
ARTÍCULO

Mampostería de adobe y hormigón armado: Evaluación estructural durante la intervención de la Iglesia de Uquía (Jujuy, Argentina)

Adobe masonry and reinforced concrete: Structural assessment during the intervention of the Uquía's Church (Jujuy, Argentina)

Nicolás Rodolfo Losa

Laboratorio de Arquitecturas Andinas y Construcción con Tierra, Instituto Rodolfo Kusch, Universidad Nacional de Jujuy, San Salvador de Jujuy, Jujuy, Argentina

Autor de correspondencia: nlosa@kusch.unju.edu.ar, <http://orcid.org/0000-0002-6170-1535>

Resumen: Este trabajo evalúa el comportamiento estructural de la Iglesia de San Francisco de Paula, en Uquía (Jujuy, Argentina), un edificio histórico que presenta muros de mampostería de adobe de gran espesor intervenidos previamente con marcos internos de hormigón armado. Al momento de su restauración, se simuló la iglesia aplicando el Método de Elementos Finitos y diversas estrategias de aproximación al comportamiento mecánico de sus materiales. Se analizaron escenarios con y sin la estructura de hormigón, con y sin la presencia de patologías, alimentando el diseño de propuestas de refuerzo. Como resultado, se verificó un aumento del desempeño sísmico de la iglesia de Uquía en presencia de los refuerzos propuestos y conservando su estructura interna de hormigón armado. Las simulaciones muestran que el hormigón aporta rigidez a la estructura, limita sus deformaciones postcríticas, afecta el desarrollo de tensiones y el modo de falla de los muros de adobe.

Palabras clave: Método de elementos finitos; Análisis pushover; Desempeño sísmico; Restauración patrimonial.

Abstract: This work evaluates the structural behavior of the Church of San Francisco de Paula, in Uquía (Jujuy, Argentina), a historic building that presents thick adobe masonry walls previously intervened with internal reinforced concrete frames. In the context of its restoration, the church was simulated using the Finite Element Method and various strategies to approximate the mechanical behavior of its materials. Scenarios with and without the concrete structure, and with and without the presence of pathologies, were analyzed, informing the design of reinforcement proposals. As a result, an increase in the seismic performance of the church of Uquía was verified in the presence of the proposed reinforcements and preserving its internal reinforced concrete structure. The simulations show that the concrete provides stiffness to the structure, limits its post-critical deformations, and affects the development of stresses and the failure mode of the adobe walls.

Keywords: Finite element method; Pushover analysis; Seismic performance; Heritage restoration.

Recibido: 08-07-2025 / **Aceptado:** 17-06-2026 / **Publicado:** 31-07-2026

Cómo citar: Nicolás Rodolfo Losa (2026). Mampostería de adobe y hormigón armado: Evaluación estructural durante la intervención de la Iglesia de Uquía (Jujuy, Argentina). *Informes de la Construcción*, 78 (582): 7331. <https://doi.org/10.3989/ic.7331>

Copyright: © 2026 Editorial CSIC. Este es un contenido de acceso abierto diamante distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0)

Información complementaria ↓

1. INTRODUCCIÓN

La mampostería de adobe (MAD) es una técnica constructiva presente en arquitecturas tanto históricas como actuales, cuyo comportamiento y refuerzo sísmico se estudia con persistencia desde la década de 1970, en la búsqueda de la seguridad y conservación de tales arquitecturas [1, 2]. Muchas de las soluciones propuestas como refuerzo sísmico han incluido, en diferentes épocas, la incorporación de materiales industrializados como sostén estructural de la mampostería vernácula, ya sea a través de sistemas de drizado [3], metálicos [4, 5], de hormigón armado (HA) o concreto reforzado. Esta última opción ha incluido diferentes diseños conforme fue avanzando el conocimiento sobre la técnica del adobe y su compatibilidad con el hormigón [6, 7]. Si bien, en la actualidad, es discutido el beneficio en el uso combinado de MAD con HA, resultan ineludibles la existencia de arquitecturas con estructuras mixtas, de ambos materiales [8] y el especial desafío que suponen las arquitecturas históricas de esta especie, al intervenirlas para su conservación.

En la intención de estudiar el comportamiento estructural conjunto entre MAD y HA, resulta imperativo repasar el abordaje del análisis estructural para arquitecturas de MAD en general. Existen diferentes desarrollos en materia de simulaciones computacionales [9] de donde se destacan las aplicaciones del Método de Elementos Finitos (MEF). Para una escala como la que suponen arquitecturas completas, normalmente llamada macroescala, es adecuado trabajar con modelos constitutivos homogeneizados [10] y se conviene aceptable, incluso, incurrir en el análisis estructural con modelos materiales simples, de comportamiento isotrópico y con una parametrización escalar para su régimen no lineal, ya sea en una ley de daño o de plasticidad [11]. En la realidad, un entramado de mampostería supone una microestructura en sí misma, de naturaleza ortotrópica, con un comportamiento no lineal pautado por fisuraciones entre las fases de mampuestos y juntas.

