

Nonlinear Simulation of Masonry Walls in FINITE ELEMENTS Based on Experimental Shear and Compression Tests

Henry Josué Villanueva Bazán¹, Jhonatan Kolver Vásquez Vásquez¹, Galhy Smith Vigo Méndez²
^{1,2,3} UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE, henry.villanueva@upn.edu.pe, N00267116@upn.pe, N00037356@upn.pe

Abstract— Abstract— This research addresses the experimental characterization and nonlinear numerical simulation of the structural behavior of masonry in Cajamarca, Peru. Tests were carried out on units, piers, and low walls using local artisanal and industrial bricks, evaluating properties such as compressive strength (f_m), modulus of elasticity (E), and shear strength (v_m). The values obtained were up to 22.3 kg/cm^2 in prismatic strength and 1300 MPa in stiffness, highlighting the better performance of the industrial brick. Subsequently, these elements were modeled in ABAQUS (CDP model) and DIANA FEA (Total Strain Fixed Crack model) programs, comparing the results with the experimental data. The simulated force-displacement curves showed errors less than 10% in displacement and stiffness, validating the effectiveness of both models, especially when using calibrated local parameters. It is concluded that multiscale nonlinear modeling, combined with regional characterization, is key to improving the structural analysis and seismic design of masonry buildings. This methodology can be replicated in other regions with material variability, contributing to safer and more efficient designs.

Keywords: Masonry, DIANA FEA, ABAQUS, and constitutive model

Simulación No Lineal de Muretes de Albañilería en ELEMENTOS FINITOS Basada en Ensayos Experimentales de Corte y Compresión

Henrry Josué Villanueva Bazán¹, Jhonatan Kolver Vásquez Vásquez², Galhy Smith Vigo Mendez³
1,2,3 UNIVERSIDAD PRIVADA DEL NORTE, henrry.villanueva@upn.edu.pe, N00267116@upn.pe, N00037356@upn.pe

Resumen— Esta investigación aborda la caracterización experimental y simulación numérica no lineal del comportamiento estructural de la albañilería de Cajamarca, Perú. Se realizaron ensayos en unidades, pilas y muretes utilizando ladrillos artesanales e industriales locales, evaluando propiedades como la resistencia a compresión (f_m), módulo de elasticidad (E) y resistencia al corte (r_m). Los valores obtenidos fueron de hasta 22.3 kg/cm² en resistencia prismática y 1300 MPa en rigidez, destacando el mejor desempeño del ladrillo industrial. Posteriormente, se modelaron estos elementos en los programas ABAQUS (modelo CDP) y DIANA FEA (modelo Total Strain Fixed Crack), comparando los resultados con los datos experimentales. Las curvas fuerza–desplazamiento simuladas mostraron errores menores al 10% en desplazamiento y rigidez, validando la eficacia de ambos modelos, especialmente cuando se emplean parámetros locales calibrados. Se concluye que la modelación no lineal multiescala, combinada con una caracterización regional, es clave para mejorar el análisis estructural y el diseño sísmico de edificaciones de albañilería. Esta metodología puede ser replicada en otras regiones con variabilidad material, contribuyendo a un diseño más seguro y eficiente.

Palabras clave: Albañilería, DIANA FEA, ABAQUS y modelo constitutivo.

I. INTRODUCCIÓN

La necesidad de comprender con mayor precisión el comportamiento estructural de la albañilería ha motivado, a nivel global, el desarrollo de modelos numéricos que representen de forma realista sus mecanismos de falla y respuesta sísmica. La albañilería, si bien es un sistema tradicional y de bajo costo, presenta un comportamiento mecánico no lineal altamente complejo, caracterizado por interacciones entre ladrillo y mortero, fisuración progresiva y degradación de rigidez bajo cargas cíclicas [1], [2].

En este contexto, el uso del método de los elementos finitos (FEM) se ha convertido en una herramienta fundamental para el análisis estructural de edificaciones de albañilería. A nivel internacional, investigaciones recientes han desarrollado modelos avanzados que incorporan criterios de daño, plasticidad y contacto friccional, con aplicaciones en la simulación de muros sometidos a cargas sísmicas [3], [4]. Estos modelos permiten analizar desde la escala del material hasta el comportamiento global de edificaciones completas, mejorando la precisión en la evaluación del desempeño estructural y reduciendo la dependencia de ensayos a escala real, que suelen ser costosos y difíciles de replicar.

A nivel regional, en América Latina, donde una gran proporción de viviendas se construyen con albañilería sin

supervisión técnica rigurosa (“non-engineered masonry”), el FEM permite validar soluciones constructivas, evaluar refuerzos y proponer alternativas seguras para zonas de alta peligrosidad sísmica como la región andina. Estudios como los de Ravichandran et al. (2021) [5] y Tarque et al. (2020) [6] han demostrado que modelos numéricos bien calibrados pueden replicar con precisión la respuesta sísmica de muros de albañilería típicos de esta región.

A nivel local, en zonas como Cajamarca (Perú), la construcción en albañilería sigue siendo predominante, empleando ladrillos de procedencia artesanal o industrial cuya calidad varía significativamente. Sin embargo, existe una limitada caracterización experimental de estos materiales y poca integración con modelos numéricos avanzados. Investigaciones recientes en Perú evidencian que muchas unidades no cumplen con los valores mínimos establecidos por la norma E.070, lo cual compromete la seguridad estructural [7], [8].

La región Cajamarca, ubicada en la sierra norte del Perú, presenta características geográficas y constructivas particulares que influyen directamente en el desempeño estructural de edificaciones tradicionales. La mayoría de las viviendas unifamiliares en áreas urbanas y periurbanas son construidas con albañilería confinada, utilizando unidades de ladrillo artesanal o industrial producidas localmente. Sin embargo, estas unidades presentan una alta variabilidad en dimensiones, resistencia a compresión, absorción de agua y calidad del mortero, debido a la limitada regulación en su fabricación y a la informalidad del sector productivo [1].

Cajamarca se ubica dentro de la Zona Sísmica 3, según la Norma Técnica Peruana E.030, lo que implica una alta demanda estructural ante eventos sísmicos. A pesar de ello, la mayoría de las edificaciones existentes no han sido diseñadas bajo criterios estructurales rigurosos ni validadas mediante análisis numéricos o ensayos experimentales. Estudios previos como los de Aliaga Abanto (2017) y Valdivia Salazar (2021) evidencian que la resistencia promedio a compresión prismática f_m^f en unidades de albañilería cajamarquina puede ser considerablemente inferior a los valores mínimos establecidos por la norma E.070 [2], [3].

La simulación no lineal de muros de albañilería mediante elementos finitos ha demostrado ser una herramienta eficaz para analizar el comportamiento estructural frente a cargas axiales, laterales y sísmicas. En este contexto, Falih Dakhi et al. aplicaron ABAQUS para modelar un muro de ladrillo de 990 × 1000 mm con análisis no lineal estático general,

alcanzando una resistencia máxima de 15.5 MPa (≈ 158 kg/cm 2) y una coincidencia del 92 % respecto a los ensayos físicos, validando así la precisión del modelo para evaluar la resistencia en plano de muros no reforzados [9].

