

Artículo de investigación

<https://doi.org/10.47460/minerva.v7i21.354>

## Evaluación de la calidad del confinamiento y el acoplamiento mecánico asociados a la vulnerabilidad sísmica

Aubert Huacho Torres\*  
<https://orcid.org/0000-0003-4684-5589>  
aubert.huacho@unh.edu.pe  
Universidad Nacional de Huancavelica  
Huancavelica, Perú

Felipe Huamani Arango  
<https://orcid.org/0000-0002-3255-0707>  
felipe.huamani@unh.edu.pe  
Universidad Nacional de Huancavelica  
Huancavelica, Perú

Juan José Bonifaz Palomino  
<https://orcid.org/0009-0003-1053-1489>  
juan.bonifaz@unh.edu.pe  
Universidad Nacional de Huancavelica  
Huancavelica, Perú

Hugo Camilo Salas Tocasca  
<https://orcid.org/0000-0003-1708-4688>  
hugo.salas@unh.edu.pe  
Universidad Nacional de Huancavelica  
Huancavelica, Perú

\*Autor de correspondencia: [aubert.huacho@unh.edu.pe](mailto:aubert.huacho@unh.edu.pe)

Recibido: (07/06/2026), Aceptado: (30/09/2026)

**Resumen.** La vulnerabilidad sísmica de las viviendas de albañilería confinada constituye un problema relevante en regiones en desarrollo, especialmente en construcciones autogestionadas, cuyo desempeño estructural depende de la calidad del confinamiento. Esta investigación evaluó la influencia de dicha calidad sobre la vulnerabilidad sísmica, considerando el efecto moderador del acoplamiento mecánico de la interfaz. Para ello, se analizaron 326 viviendas mediante inspecciones técnicas y un modelo de ecuaciones estructurales por mínimos cuadrados parciales, complementado con procedimientos de validación estadística. Los resultados evidenciaron que una mayor calidad del confinamiento reduce significativamente la vulnerabilidad sísmica ( $\beta = -0.469$ ;  $p < 0.001$ ), efecto que se intensifica cuando mejora el acoplamiento mecánico entre los elementos estructurales. Se concluye que la eficacia del confinamiento no depende exclusivamente de sus características constructivas, sino también de la integridad de la interfaz, cuya evaluación resulta fundamental para orientar adecuadamente las estrategias de reforzamiento sísmico.

**Palabras clave:** albañilería confinada, vulnerabilidad sísmica, calidad del confinamiento, acoplamiento mecánico.

Confinement quality and mechanical coupling associated with seismic vulnerability

**Abstract.** The seismic vulnerability of confined masonry houses is a relevant problem in developing regions, especially in self-managed constructions, whose structural performance depends on the quality of the confinement. This research evaluated the influence of this quality on seismic vulnerability, considering the moderating effect of mechanical coupling of the interface. To this end, 326 houses were analyzed through technical inspections and a model of structural equations by partial least squares, complemented with statistical validation procedures. The results showed that a higher quality of confinement significantly reduces seismic vulnerability ( $\beta = -0.469$ ;  $p < 0.001$ ), an effect that intensifies when the mechanical coupling between structural elements improves. It is concluded that the effectiveness of confinement does not depend exclusively on its construction characteristics, but also on the integrity of the interface, whose evaluation is essential to properly guide seismic reinforcement strategies.

**Keywords:** confined masonry, seismic vulnerability, confinement quality, mechanical coupling.

## I. INTRODUCCIÓN

La albañilería confinada es el sistema constructivo residencial dominante en gran parte de las regiones sísmicas del mundo en desarrollo y concentra de manera persistente las pérdidas de los terremotos recientes [1]. Su comportamiento no depende del material de relleno sino de la integridad del marco de concreto armado que lo confina: cuando ese marco cumple su función, el sistema disipa energía de forma dúctil; cuando no la cumple, la falla es frágil y sobreviene sin aviso. Esta asimetría convierte a la calidad del confinamiento en la variable de política más accionable del parque habitacional informal, porque se decide íntegramente durante la construcción y admite verificación técnica directa.

El problema es global antes que local. La evidencia de campo documenta el mismo patrón en contextos separados por continentes: viviendas autoconstruidas sin supervisión técnica en Centroamérica [2], asentamientos informales de crecimiento vertical no proyectado en México [3], parques residenciales de albañilería confinada en Colombia [4] y en el Perú [5]. En todos ellos la tipología es la misma y la fuente de riesgo también: no la elección del sistema estructural, sino la calidad con que se ejecuta.

La literatura ha avanzado sobre dos frentes que rara vez se encuentran. El primero, experimental y numérico, caracteriza los mecanismos de falla de muros confinados bajo carga cíclica y establece cómo la interfaz entre mampostería y concreto, gobierna la transferencia de esfuerzos, [6]. El segundo, observacional, construye índices de vulnerabilidad sobre atributos geométricos y constructivos y los aplica a inventarios edificados [7]. Entre ambos persiste una brecha: los índices tratan la calidad del confinamiento como un atributo descriptivo más, sin aislar su contribución neta al riesgo ni examinar bajo qué condiciones se amplifica o se anula. La consecuencia es práctica: si el efecto protector fuese homogéneo, la política de reforzamiento podría ser uniforme; si dependiese del estado de la interfaz, intervenir el confinamiento sin atender el acoplamiento produciría rendimientos decrecientes y una asignación ineficiente de recursos escasos.