La concesión antedicha se sostiene en el gran número de incertidumbres que supone la materialidad de cada construcción de adobe, que haría inabordable su análisis desde una postura más rigurosa. Al comportamiento mecánicamente complejo de la mampostería, se suman una gran variabilidad en sus propiedades mecánicas (inherente a un material artesanal) y un sinfín de variedades en las técnicas de construcción donde se la emplea [11]. Bajo esta última consideración es donde podrían contemplarse, en cierto sentido, los usos y refuerzos de HA junto al adobe.

La interacción entre MAD y HA supone un fenómeno compatible con el análisis estructural a microescala, donde cada elemento se considera de forma individual y se presta especial detalle a sus planos de vinculación. Sin embargo, los estudios sobre MAD suelen estar orientados a la modelación de los mampuestos y los esfuerzos en el plano de sus juntas. En tal contexto, el HA aparece en distintas experiencias de ensayo dando materialidad a una condición de montaje, que resulta modelada con mayor o menor grado de detalle, pero sin una ley de interacción específica entre MAD y HA [12, 13]. Las simulaciones a nivel de la macroescala son habituales, pero, en ellas, los elementos con rigideces superiores al adobe suelen ser vigas o refuerzos de madera; y cuyo efecto estructural se limita al vínculo puntual entre muros o el soporte del dintel en aberturas. Esto se observa tanto para ensayos de laboratorio [9] como para el análisis de arquitecturas históricas de MAD [14].

Este trabajo se ubica en el tema de vacancia a partir del caso de la Iglesia de San Francisco de Paula, cuyos muros portantes de MAD fueron modificados internamente con una estructura independiente de marcos de HA [15, 16]. La magnitud de tal interacción entre materiales y el presunto rol que los marcos cumplen, frente a un profundo agrietamiento descubierto en los muros, supusieron abordar el presente análisis, por fuera de las experiencias habituales.

1.1. La Iglesia de San Francisco de Paula, Uquía

La localidad de Uquía se encuentra en la provincia de Jujuy, Argentina, a 116 km al norte de la capital provincial y ascendiendo a los 2824 m sobre el nivel del mar, en la zona céntrica de la Quebrada de

Humahuaca¹; una zona de riesgo sísmico moderado a elevado [17]. La Iglesia de San Francisco de Paula fue edificada allí en el año 1691 y fue declarada Monumento Histórico Nacional en 1941 por la Comisión Nacional de Monumentos, de Lugares y de Bienes Históricos [18], siendo reconocida respecto a sus valores históricos y arquitectónicos, comunes a otros exponentes del patrimonio eclesiástico de la región [15, 16]. La declaratoria compuso un andamiaje para la protección legal del inmueble por parte del Estado, lo que dio paso a una serie de intervenciones para su conservación con impronta institucional [18]. En tal aspecto, los consensos para la conservación e intervención de arquitecturas históricas, en esa época, sobrevaloraban el uso de cemento, ya sea en su combinación con la materia prima o en la forma de refuerzos de HA. Tal postura se mantuvo con fuerza hasta la década de 1970 [19].

La iglesia de Uquía se compone de una única nave de impronta rectangular, orientada con su fachada de cara al este. Está construida con muros de MAD de 1 m de espesor que constituyen su estructura portante original. La dimensión media de sus mampuestos es de 60 cm x 30 cm x 10 cm, dispuestos en una variación del aparejo inglés, con juntas de 2 a 3 cm ejecutadas en barro de un suelo de características similares a los adobes [15]. Las dimensiones exteriores de la nave son 7,15 m de ancho por 17,50 m de largo, con muros laterales de una altura entre 5,00 m y 4,30 m, siguiendo la pendiente del terreno que sube hacia el oeste. Dichos muros sirven de apoyo a una cubierta a dos aguas, originalmente ejecutada con una técnica local llamada *tortead*, consistente en una capa de suelo arcilloso con fibra vegetal endurecido, dispuesto sobre un entablonado. La cumbrera de dicha cubierta alcanza los 8 m medidos desde el interior y se sostiene por cerchas de par y nudillo, de madera semidura (Tipuana Tipu o “Tipa Blanca”), que apoyan sobre canes anclados a la viga-collar² de la MAD [16]. Los muros de fachada y contrafachada poseen remate triangular, siguiendo la forma de la cubierta; el primero quedando por delante de la cubierta y sobrepasando la misma, con cornisas y otros arreglos estéticos.