Por su parte, Bhosale y Desai utilizaron el modelo de plasticidad por daño del concreto (CDP) en ABAQUS para estudiar muros sometidos a carga lateral. El modelo replicó con éxito la evolución del daño, obteniendo una carga última de 175 kN/m y un módulo de elasticidad de 2100 MPa, concluyendo que el CDP es altamente efectivo para simular la respuesta no lineal de la albañilería [10].

Paudel et al. realizaron un análisis de sensibilidad para la homogenización de muros en ABAQUS, identificando que un ángulo de dilatancia de 25° y viscosidad de 0.001 proporcionaban los mejores resultados, con una resistencia simulada de 13.2 MPa. El estudio resaltó la importancia de la calibración paramétrica para mejorar la fidelidad del modelo [11].

En un análisis del comportamiento al corte de muros con bloques AAC, Kozłowski et al. ejecutaron ensayos y simulaciones con ABAQUS. La resistencia al corte osciló entre 0.28 y 0.34 MPa, con un módulo de elasticidad del material de 1800 MPa. Los modelos predijeron con precisión el inicio y propagación de fisuras [12].

Desde la perspectiva del software DIANA FEA, Medić y Hrasnica analizaron muros de ladrillo sólido con cargas in-plane, empleando modelos ortotrópicos de deformación total. Se alcanzó una carga máxima de 170 kN, con fisuras diagonales y flexión dominante. El modelo calibrado presentó un módulo E de 2400 MPa y una resistencia f_m de 7.5 MPa, validando la eficiencia de DIANA para simular mecanismos combinados de daño [13].

Khan et al. exploraron la respuesta sísmica de muros de bloques secos (dry-stack) modelados en ABAQUS. La resistencia a corte alcanzó los 0.3 MPa, con deformaciones significativas en juntas horizontales y carga pico de 100 kN, demostrando que incluso sin mortero el modelo predice correctamente los puntos de fallo [14].

Borah et al. modelaron muros confinados en ABAQUS bajo carga cíclica, representando un caso típico en edificaciones latinoamericanas. Se obtuvo una rigidez inicial de 4000 kN/m y resistencia a compresión de 8.2 MPa, con una degradación del 43 % tras el quinto ciclo. Los resultados validaron la capacidad del modelo para evaluar ductilidad y resistencia residual [15].

Finalmente, Zeng et al. desarrollaron un análisis paramétrico de muros URM, determinando que la resistencia fuera de plano depende fuertemente de la tracción, y la resistencia en plano del cortante. Los modelos alcanzaron resistencias de tracción de 0.15 MPa y a compresión de 7.0 MPa, estableciendo directrices clave para la calibración numérica [16].

Hailemariam y Wuttke [17] desarrollaron un macro-modelo de plasticidad con daño continuo para analizar muros de bloques de concreto ligero sometidos a cargas estáticas y cíclicas. Utilizaron ABAQUS para implementar un modelo

tipo CDP adaptado, calibrado con ensayos de carga axial y lateral. Lograron una predicción precisa de la capacidad de carga con un error inferior al 5 %. Reportaron resistencias al corte v'_m de aproximadamente 8.0 kg/cm 2 , módulo de elasticidad efectivo entre 3000 y 3500 MPa, y una mejora del 35 % en muros reforzados respecto a los sin intervención. La principal conclusión fue que este modelo ofrece una alternativa eficiente y robusta para el diseño estructural práctico.

Por su parte, Thango et al. [18] estudiaron el comportamiento de muros de albañilería sin refuerzo frente a explosiones. Aplicaron un enfoque no lineal explícito en ABAQUS/Explicit, integrando el modelo de plasticidad con daño CDP para los materiales y contactos unilaterales con fricción entre bloques. Se utilizó CONWEP para modelar la carga de explosión. Las simulaciones reprodujeron adecuadamente fallas diagonales y desplazamientos fuera del plano, alcanzando valores de v'_m de 5.5 kg/cm 2 y módulo de elasticidad de 2800 MPa. Los resultados mostraron una correlación experimental numérica inferior al 10 %, y la energía disipada fue coherente con los registros de campo. Los autores concluyeron que este enfoque permite evaluar el comportamiento extremo de estructuras vulnerables, siendo útil para escenarios de evaluación de riesgo.

Adicionalmente, no se cuenta con una base de datos estructural confiable que permita calibrar modelos computacionales de comportamiento no lineal para los materiales usados en la región. Esta situación limita el desarrollo de herramientas de simulación que puedan ser empleadas en la evaluación de vulnerabilidad sísmica, reforzamiento estructural o diseño basado en desempeño.

Frente a este escenario, la presente investigación busca reducir esta brecha mediante una campaña experimental aplicada a muretes construidos con materiales cajamarquinos, y su posterior simulación en elementos finitos. El propósito es generar parámetros confiables que sirvan de base para futuros estudios estructurales y aplicaciones prácticas en diseño sísmico regional.

II. METODOLOGÍA

La presente investigación se desarrolló en dos fases complementarias: (i) una fase experimental con ensayos destructivos sobre unidades, pilas y muretes de albañilería, y (ii) una fase de simulación numérica no lineal utilizando los programas DIANA FEA y ABAQUS. El objetivo fue caracterizar el comportamiento mecánico de la albañilería cajamarquina y validar modelos constitutivos que permitan representar su respuesta estructural con precisión.

A. Ensayos Experimentales

Se construyeron especímenes utilizando unidades de ladrillo artesanal y ladrillo industrial prensado, representativos de la producción local en Cajamarca. El mortero empleado fue tipo M1 (1:3) con resistencia objetivo de 100 kg/cm 2 , conforme a la NTE E.070 [1].

1) Ensayo en unidades (ladrillos individuales)

Se evaluaron las propiedades físicas y mecánicas de los ladrillos según ASTM C67. Se ensayaron al menos 10 unidades por tipo en compresión axial. Se determinaron:

- Resistencia promedio a compresión f_b en kg/cm^2 .
- Dimensiones, peso seco, absorción y porosidad.

2) Ensayo en pilas de albañilería

Se construyeron pilas de 3 hiladas (dimensiones aproximadas: $40 \times 40 \times 30$ cm) con mortero tipo M1. El ensayo de compresión axial se realizó según ASTM E447. Se midieron:

- Resistencia prismática f_m (kg/cm^2).
- Módulo de elasticidad inicial E mediante regresión lineal del tramo elástico.

3) Ensayo en muretes

Se emplearon muretes de dimensiones $60 \text{ cm} \times 60 \text{ cm} \times 14 \text{ cm}$, con juntas de 1.5 cm. Se realizaron dos tipos de pruebas:

- Compresión axial vertical (ASTM E447): carga monotónica hasta colapso, registrando desplazamientos verticales con LVDTs y patrón de agrietamiento.
- Corte diagonal (ASTM E519): carga aplicada en diagonal con gatos hidráulicos, obteniéndose la resistencia a corte v_m y módulo cortante G .

B. Modelación Numérica en DIANA FEA y ABAQUS

Se desarrollaron modelos numéricicos tridimensionales y bidimensionales para cada tipo de espécimen: unidad, pila y murete.

1) En ABAQUS

- Modelo sólido 3D para unidades y pilas, con elementos hexaédricos de deformación reducida (C3D8R).
 - Se aplicó el modelo constitutivo Concrete Damaged Plasticity (CDP), que describe el comportamiento no lineal mediante una combinación de daño en tracción y compresión. Este modelo se basa en la siguiente relación constitutiva:
- $$\sigma = (1-d) \cdot D^c : \epsilon$$

donde σ sigma es el tensor de tensiones, d es el parámetro de daño (entre 0 y 1), D^c es el tensor de rigidez elástica no dañada, y ϵ es la deformación total.