El presente estudio presenta un modelo de ecuaciones estructurales por mínimos cuadrados parciales estimado sobre viviendas inspeccionadas técnicamente. En el plano teórico, se trata el acoplamiento mecánico como condición de borde del efecto protector del confinamiento, y no como predictor paralelo, lo que permite tratar la interfaz como mecanismo de contingencia y no como factor aditivo. En el plano metodológico, integra la estimación estructural con una evaluación predictiva a nivel de indicador y con un examen de estabilidad extendido a todas las relaciones del modelo, de modo que la robustez que se afirma sea la del modelo completo y no únicamente la del coeficiente focal. El caso peruano andino opera como sitio de prueba de un problema que comparten los parques de albañilería confinada de América Latina, el sur de Asia y el Mediterráneo oriental.

## II. MARCO TEÓRICO

### A. *Fundamentos de la vulnerabilidad sísmica y comportamiento de la albañilería confinada*

La vulnerabilidad sísmica se define como la susceptibilidad de una edificación a experimentar daños ante una determinada demanda sísmica, diferenciándose de la peligrosidad, asociada con las características del fenómeno, y del riesgo, que incorpora las condiciones de exposición. Su evaluación comprende métodos analíticos, basados en la modelación estructural y las curvas de capacidad, y enfoques empíricos que utilizan indicadores verificables en campo. Estos últimos facilitan el análisis de inventarios de edificaciones y permiten estimar la vulnerabilidad mediante características observables relacionadas con su comportamiento estructural.

En las edificaciones de albañilería confinada, la resistencia sísmica depende de la interacción entre los paños de mampostería y los elementos de concreto armado. Mientras la mampostería aporta resistencia al corte, las columnas de amarre y las vigas soleras restringen las deformaciones y contribuyen a controlar la propagación de fisuras [1]. La eficacia de este sistema está condicionada por la calidad del confinamiento, determinada principalmente por la resistencia del concreto, el recubrimiento del acero y las condiciones de dosificación y curado [8]. Sin embargo, su adecuado desempeño también requiere

compatibilidad mecánica entre los materiales, debido a que las diferencias de rigidez y comportamiento posterior a la fisuración influyen en la transferencia de esfuerzos [9]. Una interacción deficiente puede comprometer la capacidad resistente y favorecer mecanismos de falla frágil [10].

La respuesta estructural también está determinada por la rigidez, la ductilidad y los mecanismos de falla, que incluyen el agrietamiento diagonal, el deslizamiento en juntas horizontales y las fallas por corte o flexión de los elementos de confinamiento. Estas condiciones influyen en la distribución de las demandas sísmicas, la disipación de energía y la estabilidad de la edificación. Para evaluar sus efectos sobre la vulnerabilidad se consideran indicadores como la deriva máxima de entrepiso, la relación entre el cortante basal resistente y demandante, el daño observable en las interfaces y la distribución de los muros resistentes [7]. Su análisis permite caracterizar el comportamiento sísmico de las viviendas e identificar condiciones estructurales que incrementan su susceptibilidad al daño.

#### *B. Acoplamiento mecánico y su influencia sobre la vulnerabilidad sísmica*

El acoplamiento mecánico entre la mampostería y los elementos de confinamiento determina la capacidad de la interfaz para transmitir esfuerzos y mantener una respuesta estructural compatible. A diferencia de la calidad del confinamiento, relacionada con las propiedades de los elementos de concreto armado, el acoplamiento depende de las condiciones de unión, la relación de rigideces, la resistencia al corte y la continuidad de la superficie de contacto [11]. La transferencia de esfuerzos ocurre mediante mecanismos de adherencia, fricción y trabazón mecánica, cuya eficacia puede disminuir ante cargas repetidas, fisuración o deslizamiento relativo [6]. En consecuencia, incluso cuando los elementos de confinamiento presentan condiciones constructivas adecuadas, las deficiencias de la interfaz pueden comprometer su desempeño sismorresistente.

La eficacia del confinamiento depende de la capacidad de la interfaz para garantizar la interacción entre los componentes estructurales. Cuando existe una transferencia adecuada de esfuerzos, los elementos de concreto armado contribuyen a restringir las deformaciones y controlar el daño en la mampostería; por el contrario, su deterioro reduce la participación efectiva del confinamiento. Esta respuesta también está condicionada por factores constructivos y geotécnicos, como la calidad de las unidades de albañilería, la altura de los muros, la clase de sitio y el número de niveles [12]. Estas variables se incorporan como covariables para controlar su influencia y estimar con mayor precisión la relación entre la calidad del confinamiento, el acoplamiento mecánico y la vulnerabilidad sísmica.

Sobre esta base, se plantea que una mayor calidad del confinamiento reduce la vulnerabilidad sísmica al mejorar la restricción de los paños y limitar la propagación de fisuras. No obstante, la magnitud de este efecto está condicionada por el acoplamiento mecánico, cuya capacidad de transferencia determina la participación efectiva de los elementos de confinamiento. Por ello, el modelo conceptual considera un efecto directo negativo de la calidad del confinamiento sobre la vulnerabilidad sísmica y un efecto moderador del acoplamiento mecánico, bajo el supuesto de que mejores condiciones de interacción fortalecen la protección estructural. Esta formulación permite evaluar la influencia de ambas propiedades y explicar cómo su interacción condiciona el comportamiento sísmico de las viviendas de albañilería confinada.

### **III. METODOLOGÍA**

#### *A. Hipótesis*

A partir del modelo conceptual propuesto, se establecen dos hipótesis susceptibles de contrastación empírica:

**H1.** La calidad del confinamiento estructural ejerce un efecto directo y negativo sobre la vulnerabilidad sísmica de las edificaciones de albañilería confinada, de manera que una mayor calidad se asocia con una menor vulnerabilidad.

**H2.** El acoplamiento mecánico entre la mampostería y los elementos de confinamiento ejerce

un efecto moderador sobre la relación entre la calidad del confinamiento y la vulnerabilidad sísmica, intensificando el efecto protector del confinamiento a medida que aumenta el nivel de acoplamiento.