En la **Figura 1** puede apreciarse la nave en su parcela, así como la torre campanario independiente, que se ha obviado en el desarrollo del presente trabajo. Un recinto secundario se anexa a la nave en el norte, oculto en la fotografía tras el follaje, funcionando actualmente como sacristía. Es un espacio cuadrado de 6,00 m de lado y 3,10 m de altura, con muros que se angostan a media altura, llegando a los 70 cm de espesor. Posee el mismo tipo de mampostería en el interior de sus muros y la misma técnica de cubierta que la nave, pero sobre una estructura diferente: El entablonado apoya sobre una cumbrera portante y tirantes.

La mampostería se asienta en un aparejo de piedras sin canteo y dispuestas en encastre, o pircado, con juntas de entre 3 y 5 cm siguiendo una trabazón tridimensional, compuestas de un suelo compatible al de la superestructura y estabilizado con cal apagada [15]. El pircado es el cimiento principal de la Iglesia y forma un sobrecimiento que separa el comienzo de la mampostería respecto a los niveles de piso interior y exterior (con pendiente). Por ello, la altura del sobrecimiento varía entre los 60 y 80 cm (dentro de las alturas expuestas anteriormente para los muros). La generalidad de la mampostería se encuentra construida a plomo vertical, registrándose una inclinación en el muro de fachada que se discute más adelante, en el planteo de un cuadro patológico presente en la Iglesia.

El estado edilicio actual de la iglesia de Uquía es idóneo, habiendo recibido trabajos integrales de relevamiento, proyecto e intervención para su conservación, entre los años 2018 y 2021, de donde emerge el presente estudio. Previamente, la arquitectura presentaba patologías de humedad y deterioro material en sectores de cubierta y muros, que fueron asociados a la naturaleza de intervenciones constructivas anteriores, de la década de 1940 [16]. Como se planteó anteriormente, fue un criterio rector de la época la incorporación de cemento en técnicas y materiales, lo que significó en este caso

¹ Históricamente, la mampostería de adobe ha tenido un rol central en la producción arquitectónica de esta región, con una notable persistencia en la actualidad. En el año 2003 fue inscrita en la Lista del Patrimonio Mundial de la UNESCO.

² Sección compuesta por largueros y travesaños, habitual en la construcción con MAD para arriostrar el coronamiento de los muros por ambos paramentos. Se dispone perimetralmente en los recintos para garantizar un comportamiento de caja cerrada ante esfuerzos laterales, ya sean sísmicos o del empuje de la cubierta.

la aplicación de capas y revoques sobre la mampostería y el torteado. El pobre servicio del material industrial en las técnicas de tierra modificadas devino en los problemas que motivaron un proyecto para una nueva intervención sobre la arquitectura [16], que incluyó la restitución de la cubierta. En el marco de tal proyecto, se realizaron las tareas de relevamiento preliminar: planimetría, desnudo de revoques, caracterización de técnicas y materiales presentes [15]. El proyecto incluyó la inspección de la viga-collar de los muros de la nave y preveía un estudio del comportamiento sísmico del conjunto, buscando evaluar la suficiencia o no de tal refuerzo.



Figura 1. Iglesia de San Francisco de Paula tras su restauración. Fuentes: Cartografía de Wikimedia Commons, 2026, Fotografía de La Nación, Revista Lugares, 4 de septiembre, 2021.

Durante las tareas de intervención, el desnudo de revoques expuso 4 grietas de importancia, 2 en cada uno de los muros laterales. Se trataba de discontinuidades de entre 4 y 10 cm de separación en su punto máximo, todas ellas penetrando la totalidad del espesor de muro, con un desarrollo esencialmente vertical que iba prácticamente desde el sobrecimiento hasta la altura de la viga-collar. Dos de las grietas se encontraban en las cercanías al muro de fachada, tras el entepiso de la iglesia dedicado originalmente a la formación coral; y las otras dos se encontraban alineadas con la sacristía. El hallazgo de semejante estado patológico motivó renovadas tareas de relevamiento, tanto material como documental, desde las que se estimó que se trataba de un problema de más de un siglo de antigüedad [16], cuyo ocultamiento se habría realizado en la década de 1940 sin un registro pertinente. Si bien el esquema del agrietamiento no es característico de asentamientos diferenciales, una serie de análisis estructurales preliminares y una exploración geotécnica del predio llevaron a la conjetura de que podría haberse presentado un movimiento vertical y rotacional lento de muros en la arquitectura. El estudio del muro de fachada permitió constatar su inclinación aproximada de 2° respecto a la vertical y una discontinuidad en su unión a los muros laterales.