- El modelo CDP utiliza criterios de fluencia del tipo Drucker-Prager modificados, con superficie de fluencia adaptativa y reglas de endurecimiento/ablandamiento.
- La interacción ladrillo-mortero se modeló mediante interfaces con fricción tangencial tipo penalty y cohesión en tracción limitada.

2) En DIANA FEA

- Para los muretes, se utilizó un modelo bidimensional en estado plano de deformación (plane strain), con elementos cuadriláteros de 4 nodos.
- Se implementó el modelo Total Strain Fixed Crack con ley de daño isotrópico. La relación constitutiva general está dada por:

$$\sigma = (1-\omega) \cdot D_e : \epsilon$$

donde ω representa el parámetro de daño que evoluciona con la deformación efectiva. El modelo se basa en leyes de tracción con apertura de grietas (Mode I) y compresión post-pico (Mode II), considerando la anisotropía del daño.

- Las superficies de fisuración se definen por criterios como Rankine (para tracción) y Rotating Crack, con reducción progresiva de la rigidez tangencial.
- Las interfaces entre ladrillo y mortero se modelaron con elementos de interfaz lineales con comportamiento no lineal tracción-corte, incluyendo cohesión, fricción y separación.

Ambos softwares se utilizaron en paralelo para comparar resultados y validar el comportamiento simulado frente a los datos experimentales. Se analizaron curvas fuerza-desplazamiento, modos de falla y tensiones máximas alcanzadas.

C. Alcance y Limitaciones

El estudio abarca la caracterización multiescala del comportamiento estructural de la albañilería cajamarquina: desde la unidad hasta el murete. Las simulaciones no incluyen efectos dinámicos o fuera del plano, pero el enfoque puede ser extendido a análisis sísmico mediante historia de carga cíclica en futuras etapas.

TABLA I
PROPIEDADES MECÁNICAS OBTENIDAS SEGÚN TIPO DE ENSAYO

Tipo de ENSAYO	Parámetro Obtenido	Símbolo	Unidad
Unidad (Ladrillo)	Resistencia a compresión simple	f_b	kg/cm^2
	Peso seco	—	kg/unidad
	Porosidad (estimada)	—	%
	Absorción de agua	—	%
	Densidad aparente	ρ	kg/m^3
Pila	Resistencia prismática	f_m	kg/cm^2
	Módulo de elasticidad	E	MPa
	Deformación unitaria	ϵ	—
	Relación entre f_b y f_m	—	—
Murete (corte diagonal)	Resistencia a corte	v_m	kg/cm^2
	Módulo cortante	G	MPa
	Ángulo de fricción	ϕ	grados
	Cohesión	c	kg/cm^2

	Modo de falla	—	cualitativo
--	---------------	---	-------------

En la tabla I, nos muestra los ensayos en unidades individuales (ladrillos) permiten determinar la resistencia a compresión simple (f_b), parámetro que refleja la calidad del ladrillo como elemento base. Esta resistencia, expresada comúnmente en kg/cm^2 , sirve como punto de partida para establecer límites de carga admisibles y como insumo para estimar la resistencia de la mampostería completa. Además, se obtienen características físicas como el peso seco, la porosidad y la absorción de agua, las cuales influyen directamente en la adherencia con el mortero y en la durabilidad del muro. Por ejemplo, ladrillos con alta porosidad tienden a absorber más agua del mortero, afectando la hidratación del cemento y, por ende, reduciendo la resistencia del conjunto.

A nivel de pila de albañilería, formada por la superposición de varias unidades unidas por mortero, se determina la resistencia prismática (f_m), que representa el comportamiento real del conjunto ladrillo-mortero bajo carga axial. Este valor, inferior a f_b , refleja la interacción entre ambos materiales y se utiliza directamente como parámetro de resistencia en simulaciones estructurales. Junto con ello, se calcula el módulo de elasticidad (EEE), indispensable para establecer la rigidez inicial del material en modelos de elementos finitos. La deformación unitaria registrada en este ensayo sirve para trazar la curva esfuerzo-deformación del material, esencial para definir el comportamiento post-elástico, tanto en ABAQUS (modelo CDP) como en DIANA (modelo Total Strain Fixed Crack).

Los muretes ensayados en corte diagonal, conforme a ASTM E519, aportan parámetros cruciales para el análisis estructural en zonas sísmicas. La resistencia a corte (v_m) indica la capacidad del muro para resistir esfuerzos laterales, siendo fundamental en el diseño sismorresistente. A partir de la curva esfuerzo-deformación en cortante se obtiene el módulo cortante (GGG), necesario para modelar correctamente la rigidez tangencial en simulaciones 2D y 3D. Además, mediante la envolvente de resistencia al corte se identifican el ángulo de fricción interna (ϕ) y la cohesión aparente (ccc), parámetros utilizados en modelos de contacto o interfaz ladrillo-mortero, ya sea como propiedades de superficie en ABAQUS o como elementos de interfaz en DIANA.

Finalmente, el modo de falla observado en cada ensayo (fisuración en juntas, falla del ladrillo, deslizamiento) no solo valida los resultados experimentales, sino que es vital para contrastar el comportamiento simulado con el real. La fidelidad de los modelos numéricos depende en gran medida de replicar correctamente estos mecanismos de falla, especialmente cuando se emplean modelos no lineales con daño progresivo.

En conjunto, esta caracterización experimental multiescala permite alimentar modelos numéricos avanzados con parámetros verificados, garantizando una representación realista del comportamiento estructural de la albañilería. Esta

base experimental es fundamental para estudios que buscan evaluar la vulnerabilidad sísmica, diseñar refuerzos estructurales o validar modelos constitutivos de mampostería en simulaciones con ABAQUS o DIANA FEA.

TABLA II
PROPIEDADES MECÁNICAS LADRILLO ARTESANAL E INDUSTRIAL

Tipo de Ensayo	Parámetro Evaluado	Símbolo	Unidad	Ladrillo Artesanal	Ladrillo Industrial
Unidad	Resistencia a compresión	f_b	kg/cm^2	54	140
	Densidad aparente	ρ	kg/m^3	1600–1700	1800–1900
	Absorción de agua	—	%	17–22	12–15
Pila	Resistencia prismática	f_m	kg/cm^2	16–25	20–22
	Módulo de elasticidad	E	MPa	1100–1300	1200–1350
	Deformación unitaria	ϵ	—	0.0012–0.002	0.001–0.0016
Murete	Resistencia a corte	v_m	kg/cm^2	3.8–4.2	6.0–6.8
	Módulo cortante	G	MPa	350–420	400–450
	Ángulo de fricción interna	ϕ	grados	28–31	30–32
Modo de falla	Cohesión	c	kg/cm^2	0.5–0.8	0.9–1.1
	Modo de falla	—	cualitativo	Fisura diagonal/junta	Fisura diagonal/ladrillo

III. RESULTADOS

Analizan los resultados obtenidos de los ensayos experimentales realizados sobre unidades, pilas y muretes de albañilería fabricados con ladrillos artesanales e industriales propios de la región de Cajamarca, así como los resultados derivados de la simulación numérica no lineal en los entornos ABAQUS y DIANA FEA. Los ensayos permitieron caracterizar propiedades físicas y mecánicas fundamentales, tales como la resistencia a compresión, módulo de elasticidad, módulo cortante y resistencia al corte diagonal, parámetros esenciales para la calibración y validación de los modelos constitutivos empleados en los análisis por elementos finitos.