#### *B. Diseño, participantes y muestra*

Estudio cuantitativo, explicativo y transversal, con la vivienda como unidad de observación y de análisis, y un modelo de ecuaciones estructurales basado en la varianza con una ruta directa, un término de interacción y cuatro covariables. El diseño es de un solo nivel: no se modeló anidamiento territorial. Se incluyeron viviendas que cumplieran tres criterios de elegibilidad: sistema estructural de albañilería de ladrillo de arcilla confinada por elementos de concreto armado; antigüedad superior a cinco años; y ausencia de intervenciones de reforzamiento documentadas o en curso. La inspección requería el ingreso a la vivienda y la autorización del ocupante, por lo que la selección fue por conveniencia entre las unidades elegibles y accesibles; se declara como tal, y los resultados describen el conjunto efectivamente analizado, sin extrapolación inferencial a la población del ámbito.

La muestra quedó conformada por 326 viviendas. La adecuación de ese tamaño para las pruebas que el modelo exige se verificó mediante el método de la raíz inversa para modelos de mínimos cuadrados parciales [13], que sitúa el coeficiente de ruta mínimo detectable en  $2,486/\sqrt{n}$  para un contraste de una cola con  $\alpha = 0,05$  y potencia de 0,80: con ese tamaño el diseño detecta coeficientes estandarizados de magnitud  $|\beta| \geq 0,138$ , y el término de interacción alcanza esa misma potencia ante tamaños de efecto  $f^2 \geq 0,025$  en la capa jerárquica de ocho predictores. Estas tres magnitudes son parámetros de diseño derivados del método citado y no resultados del análisis: el cálculo evalúa la adecuación de la muestra para las pruebas efectivamente ejecutadas y no determinó su tamaño.

#### *C. Operacionalización y procedimiento de medición*

Los tres constructos se midieron mediante inspección técnica de campo. Cada constructo se evaluó a través de tres parámetros estructurales verificados directamente en la vivienda, y cada parámetro se calificó en una rúbrica ordinal de cinco niveles definida por rangos de referencia normativos: el nivel 1 corresponde al incumplimiento del umbral exigido y el nivel 5 al cumplimiento holgado del valor de diseño. Este procedimiento es el que permite que magnitudes físicas heterogéneas (resistencias, recubrimientos, relaciones adimensionales) ingresen a un modelo de medición común: no se promedian unidades distintas, sino que cada magnitud se traduce a su posición relativa dentro del rango de referencia que le corresponde. La Tabla 1 identifica cada parámetro con la norma que fija su rango —la Norma Técnica E.060 para el concreto estructural, la E.070 para la albañilería, la E.030 para el diseño sismorresistente y la NTP 331.017 para la unidad de albañilería— y recoge, junto a ellos, las propiedades del modelo de medición.

La especificación del modelo de medición es reflectiva en los tres constructos, y esa elección es sustantiva. Los indicadores son manifestaciones de una condición subyacente común y no componentes que la definan por agregación: una vivienda con integridad constructiva deficiente tenderá a exhibir simultáneamente concreto de baja resistencia, recubrimiento insuficiente y curado incumplido, porque las tres son consecuencia de la misma práctica de obra. El criterio de intercambiabilidad se satisface —retirar un indicador no altera el significado del constructo— y la covariación dentro de cada bloque es interna, no impuesta por definición. Se descartó por ello una especificación formativa, que habría exigido tratar cada parámetro como causa independiente y habría hecho inaplicables los criterios de fiabilidad y validez convergente que se reportan. Las cuatro covariables se registraron como variables observadas y no integran el modelo de medición.

**Tabla 1.** Indicadores de los constructos y cargas factoriales

| Indicador                        | Parámetro verificado                                                                                        | Norma         | $\lambda$ |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|-----------|
| <b>Calidad del confinamiento</b> |                                                                                                             |               |           |
| CC1                              | Resistencia del concreto de columnas y vigas respecto al valor de diseño                                    | E.060 / E.070 | 0,681     |
| CC2                              | Recubrimiento efectivo del acero longitudinal respecto al mínimo exigido                                    | E.070         | 0,825     |
| CC3                              | Dosificación declarada del concreto y cumplimiento del curado húmedo                                        | E.070         | 0,706     |
| <b>Vulnerabilidad sísmica</b>    |                                                                                                             |               |           |
| VS1                              | Deriva máxima de entrepiso respecto al límite de distorsión admisible                                       | E.030         | 0,749     |
| VS2                              | Relación entre cortante basal resistente y demandante                                                       | E.030         | 0,734     |
| VS3                              | Densidad de muros por dirección y daño observable en la interfaz                                            | E.030         | 0,826     |
| <b>Acoplamiento mecánico</b>     |                                                                                                             |               |           |
| AM1                              | Relación de rigidez entre el marco de confinamiento y el paño                                               | E.070         | 0,731     |
| AM2                              | Resistencia al corte de la interfaz ladrillo-concreto                                                       | E.070         | 0,727     |
| AM3                              | Continuidad y trabazón de la interfaz: dentado, conectores y ausencia de grietas de separación muro-columna | E.070         | 0,769     |

Los indicadores presentados en la Tabla 1 permiten caracterizar los constructos mediante parámetros técnicos verificables y sus respectivas cargas factoriales. Para complementar esta evaluación, se analizaron la consistencia interna, la validez convergente y la validez discriminante del modelo de medición. Los resultados de estos procedimientos se presentan en la Tabla 2, mediante los coeficientes alfa de Cronbach y omega, la varianza media extraída y su raíz cuadrada, así como las correlaciones máximas entre constructos. Estos parámetros permiten valorar la fiabilidad de las mediciones y determinar si los constructos presentan propiedades estadísticas adecuadas para el análisis de las relaciones estructurales propuestas.