La hipótesis de un descenso y rotación lentos por parte del muro de fachada y parte de los muros laterales es consistente, además, con los registros disponibles tras el segundo relevamiento documental. En virtud de la disposición de los daños y su direccionalidad homogénea, una metodología arqueosismológica permitiría evaluar un posible evento sísmico histórico, sin registro documental, en la región [20]. Los análisis estructurales posteriores, sin embargo, sugieren que la acción de empujes laterales de importancia habría causado daños diferentes sobre el muro de fachada. Esto observable en el apartado de Resultados, para el caso puntual de una iglesia de Uquía compuesta únicamente por mampostería de adobe. Al momento de la intervención, no obstante, la composición material de la construcción era otro.

Una estructura integral de HA, construida en el interior de los muros de la iglesia de Uquía a filo de su cara exterior, fue descubierta durante el tratamiento de su estado patológico [16]. El sistema, que carecía de registros que atestigüen su presencia, consta de 12 columnas de HA: 8 dispuestas en las esquinas de la nave y de la sacristía, otras 4 dividiendo los muros laterales en tramos semejantes. Las columnas forman marcos con vigas perimetrales, una superior (bajo el coronamiento de los muros y su viga-collar de madera) y otra inferior, usando el sobrecimiento como lecho. Son secciones de 30 x 30 cm, con escasa armadura relevada [16]. El marco frontal, dentro del muro de fachada, materializa con sus columnas y vigas a los pilares y cornisa del frente, formas que se pensaban ejecutadas de MAD. Se trata de una modificación constructiva de importancia, producto de intervenciones en torno a la década de 1940, con posterioridad a la declaratoria como Monumento Histórico Nacional. Se presume que su objetivo era consolidar estructuralmente la arquitectura frente a las discontinuidades que suponían las grietas pasantes en muros.

1.2. Problemática y objetivos

Ante la revelación de las grietas y la estructura integral de HA, un problema de diferentes dimensiones surgió en el proyecto de intervención sobre la iglesia de Uquía. Por un lado, que los marcos constituyen una modificación sustancial en el sistema constructivo de la arquitectura histórica, que han tenido un impacto estético en la fachada y materializan una intervención difícil de revertir. Esto llevó a un análisis desde el campo de la conservación, donde se manejaron principios como la autenticidad constructiva [16]. Por otro lado, que el comportamiento estructural de la iglesia permanece en terreno inexplorado por el estado del arte. La incidencia del HA en el comportamiento estructural se supone importante y la disimilitud entre sus propiedades mecánicas y constructivas con las de la MAD bien podría justificar la búsqueda de una estrategia de análisis contemplativa de su interacción de forma directa, por fuera de otras experiencias registradas para la temática. Por último (pero, si se quiere, lo más urgente), que el estado estructural de la arquitectura requería de un mayor grado de verificación. A la posible vulnerabilidad sísmica del conjunto, un problema que permanecía subyacente dada su locación y materialidad, se le sumó la existencia de discontinuidades en los muros y el posible sostenimiento de los paños irregulares y de la fachada (inclinada) por parte de los marcos de HA.

Este trabajo presenta parte del análisis estructural realizado sobre la Iglesia de San Francisco de Paula, en Uquía, en paralelo a las tareas de intervención antes descritas, para abordar el problema en cuestión. La conservación de la arquitectura histórica queda por fuera del desarrollo, pero permanece como un norte entre sus objetivos, en tanto que el análisis presente fue clave en el debate de si la remoción del HA era considerable como parte de la intervención, o no [16]. El comportamiento estructural del conjunto de MAD y el HA se realizó en diversas etapas y aproximaciones, con el objetivo de responder a los interrogantes de los conservadores sobre si los marcos de HA suponían un problema o una mejora (en términos puramente estructurales) para la iglesia de MAD, sobre si la arquitectura era considerable estable en su servicio, y si era requerido plantear la colocación de nuevos refuerzos.

Se exponen resultados de simulaciones de la iglesia frente a dos estados de carga: El servicio habitual de la construcción (peso propio y sobrecargas) y un empuje lateral, representativo de un evento sísmico teórico compatible con un espectro de respuesta reglamentario para la estructura³. Frente a tales condiciones, se compararon el comportamiento de la estructura de MAD en ausencia y en presencia de sus componentes de HA, dejando en evidencia su influencia en, al menos, términos expeditivos que resultaron compatibles con el avance del proyecto de intervención. Finalmente, se exponen conclusiones sobre el caso de estudio y se abren discusiones sobre el uso de estrategias computacionales como la implementada.

