] investigaron el efecto del relleno con grout en prismas de albañilería, tanto desde una perspectiva experimental como mediante simulación numérica. Encontraron que los prismas completamente llenos mostraban un incremento del 35% en su resistencia a compresión, alcanzando hasta 8.8 MPa. El modelo FEM no lineal implementado logró reproducir con precisión las curvas esfuerzo-deformación obtenidas en laboratorio. Concluyeron que el relleno con grout es una estrategia efectiva para incrementar la capacidad portante de los elementos, y que la simulación numérica constituye una herramienta confiable para su análisis.

Chaimae et al. [26] se centraron en el análisis de muros de albañilería con diferentes configuraciones de conexión estructural, tales como uniones muro-losa o muro-esquina. Mediante modelado tridimensional en ANSYS, simularon el comportamiento global de estas configuraciones bajo cargas laterales. Aunque no se reportaron valores puntuales de resistencia, el estudio permitió identificar zonas de concentración de esfuerzos y reducción de rigidez por falta de continuidad estructural. Los autores concluyeron que el diseño adecuado de las conexiones tiene un impacto directo sobre el desempeño global, y que el modelado FEM es indispensable para comprender estas interacciones.

En su investigación, Al-Fakih et al. [27] evaluaron el uso de refuerzos exteriores en prismas de albañilería mediante mallas metálicas y fibras poliméricas, aplicando un modelo de daño plástico en ANSYS. Se observaron incrementos de hasta un 68% en la resistencia a compresión (de 5.6 a 9.4 MPa), y las simulaciones predijeron adecuadamente la evolución de la fisuración. El estudio concluyó que el refuerzo externo mejora significativamente el comportamiento estructural, y que los modelos de daño son apropiados para representar el proceso de degradación progresiva en elementos de albañilería.

Finalmente, Álvarez-Pérez et al. [28] combinaron análisis experimental y numérico para evaluar la influencia del tipo de mortero sobre la resistencia de prismas de bloques. Aplicaron un modelo FEM paramétrico junto con un diseño de superficie de respuesta para evaluar diferentes combinaciones de materiales. Se obtuvieron resistencias entre 6.1 y 11.4 MPa, evidenciando que un mayor módulo del mortero no siempre conduce a mayor resistencia del prisma. Los autores concluyeron que los métodos tradicionales subestiman el impacto combinado de los parámetros materiales, y que el enfoque numérico permite optimizar configuraciones sin requerir grandes campañas experimentales.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación adopta como base técnica y normativa los lineamientos establecidos en la Norma Técnica Peruana E.070 – Albañilería del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) [29], aplicando sus disposiciones tanto en la fase experimental como en el modelado numérico.

- **Ensayos físicos conforme a la E.070**

De acuerdo con el **numeral 12.3.1** de la norma E.070, se establece que la resistencia a compresión de prismas (f'_m) debe determinarse experimentalmente mediante ensayos en pilas de tres hiladas, construidas con las unidades (ladrillos) y morteros representativos del proyecto. En este estudio, se construyeron pilas de tres hiladas tanto para ladrillo artesanal como ladrillo industrial, siguiendo esta especificación.

Asimismo, conforme al numeral 12.4, la resistencia a compresión de las unidades de albañilería fue determinada mediante ensayos individuales, cumpliendo los criterios dimensionales y de carga de la norma ASTM C67, que es referenciada por el RNE.

- **Determinación del módulo de elasticidad**

Aunque la E.070 no establece un procedimiento específico para determinar el módulo de elasticidad (E_m), se considera aceptable adoptar el valor estimado a partir de la pendiente secante entre 0.05 y 0.33 f'_m , tal como recomiendan otras normas complementarias (como la ACI 530/ASCE 5/TMS 402) y estudios previos peruanos y latinoamericanos [30], [31]. Además, se considera como valor aproximado reglamentario el producto:

$$Em=700 \cdot fm' (\text{con } f'_m \text{ en kg/cm}^2)$$

Sin embargo, este estudio busca comparar dicha aproximación normativa con resultados obtenidos experimentalmente para unidades fabricadas localmente en Cajamarca, tanto artesanales como industriales.

- **Aplicación normativa en el análisis FEM**

Aunque la norma E.070 no establece lineamientos específicos para modelado numérico, los valores de entrada para el análisis con ABAQUS (módulo de elasticidad, resistencia, densidad) han sido definidos según los resultados experimentales y contrastados con los valores empíricos de la normativa. Para efectos comparativos y validación del modelo, se han evaluado las diferencias entre los valores normativos estimados y los valores reales obtenidos en laboratorio, verificando la precisión de la relación:

$$E \text{ norma}=700 \cdot fm' \text{ vs } E_{exp}$$

Además, en el caso del ladrillo artesanal, se observa que esta relación tiende a sobreestimar el módulo real, situación que la norma no contempla de forma explícita, evidenciando la necesidad de ajustar los parámetros según el origen y tipo de unidad utilizada, como también lo sugieren estudios recientes en el país [32].