**Tabla 2.** Fiabilidad y validez de los constructos

| Constructo                | $\alpha$ | $\omega$ | AVE   | $\sqrt{AVE}$ | Correlación máxima |
|---------------------------|----------|----------|-------|--------------|--------------------|
| Calidad del confinamiento | 0,782    | 0,783    | 0,548 | 0,740        | 0,581              |
| Vulnerabilidad sísmica    | 0,813    | 0,814    | 0,594 | 0,771        | 0,581              |
| Acoplamiento mecánico     | 0,787    | 0,787    | 0,551 | 0,742        | 0,207              |

*Nota.*  $\alpha$ : alfa de Cronbach;  $\omega$ : coeficiente omega; AVE: varianza media extraída;  $\sqrt{AVE}$ : raíz cuadrada de AVE. La correlación máxima representa la correlación de mayor magnitud con otro constructo.

#### D. Estrategia analítica

El modelo se estimó por mínimos cuadrados parciales en modo A reflectivo, con 5000 submuestras bootstrap con reemplazo para la inferencia de los coeficientes. La especificación es la siguiente: la vulnerabilidad sísmica se regresa sobre la calidad del confinamiento, sobre el acoplamiento mecánico y sobre el término de interacción entre ambos, con la calidad del ladrillo, la altura del muro, la clase de sitio y el número de niveles como covariables. La moderación se modeló por el enfoque de dos etapas: el moderador se estandarizó y el término de interacción se construyó como su producto con el predictor focal, de modo que los efectos principales son interpretables en el valor medio del moderador. Las covariables ingresaron en su escala de registro sin transformación.

El modelo de medición se evaluó por cargas externas estandarizadas con criterio  $\lambda \geq 0,50$ , fiabilidad compuesta y  $\alpha$  de Cronbach  $\geq 0,70$  y varianza extraída media  $\geq 0,50$  [14]. La validez discriminante se examinó por dos criterios independientes: la razón heterorrasgo-monorrasgo con umbral estricto de

0,85 [15] y el criterio de Fornell-Larcker, que exige que la raíz de la varianza extraída de cada constructo supere su mayor correlación con los demás [14]. El modelo estructural se evaluó por los coeficientes  $\beta$  estandarizados con sus estadísticos  $t$ , valores  $p$  e intervalos de confianza al 95 % derivados del bootstrap, por el coeficiente de determinación del constructo endógeno, por el tamaño del efecto  $f^2$  [16] y por el factor de inflación de la varianza. El ajuste global se reportó mediante el residuo estandarizado cuadrático medio, contra el valor de referencia de 0,080 propuesto para modelos basados en la varianza [17]. La relevancia predictiva se evaluó por validación cruzada de diez particiones, contrastando el error de predicción fuera de muestra del modelo contra el de un modelo lineal de referencia estimado directamente sobre los indicadores exógenos [18], en dos niveles: sobre el constructo endógeno y sobre cada uno de sus indicadores.

La robustez de los resultados se evaluó mediante tres estrategias complementarias. En primer lugar, se aplicó una regresión jerárquica por mínimos cuadrados ordinarios, con errores estándar robustos frente a la heterocedasticidad, incorporando sucesivamente las covariables, el predictor principal, el moderador y el término de interacción. Este procedimiento permitió identificar la contribución de cada bloque al incremento de la varianza explicada. En segundo lugar, se examinó la estabilidad de todas las relaciones del modelo mediante técnicas de remuestreo, incluyendo jackknife con exclusión individual, submuestreo sin reemplazo del 80% y 60% de las observaciones, y bootstrap con 1000 réplicas. Para cada relación se calcularon intervalos percentiles y las proporciones de réplicas que conservaron el signo del coeficiente y su significación estadística. Finalmente, se realizaron análisis de sensibilidad mediante winsorización al 5%, estimación en una submuestra, exclusión del término de interacción y una prueba de placebo aplicada al predictor principal. Los análisis se desarrollaron en Python, utilizando semopy para el modelo de medición y statsmodels para las regresiones y los procedimientos de remuestreo. Los resultados se presentan en cuatro tablas que reúnen la evidencia estadística necesaria para contrastar las hipótesis planteadas.

## IV. RESULTADOS

### A. Modelo de medición

Los nueve indicadores superaron el umbral de carga externa, con valores comprendidos entre 0,681 y 0,826, y los tres constructos alcanzaron fiabilidad y validez convergente adecuadas. La validez discriminante se satisface por los dos criterios examinados: la razón heterorrasgo-monorrasgo alcanzó un máximo de 0,499, holgadamente por debajo del umbral estricto de 0,85, y la raíz de la varianza extraída de cada constructo, 0,740; 0,771 y 0,742, supera la correlación de mayor magnitud que ese constructo mantiene con los demás, 0,581; 0,581 y 0,207, comparación que la Tabla 1 permite leer constructo por constructo.