³ El marco reglamentario es el brindado por CIRSOC INPRES 103-2013, parte 1. El reglamento estipula exigencias y condiciones de cálculo en función de la zonificación sísmica de la República Argentina.

2. METODOLOGÍA

El análisis estructural de la Iglesia de la Santa Cruz y San Francisco de Paula se realizó mediante la aplicación de MEF, metodología computacional ampliamente aceptada para el estudio de arquitecturas históricas de MAD [9, 11, 14]. Partiendo de las diferentes convenciones expuestas en el apartado introductorio, vale la pena discutir la modelación particular del caso de Uquía. Los muros de la arquitectura se modelaron con elementos sólidos tridimensionales, dado sus importantes espesores (aún para los paños más angostos, en la sacristía) que suponen comportamientos alejados a los de placas delgadas. Las dimensiones dominantes de los adobes sobre sus juntas, y la similitud de sus materiales componentes, dieron sostén a la suposición de que la modelación de la mampostería como un material isotrópico y homogéneo era mecánicamente razonable, dentro del nivel de rigurosidad aceptado. Se utilizó un mallado con predominancia de elementos prismáticos, subdividiendo el espesor de muro en, al menos, cinco elementos [11]. Las grietas y discontinuidades en la MAD fueron modeladas separando tramos de muro, con puntos en común a nivel de sobrecimiento y llegando a la separación máxima relevada a nivel de coronamiento.

Los elementos de madera, concretamente la viga-collar y el entrepiso destinado al coro, así como los marcos de HA, se modelaron como elementos finitos lineales. Esto significa que el eje de las piezas, representando el baricentro de su sección, se trazó en el interior del volumen sólido de los muros, uniendo puntos de la estructura que, a su vez, conformaban el sólido de MAD homogeneizada. Los elementos son capaces de transmitir esfuerzos normales, cortantes y de flexión entre los puntos que conectan. El sobrecimiento, por su lado, se modeló de forma análoga a los muros de MAD, considerando su empotramiento completo desde el plano del nivel de piso más bajo. Las Figuras 2 y 3 muestran los modelos estructurales de la iglesia de Uquía previo al diseño de nuevos refuerzos.

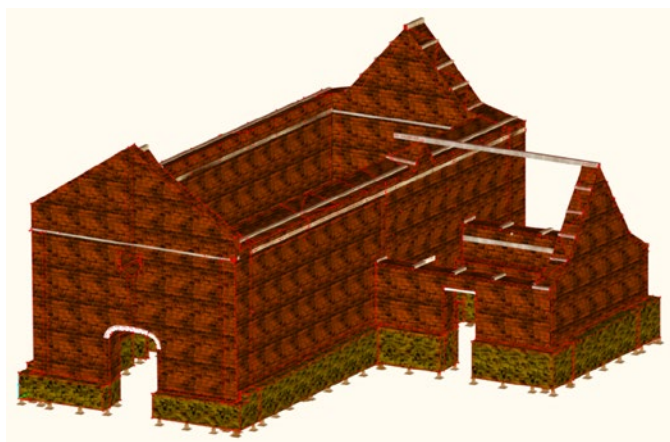


Figura 2. Modelo MEF de la iglesia de Uquía sin patologías ni intervenciones.

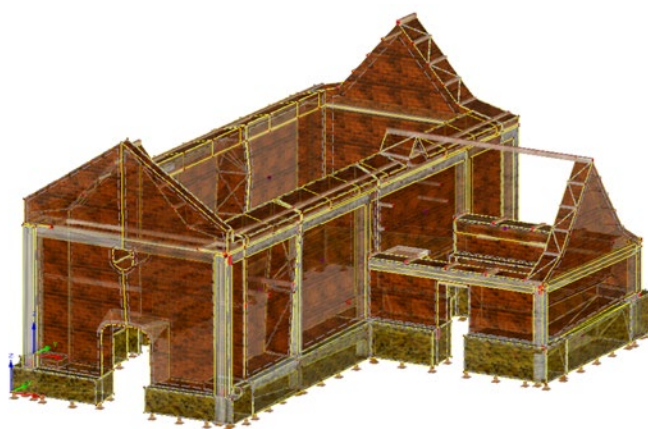


Figura 3. Modelo MEF de la iglesia de Uquía presentando su estructura integrada de HA y las fisuraciones relevadas.