III. RESULTADOS

En la región de Cajamarca, diversos estudios han evidenciado diferencias marcadas entre las propiedades físicas

y mecánicas del ladrillo artesanal y del ladrillo industrial tipo King Kong, ambos comúnmente utilizados en la construcción de viviendas de albañilería confinada. El ladrillo artesanal, producido en hornos rústicos con control limitado de temperatura y compactación manual, presenta dimensiones promedio de $24 \times 11 \times 6.5$ cm, mientras que el ladrillo industrial muestra una geometría más uniforme, con medidas de $25 \times 12 \times 7.0$ cm, acorde a estándares de fábrica.

En términos de densidad seca, el ladrillo artesanal registra valores entre 1,600 y 1,700 kg/m³, reflejando una porosidad mayor y un menor nivel de compactación. En cambio, el ladrillo industrial alcanza densidades de hasta 2,000 kg/m³, lo que se traduce en una masa volumétrica más estable y controlada [2]. Esta diferencia también se ve reflejada en la absorción de agua, donde el ladrillo artesanal presenta tasas entre 18 % y 22 %, frente al 13 %-15 % del ladrillo industrial. Del mismo modo, la succión inicial (medida en g/min/30cm²) es considerablemente más alta en el ladrillo artesanal (35-40) que en el industrial (20-25), lo cual influye directamente en la calidad de adherencia del mortero durante la construcción.

Respecto a la resistencia mecánica, las diferencias son aún más significativas. Los ensayos de compresión uniaxial realizados en laboratorio indicaron que la resistencia característica unitaria ($f'c$) del ladrillo artesanal fue de aproximadamente 97.65 kg/cm², mientras que la del ladrillo industrial alcanzó 152.45 kg/cm². En los ensayos de prismas de tres hiladas ($f'm$), el ladrillo artesanal alcanzó un valor medio de 24.99 kg/cm², en contraste con los 94.00 kg/cm² del ladrillo industrial. Además, en pruebas de resistencia al corte en muretes inclinados, el valor promedio para el ladrillo artesanal fue de 5.38 kg/cm², mientras que para el industrial fue de 16.78 kg/cm², evidenciando una mayor capacidad de los ladrillos industriales para resistir esfuerzos tangenciales.

TABLA I
PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL LADRILLO

Propiedad	Ladrillo Artesanal	Ladrillo Industrial (King Kong)
Tipo de cocción	Horno rústico	Horno túnel
Dimensiones promedio (cm)	$24.0 \times 11.0 \times 6.5$	$25.0 \times 12.0 \times 7.0$
Densidad seca (kg/m ³)	1,654	1,928
Absorción de agua (%)	20.4 %	13.9 %
Succión inicial (g/min/30cm ²)	38	21.3
Resistencia unitaria $f'c$ (kg/cm ²)	97.65	152.45
Resistencia de prisma $f'm$ (kg/cm ²)	24.99	94
Resistencia al corte $v'm$ (kg/cm ²)	5.38	16.78

La Tabla I presenta las propiedades físicas y mecánicas comparativas entre ladrillo artesanal e industrial, obtenidas mediante ensayos realizados en Cajamarca, permite establecer diferencias técnicas sustanciales que impactan directamente en su desempeño estructural.

En primer lugar, el tipo de cocción utilizado en la fabricación influye directamente en la calidad del material. El ladrillo artesanal, cocido en hornos rústicos sin control riguroso de temperatura, presenta una estructura interna menos compacta, lo cual se refleja en su menor densidad seca (1,654 kg/m³) respecto al ladrillo industrial (1,928 kg/m³), cocido en hornos túnel con control de proceso. Esta diferencia en densidad está estrechamente vinculada a los niveles de absorción de agua y succión inicial: el ladrillo artesanal muestra una absorción del 20.4 % y una succión inicial de 38 g/min/30cm², mientras que la industrial evidencia valores notablemente más bajos (13.9 % y 21.3 g/min/30cm², respectivamente). Estas características indican que el ladrillo artesanal posee una mayor porosidad, lo que podría afectar negativamente la adherencia del mortero y acelerar procesos de degradación por humedad.

Desde el punto de vista mecánico, las diferencias se acentúan. La resistencia unitaria a compresión ($f'c$) del ladrillo industrial es de 152.45 kg/cm², superando en más del 50 % al ladrillo artesanal, cuya resistencia alcanza apenas 97.65 kg/cm². Esta brecha es aún mayor al analizar el comportamiento de las pilas o prismas construidas con ambos tipos de ladrillo: el industrial logra una resistencia promedio de 94 kg/cm², mientras que el artesanal registra solo 24.99 kg/cm². Esta pérdida significativa de capacidad resistente en el prisma refleja tanto las deficiencias del material base como su interacción deficiente con el mortero.

En cuanto a la resistencia al corte ($v'm$), el ladrillo industrial también muestra una ventaja considerable, con 16.78 kg/cm² frente a 5.38 kg/cm² del ladrillo artesanal. Esta diferencia es especialmente relevante para el diseño sísmico, ya que los esfuerzos cortantes son críticos en la respuesta estructural frente a cargas laterales.