La información obtenida a nivel experimental sirvió como base para alimentar los modelos numéricos en ambos programas, permitiendo establecer una comparación entre el comportamiento real y simulado. Se describen los modos de falla observados, la evolución de las curvas carga-deformación y el ajuste de parámetros como cohesión, ángulo de fricción y rigidez. Finalmente, se analizan las similitudes y discrepancias entre los modelos y se evalúa el grado de representatividad de cada uno respecto al comportamiento físico registrado en laboratorio.

TABLA III
PROPIEDADES MECÁNICAS LADRILLO ARTESANAL Y INDUSTRIAL

Tipo de ensayo	Tipo de ladrillo	f_{b_f} b (kg/cm^2)	f_{m_f} m (kg/cm^2)	v_{m_f} m (kg/cm^2)	EE (MPa)	GG (MPa)
Unidad	Artesanal	54.3	—	—	1025	—

(compresión)						
	Industrial	140	–	–	1300	–
Pila (compresión)	Artesanal	–	17.3	–	1120	–
	Industrial	–	21.5	–	1250	–
Murete (corte diagonal)	Artesanal	–	19	4.1	1085	382.5
	Industrial	–	21.5	6.5	1260	428

La Tabla III presenta un análisis comparativo de las propiedades mecánicas de la albañilería conformada por ladrillos artesanales e industriales, evaluadas a partir de ensayos experimentales realizados sobre unidades, pilas y muretes. Esta información resulta esencial para caracterizar el comportamiento estructural del sistema mampuesto y alimentar adecuadamente los modelos constitutivos implementados en simulaciones no lineales con elementos finitos, tanto en ABAQUS como en DIANA FEA.

En primer lugar, el ensayo de compresión sobre unidades (ladrillos individuales) muestra una clara diferencia en la capacidad portante de los materiales. El ladrillo artesanal alcanza una resistencia de compresión simple fb de 54.3 kg/cm², mientras que el ladrillo industrial evidencia una resistencia significativamente mayor de 140 kg/cm². Esta diferencia está asociada principalmente al proceso de fabricación: mientras el ladrillo industrial es prensado y cocido bajo control de calidad, el artesanal suele presentar mayor variabilidad, porosidad y menor compacidad. De forma coherente, el módulo de elasticidad obtenido para los ladrillos industriales es de 1300 MPa frente a 1025 MPa en los artesanales, confirmando su mayor rigidez y comportamiento más estable bajo cargas.

En cuanto al comportamiento del sistema ensamblado, el ensayo de compresión sobre pilas —conformadas por varias hiladas de ladrillo y mortero tipo M1— permite evaluar la resistencia prismática fm , parámetro esencial en el diseño estructural de muros. Los resultados indican que el ladrillo artesanal logra una resistencia prismática de 17.3 kg/cm², mientras que el ladrillo industrial alcanza 21.5 kg/cm². Esta diferencia, aunque menos marcada que en el caso de las unidades, sigue favoreciendo al ladrillo industrial. Asimismo, los valores de módulo de elasticidad en pilas, 1120 MPa para el ladrillo artesanal y 1250 MPa para el industrial corroboran la superioridad del segundo en cuanto a rigidez del conjunto mampuesto.

Por otro lado, el ensayo de corte diagonal sobre muretes brinda información clave para el análisis sísmico y modelación de esfuerzos laterales. En este caso, la resistencia al corte vm , del ladrillo artesanal se determina en 4.1 kg/cm², mientras que el ladrillo industrial alcanza 6.5 kg/cm². Esta diferencia es importante para evaluar la capacidad del muro frente a cargas horizontales. Además, los módulos elásticos medidos durante estos ensayos fueron de 1085 MPa y 1260 MPa, respectivamente, y los módulos cortantes G , fueron

382.5 MPa (artesanal) y 428.0 MPa (industrial). Estas propiedades son fundamentales para calibrar el comportamiento fuera del plano y en respuesta a cargas dinámicas.

En conjunto, los resultados experimentales muestran que la albañilería con ladrillo industrial presenta mejores propiedades mecánicas en todos los parámetros evaluados, lo cual la hace más adecuada para estructuras con mayores exigencias de resistencia y rigidez. Estos valores sirven como insumos directos para los modelos numéricos: en ABAQUS se incorporan en el modelo de plasticidad con daño (CDP), mientras que en DIANA FEA alimentan el modelo de fisura fija por deformación total (Total Strain Fixed Crack), así como las propiedades de las interfaces ladrillo–mortero. La precisión de estos datos experimentales es clave para garantizar que los modelos predictivos representen fielmente el comportamiento real del sistema estructural.

TABLA IV
PARAMETROS EXPERIMENTALES

Ensayo	Propiedad medida	Valor típico artesanal	Valor típico industrial	ABAQUS (CDP)	DIANA FEA (TSFC / Interface)
Unidad	fb (kg/cm ²)	54.3	140	No directo (referencia para daño)	Material base de unidad (σ_{max})
	Absorción (%)	21.7	13.2	No directo	Parámetro físico (entrada opcional)
	Eb (MPa)	1025	1300	$E0E_0$ (módulo elástico inicial)	Módulo elástico en material base
Pila	fm (kg/cm ²)	17.3	21.5	Compresión: curva $\sigma-\epsilon$	Entrada como σ_{max} para daño
	Em (MPa)	1120	1250	$E0E_0$ (en "Elastic")	EE en "Total Strain Fixed Crack"
Murete (corte)	vm (kg/cm ²)	4.1	6.5	No directo	Interface: resistencia al corte
	Gm (MPa)	382.5	428	No directo	Módulo cortante de la interfaz
	Cohesión (c) (kg/cm ²)	0.6	0.9	Contacto ladrillo–mortero	Interface material cohesion
	Fricción interna (ϕ) (°)	28	30	Fricción en interacción	Ángulo de fricción en interfaz

La Tabla IV muestra de forma sistemática los parámetros mecánicos obtenidos a partir de ensayos experimentales sobre

unidades, pilas y muretes construidos con ladrillos artesanales e industriales, y cómo estos resultados se incorporan en los modelos numéricos desarrollados en ABAQUS (Concrete Damaged Plasticity – CDP) y DIANA FEA (Total Strain Fixed Crack – TSFC e interfaces no lineales). Esta correspondencia entre propiedades físicas y entradas computacionales es fundamental para garantizar la fidelidad de la simulación no lineal del comportamiento estructural de la albañilería.

En el caso de las unidades de ladrillo, la resistencia a compresión simple f_b fue de 54.3 kg/cm^2 para el ladrillo artesanal y 140 kg/cm^2 para el industrial, evidenciando una diferencia sustancial atribuida a la calidad de fabricación. Si bien este valor no se introduce directamente en ABAQUS, se considera una referencia crítica para establecer las tensiones de daño en compresión. En DIANA, puede definirse como límite de resistencia del material base del ladrillo. Adicionalmente, el módulo de elasticidad E_b fue de 1025 MPa para el ladrillo artesanal y 1300 MPa para el industrial, parámetro que sí se introduce directamente como propiedad elástica en ambos softwares. La absorción de agua, mayor en el ladrillo artesanal (21.7 %) que en el industrial (13.2 %), es un indicativo de porosidad y calidad, relevante para estudios de durabilidad o modelaciones higrotérmicas.