Se redujo el problema dinámico que supondría un evento sísmico real a un análisis no-lineal estático equivalente (o análisis pushover), al modelarlo como el empuje lateral antes mencionado en los estados de carga. Tal práctica es adecuada al análisis estructural de este tipo de construcciones, con bases tanto desde el trabajo de otros autores como desde estado del arte en la simulación de MAD [9, 21]. Se determinaron las frecuencias de vibración natural de la estructura que movilizaban efectivamente la mayor masa de los muros portantes de la nave, y se combinaron sus respuestas modales para generar una distribución proporcional de carga durante la aplicación del empuje lateral, en el análisis pushover. El modelo descrito, en términos de su dominio y tipo de análisis, permitió considerar la no-linealidad en el comportamiento de la estructura, ajustando las variables del problema en pasos de carga sucesivos. El desempeño sísmico de la estructura, a los fines de este trabajo, se evaluó a partir del mayor desplazamiento registrado para un muro a nivel de su coronamiento.

2.1. Modelado de los materiales

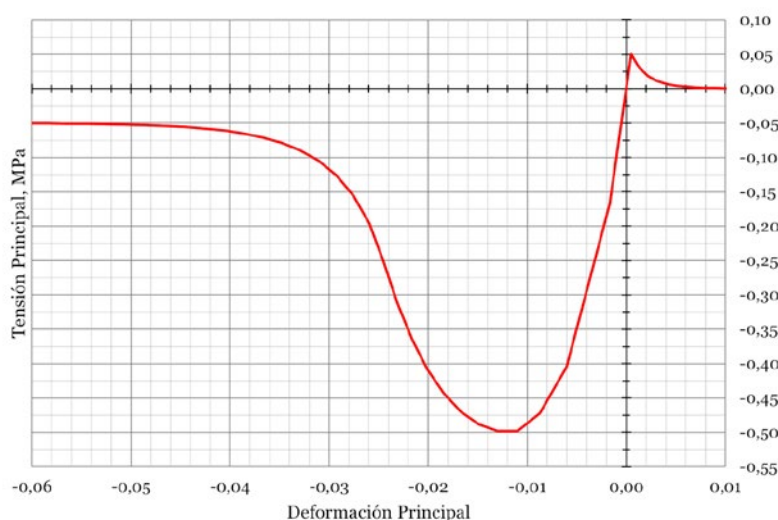
Para caracterizar la MAD de la iglesia de Uquía a nivel constitutivo se utilizó una ley de daño escalar, similar a modelos empleados en la caracterización no-lineal del HA en un estado de fisuración dispersa [22]. Se considera una paulatina reducción de rigidez en el material en función de la deformación total del punto evaluado, de forma desacoplada para estados tensionales de compresión y de tracción. Existen varios modelos de HA en estado de fisuración dispersa que se han mostrado competentes para simular sistemas de MAD [7, 11, 14, 18] y la ley de Mazars [22], como ejemplo particular de un modelo sin consideración de un estado de confinamiento, se ha utilizado con éxito en el análisis estructural de arquitecturas históricas de mampostería [23, 24].

Las características materiales de la MAD en la iglesia de Uquía suponen buenas condiciones para admitir una modelación convencional, pero se caracterizó el material con curvas de Tensión vs. Deformación diferentes a las correspondientes a la ley de Mazars. Con el objetivo de parametrizar el comportamiento de la MAD directamente desde propiedades físicas aceptadas para el material vernáculo, se optó por tomar del modelo constitutivo de Lourenço [10] la construcción de curvas acordes a una mampostería homogeneizada.

La capacidad técnica para realizar estudios mecánicos de los materiales y elementos constructivos, durante la intervención a la iglesia de Uquía, era limitada. Se contaban con datos de resistencia de mampuestos provenientes de otros proyectos de intervención y la caracterización física de los suelos constituyentes [15, 16], con lo que pudo volcarse a la bibliografía para obtener propiedades mecánicas de referencia, resumidas en la Tabla 1. La construcción de las curvas Tensión Principal vs. Deformación Principal para la MAD a tracción y compresión se realizó a partir de las tensiones límite, elasticidad y energía de fractura así definidas [10], resultando en la Gráfica 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas definidas para la MAD.

Propiedad mecánica	Valor y unidad	Referencia
Módulo de elasticidad longitudinal	100,00 MPa	[11]
Coefficiente de Poisson	0,20 MPa	[25]
Resistencia a la compresión	0,50 MPa	[11]
Resistencia a la tracción	0,05 MPa	[11]
Energía de Fractura en compresión	1,38 MPa	[26]
Energía de Fractura en tracción	0,02 MPa	[11]
Densidad de masa	1900 Kg/m ³	Propia



Gráfica 1. Curva tensión-deformación característica de la MAD homogeneizada.