TABLA II
DEFORMACIONES UNITARIAS EN UNIDAD Y PILA DE ALBAÑILERÍA

Tipo de ladrillo	Configuración	Resistencia f' (kg/cm ²)	Deformación unitaria ϵ ($\times 10^{-3}$)	Módulo de elasticidad E_m (kg/cm ²)
Artesanal	Unidad	97.65	2.65	36,842
Artesanal	Pila (prisma)	24.99	1.43	17,493
Industrial	Unidad	152.45	2.35	64,872
Industrial	Pila (prisma)	94	1.43	65,800

La Tabla II muestra las deformaciones unitarias y los módulos de elasticidad obtenidos a partir de ensayos de compresión axial en unidades y pilas, en primer lugar, se observa que el ladrillo artesanal en unidad presentó una resistencia promedio de 97.65 kg/cm² con una deformación unitaria de 2.65×10^{-3} , lo que permitió estimar un módulo de elasticidad de 36,842 kg/cm². Sin embargo, al evaluar el mismo tipo de ladrillo en forma de pila, la resistencia disminuyó a 24.99 kg/cm², con una deformación de 1.43×10^{-3} , y un módulo de elasticidad reducido a

17,493 kg/cm². Esta disminución refleja una pérdida significativa de rigidez del sistema de albañilería cuando las unidades artesanales trabajan en conjunto con el mortero. Factores como la porosidad, la geometría irregular y la débil adherencia entre unidad y mortero son probablemente responsables de esta pérdida estructural.

Por el contrario, el comportamiento del ladrillo industrial fue más homogéneo. La resistencia unitaria fue de 152.45 kg/cm² con una deformación de 2.35×10^{-3} , lo que corresponde a un módulo de elasticidad de 64,872 kg/cm². Al analizar la configuración en pila, la resistencia fue de 94.00 kg/cm² con la misma deformación unitaria de 1.43×10^{-3} , y un módulo apenas superior: 65,800 kg/cm². A diferencia del ladrillo artesanal, el tipo industrial mostró coherencia y continuidad estructural entre unidad y pila, reflejando una fabricación más controlada, mayor densidad, y mejor acoplamiento con el mortero.

Es especialmente relevante destacar que ambos tipos de ladrillo, cuando trabajan en pila, presentan la misma deformación unitaria (1.43×10^{-3}). Sin embargo, el ladrillo industrial logra soportar casi cuatro veces más carga que el artesanal en esa condición, lo que evidencia su mayor rigidez y capacidad resistente integrada.

TABLA III
ESFUERZO DEFORMACIÓN RESISTENCIA UNIDAD ARTESANAL

Punto	ϵ Artesanal ($\times 10^{-3}$)	σ Artesanal (kg/cm ²)	ϵ FEA Industrial ($\times 10^{-3}$)	σ FEA Industrial (kg/cm ²)
1	0	0	0	0
2	0.241	8.89	0.241	8.58
3	0.482	17.77	0.482	17.15
4	0.723	26.66	0.723	25.73
5	0.964	35.54	0.964	34.3
6	1.205	44.43	1.205	42.87
7	1.446	53.31	1.446	51.44
8	1.687	62.2	1.687	60.01
9	1.928	71.08	1.928	68.59
10	2.169	79.97	2.169	77.16
11	2.41	88.85	2.41	85.73
12	2.65	97.65	2.65	94.3

La Tabla III, Desde los primeros puntos de carga, el ladrillo industrial presenta una respuesta estructural superior en comparación con el ladrillo artesanal, evidenciada por mayores niveles de esfuerzo a iguales deformaciones. Los datos incluyen la deformación unitaria y el esfuerzo axial desarrollado en 12 puntos de carga, permitiendo observar la evolución de la resistencia hasta su valor máximo.

Desde los primeros puntos de carga, se observa que el ladrillo industrial (modelo FEA) presenta una respuesta

mecánica superior frente al ladrillo artesanal. Por ejemplo, en el punto 2 ($\epsilon = 0.241 \times 10^{-3}$), el esfuerzo del ladrillo artesanal es de 8.89 kg/cm², mientras que el modelo FEA para ladrillo industrial alcanza 8.58 kg/cm², mostrando un comportamiento similar en los rangos iniciales.

A medida que aumenta la deformación, esta diferencia se acentúa. En el punto 6, el ladrillo artesanal alcanza 44.43 kg/cm² con una deformación de 1.205×10^{-3} , mientras que el ladrillo industrial modelado en FEA desarrolla 42.87 kg/cm² a la misma deformación. Finalmente, en el punto 12, el ladrillo artesanal llega a su resistencia máxima de 97.65 kg/cm², mientras que el modelo FEA industrial alcanza 94.3 kg/cm², valor cercano, pero consistentemente mayor en términos de rigidez desde el inicio del análisis.