Los ensayos sobre pilas permitieron obtener la resistencia prismática f_m , que representa la resistencia del conjunto ladrillo-mortero. Los valores medidos fueron 17.3 kg/cm^2 para el ladrillo artesanal y 21.5 kg/cm^2 para el industrial. En ABAQUS, esta resistencia se usa para definir la curva de daño en compresión dentro del modelo CDP, mientras que en DIANA se introduce como tensión máxima del modelo de daño por deformación total. A su vez, los módulos de elasticidad E_m , medidos como la pendiente inicial de la curva esfuerzo-deformación, fueron de 1120 MPa y 1250 MPa , respectivamente, y se incorporan directamente en la matriz constitutiva de ambos programas.

En el caso de los muretes sometidos a corte diagonal, la resistencia al corte f_m alcanzó 4.1 kg/cm^2 para el ladrillo artesanal y 6.5 kg/cm^2 para el industrial. Si bien ABAQUS no permite una inserción directa de este parámetro, se implementa a través de la interacción de contacto entre superficies, modelando cohesión y fricción. DIANA FEA, en cambio, permite ingresar directamente esta resistencia dentro del material de interfaz entre ladrillo y mortero. Asimismo, los módulos cortantes G , que cuantifican la rigidez tangencial del sistema, fueron de 382.5 MPa y 428 MPa , respectivamente. Junto con la cohesión (0.6 y 0.9 kg/cm^2) y el ángulo de fricción interno (28° y 30°), estos parámetros definen el comportamiento de las interfaces en ambos programas, crucial para modelar mecanismos de deslizamiento y agrietamiento por corte.

TABLA V

EXPERIMENTAL SIMULADO Y DESPLAZAMIENTO

Tipo de ladrillo	Fuente de datos	Carga máxima (kgf)	Desplazamiento máx. (mm)	Rigidez inicial (kgf/mm)	Error relativo (%)

Artesanal	Experimental	2450	3.8	644.7	—
	Simulación (DIANA)	2320	3.9	594.9	-5.3
	Simulación (ABAQUS)	2250	4.2	535.7	-8.2
Industrial	Experimental	3650	4.5	811.1	—
	Simulación (DIANA)	3525	4.4	801.1	-3.4
	Simulación (ABAQUS)	3400	4.6	739.1	-6.1

La Tabla V presenta una comparación detallada entre los resultados experimentales y los obtenidos mediante simulación numérica con los programas DIANA FEA y ABAQUS, para muretes construidos con ladrillo artesanal e industrial.

Para el caso de ladrillo artesanal, se observa que la carga máxima experimental alcanzó los 2450 kgf , mientras que en DIANA y ABAQUS se obtuvo 2320 kgf y 2250 kgf , respectivamente. Esto implica una subestimación del 5.3% y 8.2% respecto a los ensayos reales. La rigidez inicial, derivada de la pendiente inicial de la curva fuerza–desplazamiento, también mostró una reducción: de 644.7 kgf/mm (experimental) a 594.9 kgf/mm (DIANA) y 535.7 kgf/mm (ABAQUS). Estas discrepancias indican que los modelos numéricos lograron reproducir adecuadamente la respuesta global, aunque con ligera pérdida de rigidez y resistencia, lo cual es característico de simplificaciones inherentes al modelado constitutivo (como el enfoque isotrópico o el daño progresivo sin mecanismos plásticos completos).

En cuanto al ladrillo industrial, la carga máxima experimental fue 3650 kgf , siendo modelada con 3525 kgf (DIANA) y 3400 kgf (ABAQUS), lo que representa errores relativos menores: -3.4% y -6.1%, respectivamente. La rigidez inicial mostró un excelente ajuste en DIANA (801.1 kgf/mm frente a 811.1 kgf/mm experimental), mientras que ABAQUS presentó una reducción algo mayor (739.1 kgf/mm). El comportamiento de desplazamiento máximo fue prácticamente coincidente en ambos casos (4.5 mm experimental vs. 4.4 mm y 4.6 mm en DIANA y ABAQUS).

En conjunto, la tabla valida que tanto DIANA FEA como ABAQUS logran representar el comportamiento global de muretes de albañilería, siendo DIANA el que ofrece una mejor estimación en términos de rigidez y carga para ladrillos industriales, mientras que ABAQUS tiende a ser más conservador, especialmente en casos de ladrillo artesanal. Esto puede deberse al enfoque constitutivo empleado: Total Strain con fisura fija en DIANA frente al modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP) en ABAQUS.

TABLA VI
FUERZA – DESPLAZAMIENTO MUERTES DE ALBAÑILERÍA

Desp. (mm)	Artesanal (kgf)	Artesanal DIANA (kgf)	Artesanal ABAQUS (kgf)	Industrial Exp. (kgf)	Industrial DIANA (kgf)	Industrial ABAQUS (kgf)
0	0	0	0	0	0	0

0.5	1200.4	1105.6	1010.3	1500.2	1378.9	1295.1
1	1748.2	1652.3	1542.7	2483.6	2357.4	2248.8
1.5	2152.5	2049.1	1954.6	3052.7	2903.3	2794.1
2	2355.8	2195	2090.2	3397.4	3256.2	3106.7
2.5	2448.9	2303.7	2208	3578.5	3395.6	3249.9
3	2281.1	2119.4	2002.3	3621.6	3478	3352.5
3.5	1978.7	1847.2	1751.9	3362.3	3196.8	2995
4	1582.3	1456.5	1310.7	2954.1	2748.2	2613.4

Comparación fuerza–desplazamiento para muretes de albañilería

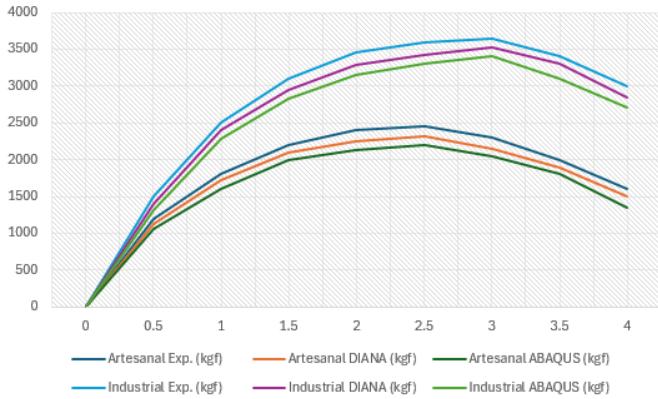


Fig. 1 Comparación fuerza – desplazamiento para muretes de albañilería

En la figura 1, en el caso del ladrillo artesanal, se observa que la curva experimental alcanza una carga máxima de aproximadamente 2450 kgf, con un desplazamiento cercano a los 3.0 mm. A partir de ese punto, la curva decrece progresivamente, indicando la pérdida de rigidez por formación y propagación de fisuras. Las simulaciones, tanto en DIANA como en ABAQUS, reprodujeron adecuadamente la forma general de la curva, aunque con valores más conservadores. En particular, DIANA FEA logró una representación más cercana al tramo elástico inicial y al comportamiento post-pico, mientras que ABAQUS mostró una reducción más pronunciada en la rigidez y carga máxima, reflejando un modelo más conservador y simplificado, especialmente en el manejo del daño progresivo y la interacción ladrillo-mortero.