Si bien el modelo de Lourenço se basa en una ley de plasticidad, mientras que el modelo de daño implementado asume un comportamiento elástico permanente, se considera que tal diferencia no cambia los resultados obtenidos de forma sustancial o, al menos, no lo hace fuera del grado de aproximación que ya se conviene válido al aplicar las demás concesiones del caso. Los estados tensionales que el material experimenta, al comparar la aplicación de una ley de daño escalar con otra de plasticidad, se diferencian en régimen de descarga. En Uquía se utilizó un análisis pseudoestático que aplicaba fuerzas distribuidas según su inercia, en un único sentido, a una estructura simple; algo que reduce en gran medida la ocurrencia de ese régimen de trabajo.

El comportamiento postcrítico de las vigas y columnas de HA presentes en los muros de la iglesia se simuló con mecanismos de rótula plástica. En los relevamientos sobre Uquía, la inspección visual sobre secciones de HA permitió confirmar su armado a la flexión, y se optó por caracterizar una rótula plástica de mínima resistencia flexional para cada barra. Luego, el programa de MEF aplicó tales rótulas sobre los nodos surgidos de la discretización de cada barra, en función de haber alcanzado su límite resistente.

3. RESULTADOS

3.1. Modelos sin marcos de HA

El comportamiento estructural de la Iglesia de la Santa Cruz y San Francisco de Paula en consideración de las fisuras relevadas, y sus consecuentes discontinuidades en la MAD, se estudió primeramente para cargas de servicio permanentes y por sobrecarga de uso. Frente a tal estado, suponer la ausencia de los marcos de HA permitió estimar las condiciones preexistentes o, al menos, remitir a lo que habría sido un análisis estructural previo a la incorporación de las vigas y columnas de HA (aun cuando quepa la posibilidad de que tal análisis no haya existido).

El análisis demostró cómo los paños de MAD formados por las grietas representaban un problema en términos de estabilidad estructural, dada la intención de considerar esfuerzos laterales (como sismo o viento) sobre la iglesia. Al simular las piezas de muro, sin un arriostramiento continuo en su coronamiento, terminaban inclinándose y rotando bajo su propio peso, producto de su irregularidad geométrica, tal como se observa en la [Figura 4](#). Las tensiones de trabajo de los materiales se mantenían en márgenes aceptables y se verificó que ninguna sección discontinua de muro se encontraba sostenida íntegramente por la estructura de HA [\[27\]](#). Sin embargo, el comportamiento anticipaba un desempeño sísmico fuertemente dependiente del sostenimiento que los marcos de HA lograsen dar a los muros de MAD, principalmente a la fachada de la iglesia.

Se realizaron análisis de la iglesia de Uquía frente a estados de cargas laterales, en sentido longitudinal y transversal de la nave principal. Dadas las condiciones de servicio ya expuestas, se optó por estudiar el comportamiento de la nave sin considerar las discontinuidades de muro producto de las grietas relevadas ([Figura 2](#)). Se trataba de una instancia constructiva sólo materializable por la remoción de los marcos de HA del interior de la MAD (caso que no ocurrió finalmente) pero que, al estudiarse, arrojó luz sobre el comportamiento de la arquitectura en eventos sísmicos, desde su materialidad y tipología estructural.

La iglesia de Uquía sometida a empujes laterales, suponiendo la inexistencia de sus marcos de HA, demostró un comportamiento comparable a otros casos de estudio con tipologías estructurales similares [\[14\]](#). Los empujes en el sentido longitudinal de la nave generan su mayor exigencia en los tímpanos (o hastiales) de los muros de fachada y contrafachada, con especial intensidad en el primero, dada su inclinación y la existencia de la entrada principal. La [Figura 5](#) resume el proceso de daño en la fachada, apreciable en los sucesivos pasos de carga del análisis pseudoestático. Se evidencia allí una faja central de relajación, donde el material ya ha agotado su resistencia máxima, y dos zonas aledañas que, para ese paso de carga específico, ya entregan las máximas tensiones admisibles para la MAD, anticipando nuevos planos de falla y posterior relajación.

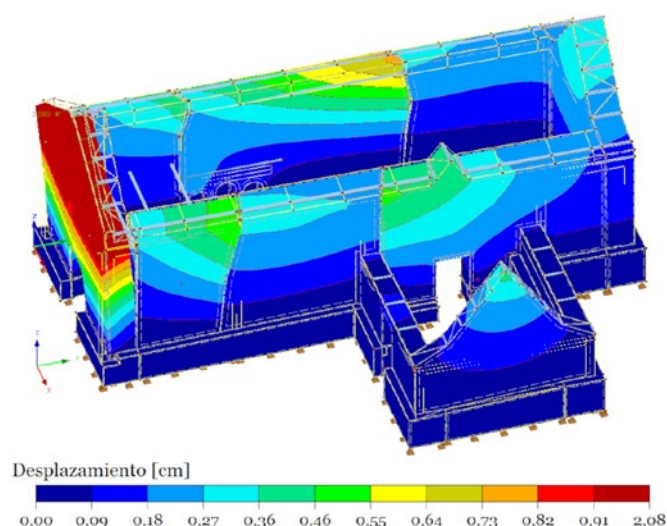


Figura 4. Desplazamientos en paños discontinuos de MAD sin arriostres en su coronamiento.