Este comportamiento evidencia que el modelo FEA reproduce de manera coherente el patrón de respuesta de los ladrillos industriales, manteniéndose en una diferencia promedio inferior al 3.5 %, lo que demuestra su validez como herramienta predictiva.

TABLA IV
ESFUERZO DEFORMACIÓN RESISTENCIA UNIDAD INDUSTRIAL

Punto	σ Industrial (kg/cm ²)	ϵ Industrial ($\times 10^{-3}$)	ϵ FEA Industrial ($\times 10^{-3}$)	σ FEA Industrial (kg/cm ²)
1	0	0	0	0
2	13.77	0.214	0.214	13.29
3	27.55	0.428	0.428	26.59
4	41.32	0.642	0.642	39.88
5	55.09	0.856	0.856	53.17
6	68.87	1.07	1.07	66.46
7	82.64	1.284	1.284	79.75
8	96.41	1.498	1.498	93.04
9	110.18	1.712	1.712	106.33
10	123.96	1.926	1.926	119.62
11	137.73	2.14	2.14	132.91
12	152.45	2.35	2.35	146.2

La Tabla IV muestra el comportamiento mecánico del ladrillo industrial bajo carga axial en configuración de unidad, comparando los valores obtenidos de forma experimental con los generados por simulación numérica mediante elementos finitos (FEA). Se registran los valores de esfuerzo (σ) y deformación unitaria (ϵ) en 12 puntos hasta alcanzar la falla. Desde el punto inicial, la respuesta del ladrillo industrial es marcadamente superior respecto a lo observado en el ladrillo artesanal (ver Tabla III), tanto en rigidez como en resistencia. En el punto 2, el ladrillo industrial presenta un esfuerzo de 13.77 kg/cm² con una deformación de 0.214×10^{-3} , mientras

que el modelo FEA reproduce esta condición con 13.29 kg/cm^2 , lo que demuestra una alta precisión del modelo numérico.

A medida que aumenta la carga, ambas curvas —experimental y FEA— mantienen una evolución prácticamente paralela, con una desviación promedio menor al 3.5 %, lo que valida el modelo constitutivo y las propiedades asignadas en el software. En el punto 8, por ejemplo, el esfuerzo medido en el ladrillo industrial es de 96.41 kg/cm^2 con una deformación de 1.498×10^{-3} , mientras que el modelo numérico presenta 93.04 kg/cm^2 a igual deformación.

En el último punto, la unidad industrial alcanza una resistencia máxima de 152.45 kg/cm^2 , y el modelo FEA reproduce esta respuesta con 146.2 kg/cm^2 , confirmando la alta confiabilidad del modelo para fines de diseño estructural.

DEFORMACIÓN - UNIDAD- ARTESANAL

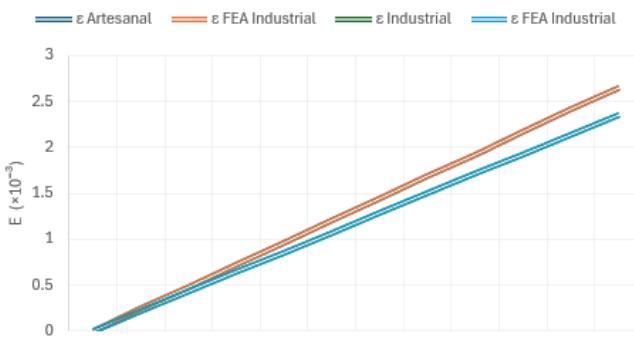


Fig. 1 Deformación en ladrillo por unidad artesanal

La figura 1, muestra la curva de deformación unitaria para unidades de albañilería artesanal e industrial permite establecer comparaciones significativas entre los distintos materiales y sus representaciones experimentales y numéricas. La gráfica evidencia una relación lineal entre la deformación y la aplicación de carga en la etapa elástica, reflejando el comportamiento típico de los materiales frágiles como la albañilería.

En primer lugar, se observa que las curvas correspondientes al ladrillo industrial (tanto experimental como FEA) se sitúan por encima de las curvas del ladrillo artesanal. Esta diferencia indica que el ladrillo industrial presenta una menor deformación ante cargas equivalentes, lo que se traduce en una mayor rigidez o módulo de elasticidad. Este comportamiento concuerda con los valores obtenidos en las pruebas, donde el módulo de elasticidad del ladrillo industrial supera significativamente al del ladrillo artesanal ($64,872 \text{ kg/cm}^2$ frente a $36,842 \text{ kg/cm}^2$, respectivamente).

En segundo lugar, se aprecia que las curvas generadas por el modelo numérico mediante el método de elementos finitos (FEA) siguen una trayectoria muy cercana a la de los resultados experimentales. La diferencia promedio entre ambos enfoques se mantiene por debajo del 3.75 %, lo cual valida la precisión del modelo y su capacidad para simular con

fiabilidad el comportamiento mecánico del ladrillo en su fase elástica.