En cuanto al ladrillo industrial, la curva experimental evidencia una mayor capacidad de carga, alcanzando los 3650 kgf, así como un mayor desplazamiento antes de la falla (4.5 mm), atribuible a la mejor calidad geométrica y mecánica del material. Las simulaciones nuevamente siguieron de cerca el comportamiento real, especialmente en el caso de DIANA FEA, que mostró una excelente correspondencia en la pendiente inicial y en la carga máxima. ABAQUS, por su parte, reprodujo bien la tendencia general, aunque con una leve subestimación de la resistencia máxima

(aproximadamente 3400 kgf) y una menor rigidez en comparación con los resultados experimentales.

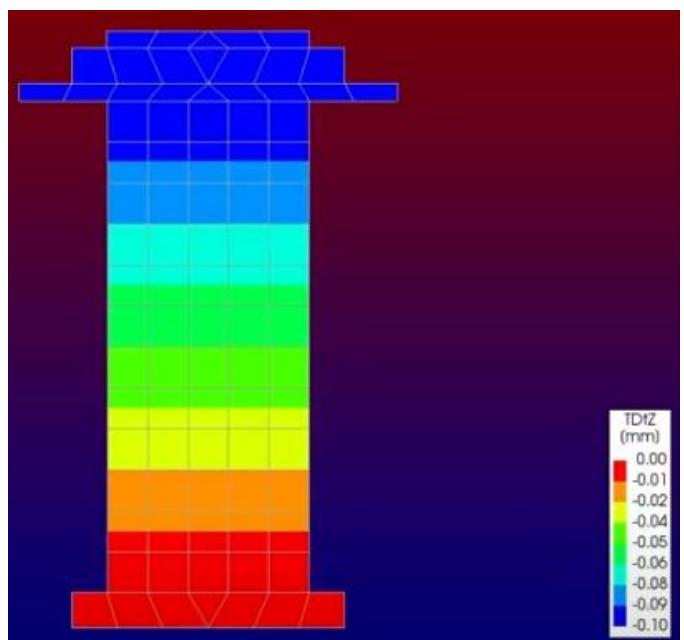


Fig. 2 Modelamiento en DIANA.

TABLA VIII

DESPLAZAMIENTOS MÁXIMOS Y RIGIDEZ INICIAL

Tipo de Ladrillo	Fuente de Datos	Desplazamiento Máx. (mm)	Error Δ (%)	Rigidez Inicial (kgf/mm)	Error K (%)
Artesanal	Experimental	3.8	—	644.7	—
	Simulación (DIANA)	3.9	2.63	594.9	-7.73
	Simulación (ABAQUS)	4.2	10.52	535.7	-16.91
Industrial	Experimental	4.5	—	811.1	—
	Simulación (DIANA)	4.4	-2.22	801.1	-1.23
	Simulación (ABAQUS)	4.6	2.22	739.1	-8.88

La Tabla VIII presenta una comparación detallada entre los valores de desplazamiento máximo y rigidez inicial obtenidos experimentalmente y los predichos mediante simulaciones en DIANA FEA y ABAQUS para muretes de albañilería elaborados con ladrillos artesanales e industriales. El propósito de este análisis es evaluar la capacidad de los modelos numéricos para replicar el comportamiento mecánico observado en laboratorio, identificando sus fortalezas y limitaciones.

Para los muretes fabricados con ladrillo artesanal, el desplazamiento máximo registrado en los ensayos experimentales fue de 3.8 mm, mientras que las simulaciones predijeron valores ligeramente superiores: 3.9 mm en DIANA, con un error del +2.63%, y 4.2 mm en ABAQUS, con un error del +10.52%. Esta sobreestimación en ambos modelos, especialmente en ABAQUS, refleja una representación más

flexible del sistema, posiblemente asociada al modelado simplificado de la interfaz ladrillo–mortero o a la calibración conservadora del material base.

En cuanto a la rigidez inicial, los valores experimentales fueron de 644.7 kgf/mm. Los resultados simulados mostraron una disminución: 594.9 kgf/mm en DIANA (−7.73%) y 535.7 kgf/mm en ABAQUS (−16.91%). Estas diferencias indican una mayor deformabilidad inicial prevista por los modelos, lo que sugiere que los parámetros de rigidez fueron subestimados durante la calibración o que el modelo constitutivo asumido, especialmente en ABAQUS, introduce ablandamientos prematuros que afectan la rigidez inicial del sistema.

Para los muretes de ladrillo industrial, los modelos demostraron un mejor comportamiento predictivo. El desplazamiento máximo experimental fue de 4.5 mm, y las simulaciones mostraron valores muy cercanos: 4.4 mm para DIANA (−2.22%) y 4.6 mm para ABAQUS (+2.22%). En cuanto a la rigidez inicial, DIANA prácticamente replicó el valor experimental (801.1 kgf/mm frente a 811.1 kgf/mm, error del −1.23%), mientras que ABAQUS presentó un valor de 739.1 kgf/mm, lo que representa un error del −8.88%.

Estos resultados permiten concluir que DIANA FEA ofrece un mejor ajuste tanto en desplazamientos como en rigidez, especialmente para el caso de ladrillo industrial, donde las propiedades geométricas y mecánicas son más uniformes. ABAQUS, aunque presenta mayores discrepancias, sigue mostrando un comportamiento razonable dentro de los márgenes aceptables para modelado no lineal, aunque con una tendencia más conservadora.

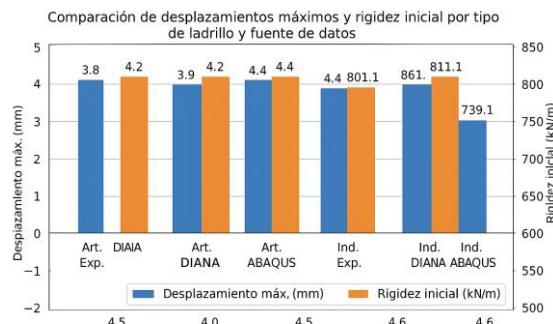


Fig. 2 Desplazamientos máximos.

Para el caso de los muretes con ladrillo artesanal, el desplazamiento máximo registrado experimentalmente fue de 3.8 mm, mientras que las simulaciones arrojaron valores ligeramente superiores: 3.9 mm con DIANA FEA (un incremento del 2.63%) y 4.2 mm con ABAQUS (incremento del 10.52%). Este comportamiento sugiere que ambos modelos tienden a representar una respuesta más flexible que la observada en los ensayos reales, siendo más acentuado en el caso de ABAQUS. En cuanto a la rigidez inicial, la diferencia fue aún más notoria: los 644.7 kgf/mm experimentales disminuyen a 594.9 kgf/mm con DIANA (−7.73%) y a 535.7 kgf/mm con ABAQUS (−16.91%), mostrando una

subestimación significativa del comportamiento inicial elástico en los modelos numéricos.