### B. Descriptivos, correlaciones y modelo estructural

La correlación de mayor magnitud vincula la calidad del confinamiento con la vulnerabilidad sísmica ( $r = -0,581$ ; IC 95 %  $[-0,649; -0,504]$ ), consistente en signo con H1, y el confinamiento correlaciona además de manera positiva y débil con el acoplamiento ( $r = 0,207$ ; IC 95 %  $[0,101; 0,309]$ ), lo que es coherente con que ambas condiciones dependan en parte de la misma práctica constructiva; ambos coeficientes, con los descriptivos y la matriz completa de las siete variables, constan en la Tabla 3 (A). Las cuatro covariables no exhiben correlaciones apreciables ni con el desenlace, con valores absolutos inferiores a 0,060, ni con los predictores del modelo, con valores absolutos iguales o inferiores a 0,067, y ninguna alcanza significación. La Figura 1 muestra esa relación vivienda por vivienda y la separa por nivel de acoplamiento: la pendiente de la vulnerabilidad sobre el confinamiento pasa de  $-0,104$  en las viviendas de acoplamiento bajo a  $-0,534$  en las de nivel medio y a  $-0,985$  en las de acoplamiento alto, anticipo descriptivo de la moderación que contrasta el modelo estructural.

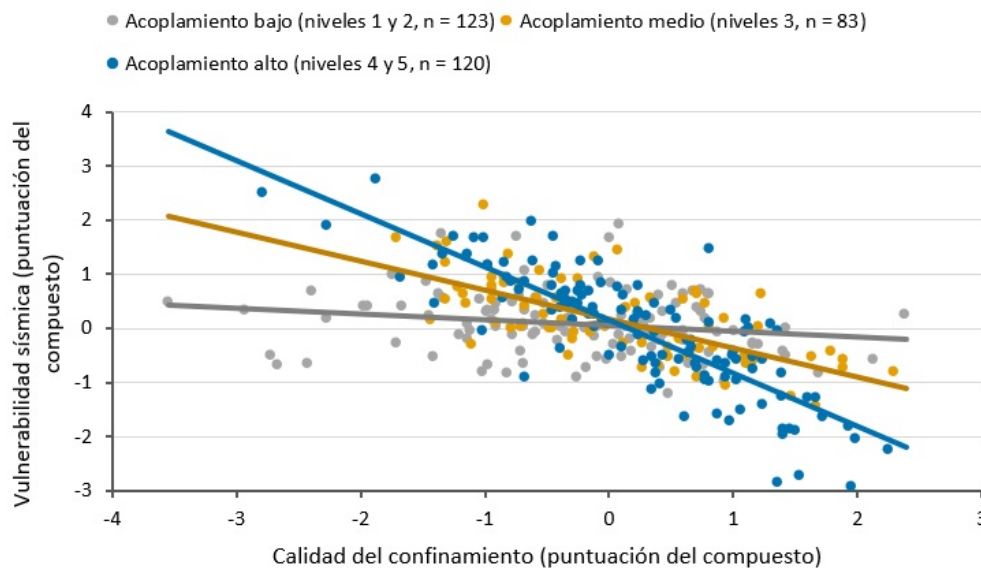


**Fig. 1.** Relación entre la calidad del confinamiento y la vulnerabilidad sísmica según el nivel de acoplamiento mecánico (N = 326)

La calidad del confinamiento ejerce el efecto directo esperado sobre la vulnerabilidad ( $\beta = -0,469$ ; IC 95 %  $[-0,551; -0,358]$ ;  $t = -9,518$ ;  $p < 0,001$ ), con un tamaño de efecto  $f^2 = 0,285$  que corresponde a la banda media (Tabla 3). El término de interacción resulta también significativo y de signo negativo ( $\beta = -0,269$ ; IC 95 %  $[-0,352; -0,012]$ ;  $t = -3,166$ ;  $p = 0,002$ ;  $f^2 = 0,101$ ). El efecto principal del acoplamiento, en cambio, no alcanza significación ( $\beta = 0,126$ ;  $p = 0,124$ ;  $f^2 = 0,021$ ), resultado coherente con el modelo conceptual: el acoplamiento no actúa como predictor paralelo, sino como condición que regula la eficacia del confinamiento. El modelo explica el 25,7 % de la varianza de la vulnerabilidad ( $R^2 = 0,257$ ). Los factores de inflación de la varianza se sitúan entre 1,012 y 1,073, muy por debajo del umbral de 3,300. El residuo estandarizado cuadrático medio alcanzó 0,090.

**Tabla 3.** Modelo estructural por mínimos cuadrados parciales: rutas estimadas y efectos condicionales

| <b>A. Rutas del modelo estructural</b>                     |         |        |         |                    |       |
|------------------------------------------------------------|---------|--------|---------|--------------------|-------|
| Relación evaluada                                          | $\beta$ | $t$    | $p$     | IC 95 %            | $f^2$ |
| Calidad del confinamiento → Vulnerabilidad sísmica (H1)    | -0,469  | -9,518 | < 0,001 | $[-0,551; -0,358]$ | 0,285 |
| Acoplamiento mecánico → Vulnerabilidad sísmica             | 0,126   | 1,540  | 0,124   | $[-0,070; 0,229]$  | 0,021 |
| Confinamiento × Acoplamiento → Vulnerabilidad sísmica (H2) | -0,269  | -3,166 | 0,002   | $[-0,352; -0,012]$ | 0,101 |

| <b>B. Efecto condicional de la calidad del confinamiento</b> |                     |
|--------------------------------------------------------------|---------------------|
| Nivel de acoplamiento mecánico                               | $\beta$ condicional |
| Bajo (-1 DE)                                                 | -0,200              |
| Medio (media)                                                | -0,469              |
| Alto (+1 DE)                                                 | -0,737              |

*Nota.*  $\beta$ : coeficiente estandarizado;  $t$ : estadístico de contraste;  $p$ : nivel de significación; IC 95 %: intervalo de confianza al 95 %;  $f^2$ : tamaño del efecto; DE: desviación estándar. Los efectos condicionales se calcularon a partir de los coeficientes del predictor principal y del término de interacción, considerando niveles estandarizados del moderador.