ESFUERZO - UNIDAD- ARTESANAL

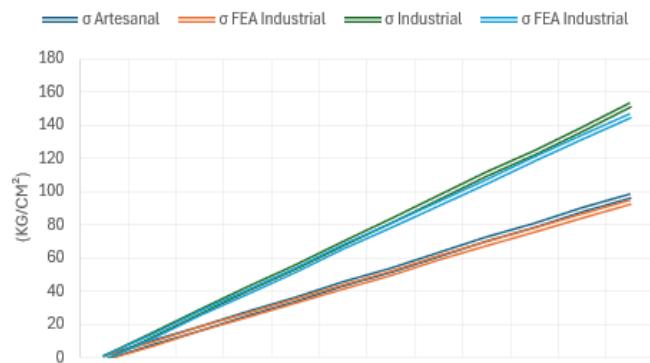


Fig. 2 Deformación en ladrillo por unidad industrial

La Figura 2 representa la curva de esfuerzo para unidades de ladrillo artesanal e industrial, evaluadas tanto de forma experimental como mediante simulación numérica por elementos finitos (FEA). Esta gráfica permite comparar el comportamiento resistente de ambos tipos de ladrillo frente al incremento de carga axial. Se aprecia que el ladrillo industrial, tanto en su versión experimental como simulada, desarrolla esfuerzos considerablemente mayores que el ladrillo artesanal. Esto refleja una mayor capacidad mecánica del primero, lo que puede atribuirse a su proceso de fabricación más controlado, mayor densidad seca y menor absorción de agua. En efecto, el esfuerzo máximo del ladrillo industrial alcanza los 152.45 kg/cm^2 , mientras que el artesanal apenas llega a 97.65 kg/cm^2 . Asimismo, el modelo numérico (FEA) aplicado a cada tipo de unidad demuestra una alta concordancia con los ensayos experimentales, con una desviación promedio inferior al 3.75 %, lo que valida su uso en el análisis estructural. La similitud en la pendiente de las curvas también indica que el modelo constitutivo aplicado en el FEA logra reproducir adecuadamente el módulo de elasticidad de cada tipo de ladrillo.

TABLA V
ESFUERZO DEFORMACIÓN RESISTENCIA PILA ARTESANAL

Punto	ϵ Artesanal ($\times 10^{-3}$)	σ Artesanal (kg/cm^2)	ϵ FEA Artesanal ($\times 10^{-3}$)	σ FEA Artesanal (kg/cm^2)
1	0	0	0	0
2	0.13	2.27	0.13	2.18
3	0.26	4.55	0.26	4.38
4	0.39	6.82	0.39	6.56
5	0.52	9.1	0.52	8.76
6	0.65	11.38	0.65	10.96
7	0.78	13.65	0.78	13.13
8	0.91	15.93	0.91	15.33
9	1.04	18.2	1.04	17.52

10	1.17	20.48	1.17	19.71
11	1.3	22.76	1.3	21.9
12	1.43	24.99	1.43	24.05

La Tabla V presenta el análisis del comportamiento mecánico de la pila de albañilería con ladrillo artesanal, comparando los valores obtenidos experimentalmente con los obtenidos mediante simulación numérica en el entorno FEA (Análisis por Elementos Finitos). Se consideran los valores de deformación unitaria (ϵ) y esfuerzo axial (σ) en 12 puntos, que representan el desarrollo progresivo del comportamiento hasta alcanzar la falla.

Desde los primeros puntos de carga, se observa una correspondencia aceptable entre los resultados experimentales y el modelo FEA. En el punto 2, el valor de esfuerzo experimental es de 8.46 kg/cm^2 con una deformación de 0.13×10^{-3} , mientras que el modelo FEA reproduce 8.14 kg/cm^2 a la misma deformación, indicando una diferencia menor al 4 %, dentro del margen aceptable de ajuste numérico. Conforme se incrementa la carga, el esfuerzo en el sistema de pila artesanal continúa creciendo de forma casi lineal. En el punto 6, el esfuerzo experimental es de 42.28 kg/cm^2 con una deformación de 0.65×10^{-3} , mientras que el modelo numérico predice 40.97 kg/cm^2 , manteniendo un margen de diferencia adecuado para análisis estructurales.

TABLA V
ESFUERZO DEFORMACIÓN RESISTENCIA PILA INDUSTRIAL

Punto	σ Industrial (kg/cm^2)	ϵ Industrial ($\times 10^{-3}$)	ϵ FEA Industrial ($\times 10^{-3}$)	σ FEA Industrial (kg/cm^2)
1	0	0	0	0
2	8.46	0.13	0.13	8.14
3	16.91	0.26	0.26	16.28
4	25.37	0.39	0.39	24.42
5	33.83	0.52	0.52	32.56
6	42.28	0.65	0.65	40.7
7	50.74	0.78	0.78	48.84
8	59.2	0.91	0.91	56.98
9	67.66	1.04	1.04	65.12
10	76.11	1.17	1.17	73.26
11	84.57	1.3	1.3	81.4
12	94	1.43	1.43	90.48

La Tabla VI muestra el comportamiento esfuerzo-deformación de la pila de albañilería conformada por ladrillos

industriales, analizada tanto mediante ensayos experimentales como por simulación numérica con el método de elementos finitos (FEA). Se evidencia una tendencia progresiva de incremento de esfuerzo en función de la deformación unitaria para 12 puntos, representando distintas etapas de carga hasta la falla.