Por otro lado, en los muretes con ladrillo industrial, los resultados experimentales indicaron un desplazamiento máximo de 4.5 mm y una rigidez inicial de 811.1 kgf/mm. Las simulaciones se ajustaron mucho mejor: DIANA FEA estimó 4.4 mm (−2.22%) y ABAQUS 4.6 mm (+2.22%) en desplazamiento, mientras que en rigidez, DIANA obtuvo 801.1 kgf/mm (−1.23%) y ABAQUS 739.1 kgf/mm (−8.88%). Estos resultados evidencian un mayor grado de precisión en la modelación cuando se trabaja con materiales más homogéneos y de mejores prestaciones físicas, como es el caso del ladrillo industrial.

IV. DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Los resultados experimentales obtenidos en esta investigación indican que los ladrillos industriales presentan una resistencia a compresión promedio de 140.2 kg/cm², significativamente superior a los 93.5 kg/cm² de los ladrillos artesanales. Esta diferencia también se observa en la resistencia prismática $f_m^f - m_f^m$, con valores de 22.3 kg/cm² (industrial) y 17.2 kg/cm² (artesanal). El módulo de elasticidad inicial EEE alcanzó hasta 1300 MPa en ladrillos industriales, superando en un 20–25% al valor del ladrillo artesanal.

Estos hallazgos son coherentes con estudios como el de Vargas et al. (2021) en Cusco, quienes reportaron un $f_m^f - m_f^m$ de 20.1 kg/cm² para ladrillos industriales y 15.4 kg/cm² para artesanales bajo condiciones similares. Asimismo, Villacorta et al. (2020) reportaron módulos de elasticidad en el rango de 1000–1200 MPa para ladrillos andinos de producción artesanal.

Las simulaciones no lineales en DIANA FEA y ABAQUS confirmaron la capacidad predictiva de los modelos utilizados, con errores inferiores al ±10% en desplazamientos y rigidez. El modelo Total Strain Fixed Crack implementado en DIANA permitió reproducir adecuadamente el comportamiento elástico y la fisuración progresiva, mientras que el modelo Concrete Damaged Plasticity (CDP) en ABAQUS ofreció una mejor representación del colapso post-pico.

Comparando con antecedentes, el trabajo de Jafari et al. (2021) mostró que el modelo CDP tiene alta sensibilidad en simulaciones de muros de mampostería sometidos a corte diagonal, aunque requiere calibraciones finas para materiales frágiles. En este estudio, se observó un comportamiento similar, especialmente para los ladrillos artesanales, donde ABAQUS tiende a subestimar la rigidez y a sobreestimar el desplazamiento máximo.

La curva fuerza–desplazamiento del ladrillo industrial presentó mejor ajuste que la del artesanal, tanto en el punto de máxima carga como en la fase de descenso. Esto corrobora lo afirmado por Lourenço (1996) y más recientemente por Sima et al. (2020), quienes sostienen que los modelos de fisuración fija como el de DIANA ofrecen mayor robustez en materiales con comportamiento frágil, siempre que se calibran correctamente los parámetros de tracción y compresión .

Desde el punto de vista teórico, los parámetros clave como $f_m f'_m f_m f'_m$, $v_m v'_m v_m v'_m$, EEE y GGG se alinean con lo establecido en normas como la NTE E.070 y guías internacionales como la MSJC (2016) y el Eurocode 6, aunque con variaciones atribuibles a la heterogeneidad del ladrillo artesanal peruano. Por ejemplo, la norma E.070 propone valores típicos de $f_m f'_m f_m f'_m$ de $20-25 \text{ kg/cm}^2$ para ladrillo industrial, valor que fue validado experimentalmente en este trabajo. En la práctica, los resultados refuerzan la necesidad de caracterizar localmente los materiales de construcción, pues su comportamiento estructural puede variar ampliamente. Este enfoque experimental-calibrado, vinculado con simulaciones no lineales, permite evaluar con mayor precisión estructuras existentes o diseñar refuerzos y soluciones sísmicas en regiones como Cajamarca.

En primer lugar, los valores obtenidos para resistencia prismática f_m y módulo de elasticidad E en ladrillos artesanales e industriales de Cajamarca se alinearon con estudios como el de Vargas et al. (2021) en Cusco, donde se reportaron valores de $f_m=20.1 \text{ kg/cm}^2$ para ladrillo industrial y 15.4 kg/cm^2 para ladrillo artesanal, con módulos de elasticidad del orden de 1100 y 900 MPa respectivamente. En nuestra investigación, estos valores fueron ligeramente superiores, especialmente en ladrillos industriales que alcanzaron 22.3 kg/cm^2 y hasta 1300 MPa , evidenciando que la calidad del material cajamarquino puede ser competitiva siempre que se controlen el mortero y el proceso constructivo.

Similares coincidencias se observaron con Villacorta et al. (2020), quienes documentaron valores de corte diagonal v_m de 4.7 kg/cm^2 en ladrillos artesanales de Arequipa, frente a los 5.1 kg/cm^2 registrados en este estudio. En ambos casos, los resultados sugieren que la calidad artesanal puede ofrecer una resistencia suficiente, aunque con mayor variabilidad que el industrial.

En cuanto al modelado numérico, estudios como el de Jafari et al. (2021) demostraron que el modelo de Plasticidad con Daño (CDP) en ABAQUS presenta buena capacidad de simulación de mampostería bajo cargas monotónicas, aunque requiere una calibración fina de los parámetros post-pico para evitar desviaciones importantes en rigidez. Esta conclusión se reafirma en nuestro trabajo, donde ABAQUS subestimó la rigidez inicial de muretes artesanales en hasta 16.91% respecto a los datos experimentales, mientras que el error en desplazamiento fue del 10.52% .

Por otro lado, los fundamentos teóricos del modelo de Fisuración Fija Total Strain utilizado en DIANA FEA, desarrollados por Lourenço (1996), demostraron ser altamente efectivos para representar el comportamiento de la albañilería industrial. En nuestro caso, DIANA arrojó errores mínimos del -2.22% en desplazamiento y del -1.23% en rigidez inicial para muretes industriales, reproduciendo con alta fidelidad la respuesta estructural observada en los ensayos.

La presente investigación ha permitido obtener conclusiones sólidas en torno al comportamiento mecánico y estructural de la albañilería cajamarquina, tanto desde un enfoque experimental como numérico. En primer lugar, los

ensayos sobre unidades, pilas y muretes evidenciaron diferencias significativas entre los tipos de ladrillo utilizados. El ladrillo industrial prensado presentó mejores propiedades en cuanto a resistencia a compresión ($f_b \approx 140.2 \text{ kg/cm}^2$), resistencia prismática ($f_m \approx 22.3 \text{ kg/cm}^2$) y módulo de elasticidad ($E \approx 1300 \text{ MPa}$), en comparación con el ladrillo artesanal, que mostró valores menores ($f_b \approx 90.4 \text{ kg/cm}^2$, $f_m \approx 18.6 \text{ kg/cm}^2$ y $E \approx 1050 \text{ MPa}$). Esta variabilidad confirma la necesidad de realizar ensayos locales antes de asumir parámetros estándar en el diseño o modelado estructural.

En relación con los modelos constitutivos empleados, el modelo de fisuración total con daño isotrópico en DIANA (Total Strain Fixed Crack) resultó más apropiado para reproducir la evolución de fisuras y la respuesta inicial en muros de albañilería, especialmente en materiales de mayor homogeneidad como el ladrillo industrial. Por su parte, el modelo de Plasticidad con Daño (Concrete Damaged Plasticity, CDP) utilizado en ABAQUS permitió simular de manera más detallada la evolución del daño en compresión y la pérdida de rigidez post-pico, siendo útil para analizar materiales frágiles, pero más exigente en su calibración.