### C. Moderación

Ambas estimaciones del término de interacción coinciden en signo y en significación: el modelo estructural arroja  $\beta = -0,269$  ( $p = 0,002$ ) y la capa jerárquica de robustez  $\beta = -0,394$  ( $p < 0,001$ ), con un incremento de varianza explicada de 0,224 al introducir el término. Las pendientes condicionales confirman la forma de la dependencia: el efecto de la calidad del confinamiento pasa de  $\beta = -0,200$  cuando el acoplamiento se sitúa una desviación estándar por debajo de su media, a  $\beta = -0,469$  en la media y a  $\beta = -0,737$  una desviación por encima. La capa de robustez reproduce el mismo patrón monótono con magnitudes mayores ( $-0,168$ ;  $-0,562$ ;  $-0,955$ ), todas significativas. En ambos casos el efecto protector se amplifica conforme mejora el acoplamiento, que es la forma postulada en H2. La Figura 2 extiende esa lectura a los cinco niveles de la rúbrica: el efecto derivado del modelo estructural pasa de  $-0,005$  en el nivel 1 a  $-0,930$  en el nivel 5, y el de la capa de robustez, de  $0,119$  a  $-1,238$ ; el intervalo al 95 % de esta última excluye el cero en los niveles 2 a 5 y lo incluye en el nivel 1, que reúne 30 viviendas. Es la lectura que se sigue de la especificación lineal-multiplicativa, no el contraste de un umbral.

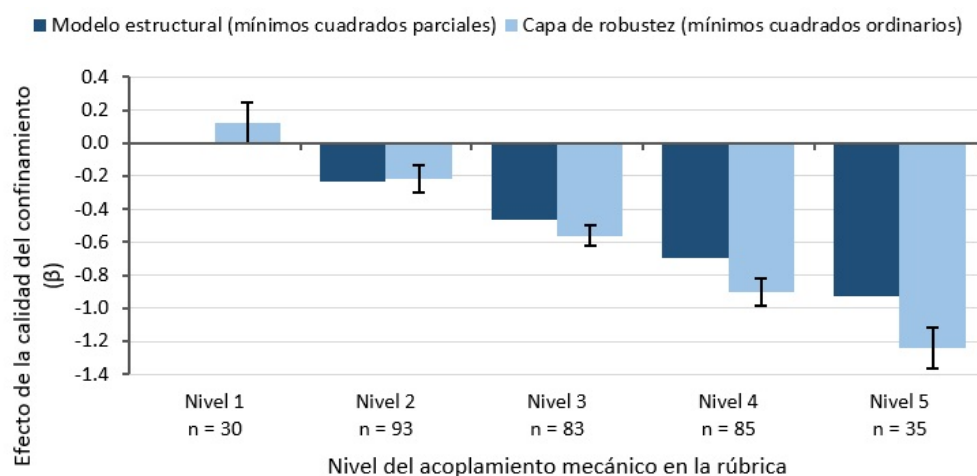


**Fig. 2.** Efecto condicional de la calidad del confinamiento sobre la vulnerabilidad en cada nivel de acoplamiento mecánico (N = 326)

### D. Robustez

En la regresión jerárquica por bloques, las covariables por sí solas explican una fracción despreciable de la varianza ( $R^2 = 0,007$ ), el predictor focal la eleva a 0,344, el moderador no aporta incremento apreciable (0,347) y el término de interacción la lleva a 0,571; ninguna covariable alcanza significación en ningún bloque. El examen de estabilidad se aplicó a las siete relaciones: el efecto focal y la interacción conservan signo y significación en el 100 % de las réplicas bajo las cuatro perturbaciones, mientras que el efecto principal del moderador conserva el signo pero alcanza significación solo en el 4 % de las réplicas de jackknife y el 48 % de las de remuestreo, lo que confirma su condición de efecto no concluyente. Las cuatro covariables se comportan de forma consistente con coeficientes nulos, con valores absolutos del coeficiente iguales o inferiores a 0,067 y valores  $p$  iguales o superiores a 0,289.

**Tabla 4.** Estabilidad del efecto focal y de la moderación ante perturbaciones de la muestra y de la especificación

| Perturbación o contraste                                                                                             | Confinamiento → Vulnerabilidad (H1) | Confinamiento × Acoplamiento (H2) | Acoplamiento → Vulnerabilidad |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| <b>A. Perturbación de la muestra, sobre la capa jerárquica por mínimos cuadrados ordinarios con errores robustos</b> |                                     |                                   |                               |
| Coefficiente de la capa jerárquica: $\beta$ ( $p$ )                                                                  | −0,562 (< 0,001)                    | −0,394 (< 0,001)                  | 0,060 (0,065)                 |
| Jackknife de exclusión individual ( $k = 326$ ): IC 95 %                                                             | [−0,566; −0,558]                    | [−0,398; −0,391]                  | [0,055; 0,064]                |
| Jackknife de exclusión individual: signo / significación                                                             | 100 / 100                           | 100 / 100                         | 100 / 4                       |
| Submuestreo sin reemplazo al 80 % ( $k = 100$ ): signo / significación                                               | 100 / 100                           | 100 / 100                         | 100 / 29                      |
| Submuestreo sin reemplazo al 60 % ( $k = 100$ ): signo / significación                                               | 100 / 100                           | 100 / 100                         | 99 / 16                       |
| Remuestreo con reemplazo ( $k = 1000$ ): signo / significación                                                       | 100 / 100                           | 100 / 100                         | 96 / 48                       |
| <b>B. Perturbación de la especificación, coeficiente del efecto focal</b>                                            |                                     |                                   |                               |
| Winsorización del desenlace al 5 %                                                                                   | −0,473                              | —                                 | —                             |
| Estimación sobre submuestra del 60 %                                                                                 | −0,533                              | —                                 | —                             |
| Modelo sin término de interacción                                                                                    | −0,495                              | No estimado                       | —                             |
| Placebo: permutación del predictor focal entre viviendas                                                             | −0,006 ( $p = 0,907$ )              | —                                 | —                             |