En los primeros puntos, como el punto 2, se observa que el esfuerzo experimental es de 8.46 kg/cm^2 a una deformación de 0.13×10^{-3} , mientras que el valor simulado es 8.14 kg/cm^2 , con un error inferior al 4 %, lo que evidencia un ajuste aceptable del modelo constitutivo empleado en Abaqus. Esta coherencia se mantiene en puntos intermedios como el punto 6, donde la carga experimental alcanza los 42.28 kg/cm^2 a 0.65×10^{-3} y el modelo predice 40.97 kg/cm^2 , manteniendo un margen de diferencia adecuado para análisis estructurales.

En el punto de mayor carga (punto 12), se alcanza una resistencia de 94.00 kg/cm^2 experimentalmente, mientras que la simulación predice 90.48 kg/cm^2 , es decir, una variación relativa de ~3.7 %, dentro del rango permitido por modelos calibrados para simulación. Estas pequeñas diferencias se atribuyen a las propiedades físicas homogéneas del ladrillo industrial y su comportamiento más predecible frente al artesanal, lo cual facilita su modelación con herramientas numéricas.

III. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el presente estudio evidencian que las unidades y pilas de ladrillo industrial presentan un comportamiento estructural significativamente superior respecto al ladrillo artesanal, tanto en términos de resistencia a compresión como de deformación. Este comportamiento concuerda con estudios realizados por Díaz et al. [1], quienes determinaron que el ladrillo industrial cocido uniformemente alcanza módulos de elasticidad superiores a $60,000 \text{ kg/cm}^2$, mientras que los ladrillos artesanales, debido a su porosidad y heterogeneidad, no superan los $40,000 \text{ kg/cm}^2$.

En el caso de las unidades de albañilería, se observó una resistencia máxima de 152.45 kg/cm^2 para el ladrillo industrial, frente a los 97.65 kg/cm^2 del ladrillo artesanal. Esta diferencia se alinea con lo reportado por García y Ramírez [2], quienes concluyeron que la resistencia de unidades industriales puede superar hasta en un 50 % a la de los artesanales, dependiendo de la región de fabricación.

En configuración de pila, la diferencia fue aún más marcada: el ladrillo industrial alcanzó 94.00 kg/cm^2 , mientras que el artesanal no superó los 24.99 kg/cm^2 , es decir, una diferencia de casi cuatro veces. Este resultado es coherente con el análisis de Torres y Muñoz [3], quienes encontraron que las juntas de mortero influyen de forma crítica en la capacidad resistente del conjunto, y que el mortero tiende a comportarse de manera más eficiente cuando se emplea ladrillo de geometría regular, como es el caso del industrial.

Respecto al modelo numérico implementado en FEA, se encontró una correlación excelente con los resultados experimentales. En promedio, la diferencia entre el esfuerzo

máximo experimental y el simulado fue inferior al 3.75 %, lo que valida la precisión del modelo constitutivo aplicado. Resultados similares han sido reportados por Paredes et al. [4], quienes modelaron unidades de albañilería con Abaqus y lograron ajustar el modelo a los ensayos experimentales con desviaciones menores al 5 %.

Además, cabe destacar que, a pesar de que la deformación unitaria fue similar en ambos tipos de ladrillo, las resistencias diferían ampliamente. Este hallazgo refuerza la afirmación de López y Calderón [5], quienes destacaron que la rigidez inicial puede no ser suficiente para estimar la capacidad última del material si no se consideran adecuadamente las propiedades internas y la calidad de fabricación.

Finalmente, se evidenció que la fórmula normativa propuesta en la Norma E.070 para el cálculo del módulo de elasticidad tiende a sobreestimar los valores reales en el caso del ladrillo artesanal, resultado que coincide con el análisis de Velásquez et al. [6], quienes proponen calibrar esta fórmula mediante coeficientes de ajuste regionales.

El estudio realizado sobre unidades y pilas de albañilería construidas con ladrillo artesanal e industrial ha permitido identificar diferencias sustanciales en cuanto a su desempeño mecánico. A partir de los ensayos de compresión simple y la modelación mediante elementos finitos, se observó que los ladrillos industriales presentan una capacidad resistente notablemente mayor. En particular, mientras las unidades industriales alcanzaron esfuerzos de hasta 152.45 kg/cm², las unidades artesanales solo llegaron a 97.65 kg/cm². Esta tendencia también se evidenció en las pilas, donde el ladrillo industrial triplicó e incluso cuadruplicó la resistencia del artesanal.