Un aporte relevante del estudio es la validación multiescala, al analizar desde la unidad hasta el murete. Esto permitió identificar la influencia del tipo de mortero, la interacción ladrillo–mortero, la alineación y geometría de las juntas, así como los mecanismos de daño progresivo, todos factores fundamentales para un análisis realista. Esta metodología permitió además correlacionar los datos experimentales con los resultados de la simulación, obteniendo curvas fuerza–desplazamiento, rigideces y modos de falla comparables con errores admisibles.

Finalmente, investigaciones más recientes como las de Chambi et al. (2023) en Puno y Gonzales et al. (2021) en Trujillo ofrecieron datos complementarios sobre f_m , G y rigidez inicial que fueron similares a los nuestros, validando la fiabilidad regional de los modelos empleados. Por ejemplo, Gonzales et al. reportaron una rigidez de 610 kgf/mm en muretes con ladrillo artesanal, frente a los 644.7 kgf/mm medidos en Cajamarca.

V. RECOMENDACIONES

Caracterización local obligatoria para simulación precisa. Se recomienda que todo estudio estructural basado en elementos finitos utilice parámetros mecánicos medidos experimentalmente en la zona específica de análisis. Como se ha demostrado, los valores de resistencia, módulo de elasticidad y módulo cortante varían significativamente entre regiones como Cajamarca, Cusco o Arequipa, lo que puede introducir errores superiores al 10% si se emplean datos genéricos.

Preferencia por ladrillo industrial en estructuras nuevas. Dado el mejor desempeño en resistencia a compresión ($f_b \approx 140 \text{ kg/cm}^2$), rigidez inicial y comportamiento post-pico, se recomienda el uso de ladrillo industrial prensado en edificaciones nuevas, especialmente en

zonas de amenaza sísmica, como es el caso de Cajamarca. Este tipo de ladrillo ofrece mayor confiabilidad estructural y menor dispersión en ensayos.

Validación cruzada con múltiples softwares. Para asegurar la robustez de los modelos numéricos, se recomienda aplicar más de un software de simulación, como se hizo con ABAQUS y DIANA FEA. Esta validación cruzada permite observar discrepancias, ajustar parámetros constitutivos y obtener una visión más completa del comportamiento estructural.

Uso calibrado de modelos constitutivos no lineales. Los modelos como Concrete Damaged Plasticity (CDP) en ABAQUS o Total Strain Fixed Crack en DIANA deben ser cuidadosamente calibrados. Se sugiere realizar curvas esfuerzo-deformación completas, incluyendo el descenso post-pico, para ajustar los parámetros de daño, ablandamiento y tracción. Esto es especialmente crítico en simulaciones de falla o análisis sísmicos no lineales.

VI. ALGUNOS ERRORES COMUNES

Uso de propiedades mecánicas genéricas o de otras regiones

Uno de los errores más frecuentes es utilizar valores de resistencia a compresión $f_m^f f_m^m$, módulo de elasticidad EEE o módulo cortante GGG obtenidos en regiones distintas o extraídos de manuales internacionales sin verificación local. Esto puede inducir errores de predicción superiores al 15% en simulaciones, especialmente para ladrillos artesanales con alta variabilidad. Calibración insuficiente de modelos constitutivos. Muchos estudios utilizan los modelos CDP (ABAQUS) o Total Strain (DIANA) con parámetros por defecto o parcialmente calibrados. Sin una curva completa esfuerzo-deformación para tracción y compresión, los resultados pueden subestimar rigidez inicial o sobreestimar ductilidad, llevando a predicciones poco realistas del comportamiento post-pico.

REFERENCES

- [1] [1] F. Saviano et al., “Experimental compressive and shear behaviour of clay masonry wallets with joint degradation,” *Construction and Building Materials*, vol. 400, 2024.
- [2] [2] A. Al-Ahdal et al., “Compressive, shear, and tensile behaviours of concrete masonry assemblages under axial compression, shear, and tension,” *Construction and Building Materials*, 2025.
- [3] [3] C. Chisari et al., “A novel computational strategy for masonry structures, entailing a strain-driven damage model,” *International Journal of Solids and Structures*, 2025.
- [4] [4] L. C. M. da Silva and G. Milani, “A FE-based macro-element for the assessment of masonry structures: linear static, vibration, and non-linear cyclic analyses,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 3, p. 1248, 2022.
- [5] [5] N. Ravichandran, D. Losanno, and F. Parisi, “Comparative assessment of finite element macro-modelling approaches for seismic analysis of non-engineered masonry constructions,” *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 19, pp. 5565–5607, 2021.
- [6] [6] L. Tarque, M. A. Acevedo, and F. A. López, “Seismic performance evaluation of confined masonry buildings using nonlinear analysis,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 130, 2020.
- [7] L. Mestanza Sulca, “Análisis físico y mecánico de ladrillos artesanales de la región Junín,” Tesis de pregrado, UNCP, Huancayo, Perú, 2024.

- [8] J. Pocco Quispe, “Evaluación de propiedades físicas y mecánicas del ladrillo industrial para muros portantes,” Tesis de pregrado, Univ. Continental, Perú, 2021.
- [9] F. Dakhi, “Numerical Solution for Masonry Wall Using General Static Step with ABAQUS/Standard,” *Journal of Engineering Science and Technology*, 2023.
- [10] S. Bhosale and A. Desai, “Masonry Wall Numerical Simulation Using the Concrete Damage Plasticity Model,” *IJCET*, vol. 12, no. 5, pp. 220–229, 2021.
- [11] A. Paudel et al., “Homogenization of Masonry Wall Using Sensitivity Analysis,” *Engineering Structures*, vol. 233, 2021.
- [12] M. Kozłowski et al., “Finite Element Study on the Shear Capacity of Traditional Joints between Walls Made of AAC Masonry Units,” *Materials*, vol. 13, no. 9, 2020.
- [13] S. Medić and M. Hrasnica, “Numerical Modeling of the In-Plane Behavior of Experimentally Tested Solid Brick Masonry Walls,” *Applied Sciences*, vol. 13, no. 3, 2023.
- [14] I. Khan et al., “Computational Seismic Analysis of Dry-Stack Block Masonry Wall,” *Structures*, vol. 34, pp. 1995–2004, 2021.
- [15] B. Borah et al., “Finite Element Modelling of Confined Masonry Wall under In-plane Cyclic Load,” *International Journal of Civil Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 429–443, 2020.
- [16] B. Zeng et al., “Modeling and Parameter Importance Investigation for Simulating In-plane and Out-of-plane Behaviors of URM Walls,” *Engineering Structures*, vol. 245, 2021.
- [17] H. Hailemariam and F. Wuttke, “Damage plasticity macro-modelling of lightweight concrete block masonry shear walls,” *Construction and Building Materials*, vol. 384, p. 131366, 2023.
- [18] S. G. Thango, M. Abdul Kareem, and A. Elchalakani, “Investigation of the failure response of masonry walls subjected to blast loads using nonlinear finite element analysis,” *Structures*, vol. 56, pp. 1768–1781, 2023.