La tercera estrategia perturba la especificación en lugar de la muestra (Tabla 4, bloque B). El efecto focal se mantiene estable al winsorizar el desenlace al 5 % ( $\beta = -0,473$ ), al estimar sobre una submuestra del 60 % ( $\beta = -0,533$ ) y al retirar el término de interacción ( $\beta = -0,495$ ), con significación en los tres casos. El contraste decisivo es el de placebo: al permutar los valores del predictor focal entre viviendas —conservando su distribución y reconstruyendo con ella el término de interacción—, el coeficiente se desploma a  $-0,006$  y deja de ser significativo ( $p = 0,907$ ). Que el efecto desaparezca precisamente cuando se destruye la correspondencia entre predictor y desenlace, y solo entonces, es la evidencia que descarta que la asociación estimada provenga de la estructura del modelo o del procedimiento de estimación.

La Figura 3 muestra la distribución de las 1000 réplicas de remuestreo: las del efecto focal, entre  $-0,670$  y  $-0,472$ , y las de la interacción, entre  $-0,494$  y  $-0,289$ , quedan íntegramente por debajo de cero, mientras que las del efecto principal del moderador se reparten a ambos lados de él.

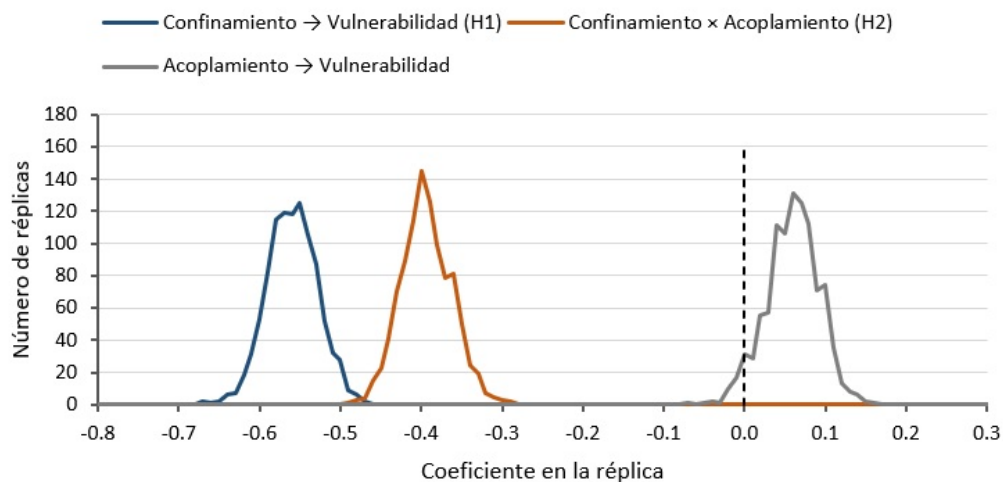


**Fig. 3.** Distribución de frecuencias de los coeficientes de regresión en las 1000 réplicas de remuestreo ( $N = 326$ )

### E. Evidencia predictiva y soporte de las hipótesis

El  $Q^2_{\text{predict}}$  del constructo alcanza 0,317, valor positivo que confirma relevancia predictiva y que se sitúa en la banda media de los cortes convencionales, no en la alta (Tabla 5). Los tres indicadores del constructo endógeno presentan  $Q^2_{\text{predict}}$  positivos —entre 0,153 y 0,215— y en los tres el error de predicción del modelo es menor que el del referente lineal; las métricas completas, con el error absoluto medio, constan en la misma tabla. Que el modelo lo supere en la totalidad de los indicadores, y no solo en el agregado, es el criterio que sustenta la afirmación de poder predictivo; su magnitud, sin embargo, es moderada y así se reporta. En conjunto, H1 queda soportada ( $\beta = -0,469$ ;  $p < 0,001$ ;  $f^2 = 0,285$ ) y H2 también ( $\beta = -0,269$ ;  $p = 0,002$ ;  $f^2 = 0,101$ ), esta última en la dirección de amplificación postulada.

**Tabla 5.** Capacidad predictiva fuera de muestra frente al modelo de referencia lineal

| Objetivo de predicción             | $Q^2_{\text{predict}}$ | RMSE   | MAE    | RMSE ref. | MAE ref. | $\Delta$ RMSE |
|------------------------------------|------------------------|--------|--------|-----------|----------|---------------|
| Constructo: vulnerabilidad sísmica | 0,317                  | 0,7057 | 0,5388 | 0,7534    | 0,5727   | −0,0478       |
| Indicador VS1                      | 0,153                  | 0,9581 | 0,7434 | 0,9831    | 0,7584   | −0,0250       |
| Indicador VS2                      | 0,169                  | 0,9472 | 0,7500 | 0,9757    | 0,7647   | −0,0285       |
| Indicador VS3                      | 0,215                  | 0,8912 | 0,6972 | 0,9314    | 0,7152   | −0,0402       |

## CONCLUSIONES

La calidad del confinamiento es un determinante directo y estable de la vulnerabilidad sísmica en viviendas de albañilería confinada, y su efecto protector está condicionado por el acoplamiento mecánico de la interfaz muro-confinamiento. La contribución teórica es haber formalizado ese acoplamiento como condición de borde y no como predictor paralelo, y haber mostrado que la firma empírica correspondiente —efecto principal no significativo junto a interacción significativa— es la que cabe esperar de un mecanismo de contingencia. Esta formulación es transferible a cualquier parque de albañilería confinada, con independencia de la región, porque describe una relación entre componentes del sistema estructural y no una particularidad local. La contribución metodológica es haber sometido el modelo a una verificación de estabilidad extendida a todas sus relaciones y a una evaluación predictiva desagregada por indicador, prácticas que convierten afirmaciones habitualmente globales en enunciados verificables y acotados.