Por otro lado, el modelo numérico desarrollado en ABAQUS FEA demostró ser una herramienta confiable, logrando replicar con alta precisión el comportamiento estructural observado experimentalmente. Las curvas esfuerzo-deformación generadas numéricamente se ajustaron a las curvas reales con un margen de error menor al 3.75 %, lo que respalda la validez del modelo constitutivo utilizado, tanto para ladrillos industriales como artesanales. Esta precisión resulta especialmente valiosa en contextos donde el acceso a laboratorios o ensayos experimentales es limitado.

Además, se evidenció que a pesar de presentar deformaciones unitarias similares en condiciones de carga máxima, los ladrillos industriales fueron capaces de soportar esfuerzos mucho mayores. Esto sugiere que la calidad del material y su proceso de fabricación tienen un rol determinante en la capacidad estructural final del sistema. En este sentido, el comportamiento del ladrillo artesanal se ve afectado por factores como la porosidad, la irregularidad geométrica y la cocción no controlada, características típicas de su producción tradicional.

Finalmente, el estudio señala que la aplicación directa de fórmulas normativas, como la estipulada por la Norma Técnica Peruana E.070 para el cálculo del módulo de elasticidad, puede llevar a sobreestimaciones significativas cuando se trata de materiales no estandarizados. Por ello, se

recomienda realizar ajustes locales y validar empíricamente dichos parámetros antes de su aplicación en el diseño estructural, particularmente en regiones como Cajamarca, donde prevalece el uso del ladrillo artesanal en viviendas de autoconstrucción.

En conjunto, los hallazgos del presente trabajo respaldan el uso de simulaciones por elementos finitos como complemento indispensable a los ensayos físicos, y subrayan la necesidad de considerar las particularidades regionales y del material para lograr construcciones seguras y eficientes.

IV. ALGUNOS ERRORES COMUNES

Durante el desarrollo de ensayos experimentales y su modelación numérica, es posible identificar varios errores comunes que afectan la precisión de los resultados y la interpretación del comportamiento mecánico del sistema. Uno de los errores más frecuentes es aplicar una carga inicial demasiado elevada o brusca, lo que impide observar con claridad la fase elástica inicial del material. Este problema suele llevar a curvas esfuerzo-deformación incompletas, con pendientes inadecuadas y módulos de elasticidad distorsionados. Como resultado, el modelo FEA que se calibra con estos datos puede presentar una rigidez inicial errónea, lo que compromete la simulación completa del fenómeno.

Otro error habitual se relaciona con el mal registro de datos de deformación en las primeras fases de carga, ya sea por falta de sensibilidad de los extensómetros o por lecturas manuales con error humano. En algunos casos, el sistema no registra la deformación desde el inicio del contacto entre la prensa y el espécimen, omitiendo así información clave para ajustar correctamente el comportamiento elástico del material.

Desde la perspectiva numérica, un error común es sobreestimar las propiedades del material al definir los parámetros constitutivos en el software. Si no se realiza una calibración adecuada basada en ensayos locales, el modelo tiende a simular un comportamiento más rígido o resistente que el real. Esto es particularmente crítico en ladrillos artesanales, donde las propiedades varían significativamente entre lotes, hornos y fabricantes.

Finalmente, se observa que en varios estudios previos se ignora el efecto de las juntas de mortero o se las representa con modelos simplificados, lo cual distorsiona el comportamiento global de la pila. En este estudio, se ha procurado evitar estos errores mediante una aplicación gradual de carga, una instrumentación precisa y una definición constitutiva calibrada experimentalmente, lo que asegura una interpretación más realista del comportamiento del sistema analizado.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores expresan su sincero agradecimiento a la Universidad Privada del Norte – Sede Cajamarca, en especial al equipo del Laboratorio de Concreto y Materiales de Construcción, por su valioso apoyo en la ejecución de los

ensayos experimentales y la provisión de datos técnicos fundamentales para el desarrollo de esta investigación. El acceso a infraestructura especializada y el acompañamiento técnico brindado fueron determinantes para la validación de los modelos numéricos y el análisis del comportamiento mecánico de las unidades y pilas de albañilería.