De ello se derivan tres implicaciones prácticas. Primera, la verificación de la continuidad de la interfaz debe tratarse como precondition de los programas de reforzamiento del confinamiento y no como comprobación complementaria: intervenir el confinamiento en viviendas con acoplamiento deficiente rinde una fracción del beneficio alcanzable. Segunda, los protocolos de supervisión de obra deben incorporar la verificación de los tres parámetros que definen la calidad del confinamiento, medibles en campo con instrumentación accesible [8]. Tercera, los instrumentos de evaluación de vulnerabilidad a escala de inventario ganarían capacidad discriminante si registrasen el estado de la interfaz como atributo propio, dado que su omisión hace que un mismo nivel de calidad del confinamiento corresponda a niveles de riesgo apreciablemente distintos [4]. Las preguntas abiertas se desprenden de las limitaciones: si la relación responde a un umbral de acoplamiento y no a una modulación continua; si el patrón se mantiene en edificaciones de mayor altura, donde las demandas de corte en la interfaz son mayores [12]; y si incorporar la irregularidad estructural y el estado de conservación reduce la discrepancia de ajuste observada.

## REFERENCIAS

- [1] J. Pérez, S. Brzev, E. Espinosa, S. Ganzerli, D. Quiun, and M. Reiter, “Experimental research studies on seismic behaviour of confined masonry structures: Current status and future needs,” *Buildings*, vol. 13, no. 7, 2023.
- [2] R. Cojulún and F. Martínez, “Seismic vulnerability and risk assessment of confined masonry dwellings in guatemala city,” *Advances in Structural Engineering*, 2026.

- [3] C. Medel, H. Guerrero, and C. Lubin, "Stacking risk: The growing seismic vulnerability of self-built housing in mexican colonias," *Perspectives in Architecture and Urbanism*, vol. 2, no. 2, p. 100047, 2025.
- [4] J. Archbold, J. Carrillo, J. Orjuela, and J. Piedrahita, "Seismic fragility assessment of confined masonry houses in colombia," *Earthquake Spectra*, vol. 41, no. 5, pp. 3586–3611, 2025.
- [5] V. Reynoza and J. Acero, "Evaluation and seismic risk of confined masonry buildings in the city of eten - chichilayo - peru, 2023," *Structural Integrity and Life*, vol. 25, no. 2, pp. 297–300, 2025.
- [6] A. Gupta, A. Singh, V. Singhal, and K. Fayaz, "Numerical simulation of interaction properties at wall-to-tie-column interface for confined masonry walls," *Construction and Building Materials*, vol. 411, p. 134139, 2024.
- [7] J. Ojeda, L. Huatangari, J. Arce, N. Fernández, M. Santisteban, and M. Serrano, "Assembly algorithms for seismic vulnerability estimation in confined masonry dwellings," *International Journal of Safety and Security Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 967–984, 2024.
- [8] B. Borah, V. Singhal, and H. Kaushik, "Assessment of seismic design provisions for confined masonry using experimental and numerical approaches," *Engineering Structures*, vol. 245, p. 112864, 2021.
- [9] M. Ajmal, A. Qazi, A. Ahmed, U. Mughal, S. Kazmi, and M. Munir, "Influence of confining element stiffness on the in-plane seismic performance of confined masonry walls," *Materials*, vol. 17, no. 13, 2024.
- [10] I. Ahmad, K. Khplwak, Q. Samiullah, A. Suboor, U. Noor, and K. Shahzada, "Seismic behavior of semi-confined vs. confined brick masonry structures: An experimental analysis," *Structures*, vol. 73, p. 108339, 2025.
- [11] N. Lim, A. Chun, and T. Kang, "Effects of toothed edges and window openings on seismic behaviour of confined masonry walls," *Magazine of Concrete Research*, vol. 74, no. 3, pp. 109–122, 2022.
- [12] E. Espinosa, A. Terán, and E. Tapia, "Seismic performance assessment of mid-rise confined masonry buildings," *Bulletin of Earthquake Engineering*, vol. 21, no. 10, pp. 5017–5039, 2023.
- [13] N. Kock and P. Hadaya, "Minimum sample size estimation in pls-sem: The inverse square root and gamma-exponential methods," *Information Systems Journal*, vol. 28, no. 1, pp. 227–261, 2016.
- [14] C. Fornell and D. Larcker, "Evaluating structural equation models with unobservable variables and measurement error," *Journal of Marketing Research*, vol. 18, no. 1, pp. 39–50, 1981.
- [15] J. Henseler, C. Ringle, and M. Sarstedt, "A new criterion for assessing discriminant validity in variance-based structural equation modeling," *Journal of the Academy of Marketing Science*, vol. 43, no. 1, pp. 115–135, 2014.
- [16] J. Cohen, "A power primer," *Psychological Bulletin*, vol. 112, no. 1, pp. 155–159, 1992.
- [17] J. Henseler, G. Hubona, and P. Ray, "Using pls path modeling in new technology research: updated guidelines," *Industrial Management & Data Systems*, vol. 116, no. 1, pp. 2–20, 2016.
- [18] G. Shmueli, S. Ray, J. Velasquez, and S. Chatla, "The elephant in the room: Predictive performance of pls models," *Journal of Business Research*, vol. 69, no. 10, pp. 4552–4564, 2016.