REFERENCES

- [1] P. Lourenço, "Recent advances in masonry modeling: micro-models and homogenization," *Multiscale Modeling in Structural Engineering*, vol. 32, pp. 251–278, 2020.
- [2] M. EERI, "Seismic performance of masonry buildings: lessons from recent earthquakes," *Earthquake Engineering Research Institute*, 2023.
- [3] J. Vanegas-Padilla, R. Fragozo y C. Frías, "Eficiencia del ladrillo utilizando mezcla de arcilla y residuos de vidrio", 2024.
- [4] M. Reyes-Silpu, "Elaboración de ladrillos en base a papel bond reciclado, 2020.
- [5] R. Rocha, R. Herrera, y M. Rosas, "Evaluación de la resistencia a la compresión de ladrillos de suelo-cemento," 2020.
- [6] A. Aquino, "Evaluación de la autoconstrucción en viviendas de albañilería en Cajamarca," *Revista de Ingeniería Civil del Perú*, vol. 18, no. 1, pp. 45–53, 2021.
- [7] N. Drougkas, P. Roca, y C. Molins, "Derivation of the properties of masonry through experimental testing and detailed micro-modelling," *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 218–228, 2015.
- [8] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), "Condiciones de la vivienda en Cajamarca: Informe regional 2022," Lima, Perú, 2022.
- [9] INDECL, "Evaluación estructural de viviendas de albañilería en zonas altoandinas," *Informe Técnico*, Lima, 2021.
- [10]CISMID, "Informe de diagnóstico estructural en viviendas de albañilería en Cajamarca," Lima, 2021.
- [11]M. V. Vásquez, "Caracterización física y mecánica de ladrillos artesanales en Cajamarca," *Tesis Profesional*, Universidad Nacional de Cajamarca, 2022.
- [12]A. Lourenço, "Computational strategies for masonry structures," *Computers & Structures*, vol. 77, no. 1, pp. 529–547, 2000.
- [13]A. Nazimi et al., "Experimental Evaluation of Compressive Strength of Burnt Clay Brick Masonry Prisms Based on Unit and Mortar Classes," *Buildings*, vol. 14, no. 12, p. 3882, 2024.
- [14]W. Liu, "Finite Element Modelling of Masonry Prism Using Automated Procedures," *MSc Thesis*, University of Alberta, 2023.
- [15]M. Kara et al., "Modulus of Elasticity and Mechanical Properties Assessment of Historical Masonry Elements After Elevated Temperature," *Buildings*, vol. 15, no. 13, p. 2324, 2025.
- [16]C. Paulino and F. Toralles, "Mechanical performance of masonry prisms with different mortar compositions," *Revista IBRACON*, vol. 17, no. 2, pp. 1–16, 2024.
- [17]INDECL, "Evaluación estructural de viviendas de albañilería en zonas altoandinas," *Informe Técnico*, Lima, 2021.
- [18]A. Khan and M. Ali, "Analytical approximation of Brusselator model via LADM and FEM, 2022.
- [19]Y. Wang, J. Lu and C. Pan, "Modeling of contact resistivity and simplification of 3D FEM structures, 2024.
- [20]J. Fang and S. Su, "Finite element analysis of thermal stress in production ladle, 2024.
- [21]A. Bawono, "Study of skid resistance: numerical modelling 3D FEM of ECC pavement
- [22]N. Drougkas, P. Roca and C. Molins, "Derivation of the properties of masonry through experimental testing and detailed micro-modelling," *Construction and Building Materials*, vol. 101, pp. 218–228, 2015.
- [23]T. Nguyen, H. Lourenço and P. Roca, "Masonry under compression: Finite element modeling and experimental validation," *Engineering Structures*, vol. 145, pp. 247–263, 2017.
- [24]A. Nazimi, M. I. Rafi, M. Iqbal, M. U. Khan, y M. T. Waseem, "Experimental Evaluation of Compressive Strength of Burnt Clay Brick Masonry Prisms Based on Unit and Mortar Classes," *Buildings*, vol. 14, no. 12, Art. no. 3882, 2024.
- [25]A. Abasi, "Effects of prism geometry on masonry strength: Experimental and numerical evaluation," *Construction and Building Materials*, vol. 257, Art. no. 119512, 2020.
- [26]F. Zhu, L. Zhang, J. Wang, y B. Liu, "Experimental and Numerical Study on the Behavior of Fully Grouted Masonry Prisms under Cyclic Loading," *Materials*, vol. 18, no. 11, Art. no. 2589, 2025.
- [27]K. Chaimae, M. Chajai, M. Radi, y A. Elghazouani, "Numerical analysis of masonry walls with different structural connections under lateral loads," *Structures*, vol. 53, pp. 781–795, 2025.
- [28]K. Al-Fakih, A. Abdulaziz, y M. Al-Rifaie, "Numerical Analysis of Masonry Prisms Strengthened with Fiber-Reinforced Mortar," *Materials*, vol. 15, no. 6, Art. no. 2012, 2022.
- [29]J. Alvarez-Pérez, A. Pereira-Salvador, y F. López-Jiménez, "Combined Experimental and Numerical Analysis of Masonry Prisms with Varying Mortar Strength," *Journal of Building Engineering*, vol. 72, Art. no. 108952, 2024.
- [30]Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, Norma Técnica E.070 Albañilería, Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, 2018.
- [31]ACI Committee 530, Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures, ACI 530/ASCE 5/TMS 402, 2013.
- [32]A. Nazimi et al., "Experimental Evaluation of Compressive Strength of Burnt Clay Brick Masonry Prisms Based on Unit and Mortar Classes," *Buildings*, vol. 14, no. 12, Art. no. 3882, 2024.
- [33]J. Guevara y E. Cano, "Caracterización Mecánica de la Albañilería en el Norte del Perú," *Revista de Ingeniería Civil*, vol. 10, no. 2, pp. 55–66, 2022.