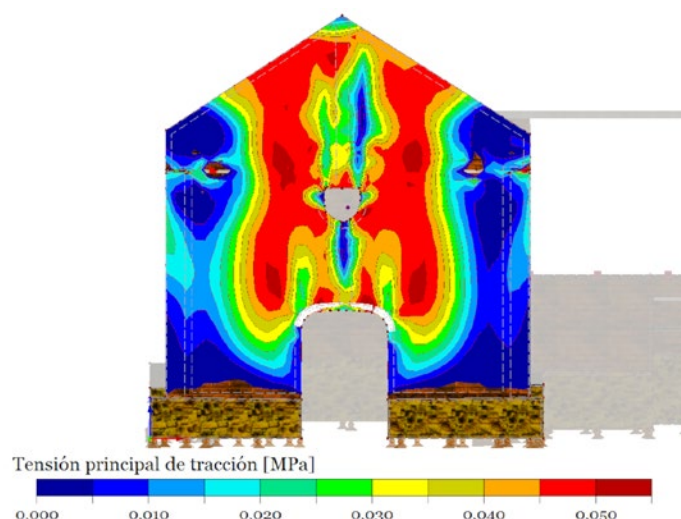


Figura 5. Fachada de Uquía ante un empuje en el sentido de la nave, suponiendo la ausencia de las piezas de HA.

Los empujes en el sentido lateral a la nave, por su parte, afectaron de forma comparable al tímpano del muro de la sacristía y generaron esfuerzos concentrados en las esquinas de la iglesia y en la sección de muro reducida por los recintos del confesionario. Si bien las propiedades mecánicas de los materiales han sido estimadas y su comportamiento simplificado, el análisis estructural se consideró valioso más allá de su carácter cualitativo, que confirmó el comportamiento esperado por la arquitectura según su tipología. La iglesia de Uquía posee una viga-collar, principal pieza de refuerzo recomendada para este tipo de construcciones ante eventos sísmicos, también un espesor de mampostería considerable y se demostró relativamente resistente a la acción sísmica. La esbeltez de sus paños de MAD y la concentración de esfuerzos en sus puntos críticos pautaban objetivos para su refuerzo que superaban la sola reparación de la integridad estructural en muros y vigas de madera. Esto, faltando aún una verificación en presencia del HA.

3.2. Modelos con marcos de HA

El siguiente paso fue estudiar la Iglesia de Uquía en consideración de sus marcos de HA, como parte integrada a la MAD (Figura 3). Ante un estado de cargas de servicio, el conjunto se muestra estable, en tanto los paños irregulares de mampostería entre grietas consiguen sustento lateral en la viga superior de HA. El recorrido de las vigas y columnas a filo de la cara exterior de los muros se definió alineando puntos (nodos) donde la rigidez de las piezas de HA colaboró con la de a la MAD, sin involucrar interfaces. Como resultado, existió una concentración de tensiones que debió interpretarse como un efecto del cómputo numérico para lograr una evaluación del comportamiento. El adobe, con menor rigidez y resistencia que el hormigón y la madera a nivel constitutivo, presentaba zonas localizadas de una supuesta falla, principalmente en los encuentros de barras, en un efecto similar al que puede observarse en la Figura 5 para la viga-collar. El esquema tensional general de la estructura mantuvo valores de tensión admisibles (algo coherente con lo observado en la realidad) y resultó compatible con lo observado ante cargas laterales.

Frente a empujes laterales en ambos sentidos, el desempeño sísmico aparente de la Iglesia de Uquía resultó insatisfactorio, al menos en los términos simplificados en los que fue planteada la simulación. A pesar de su menor rigidez a nivel constitutivo, los muros de MAD se comportaron como planos rigidizadores para la estructura de HA, forzando movimientos diferenciales de importancia entre los tramos de vigas. Este efecto llevó al desarrollo temprano de rótulas plásticas, coincidentes con las discontinuidades que significaban las grietas modeladas, en presencia de empujes laterales transversales a la nave de la iglesia. Los muros de Uquía incurrieron en un régimen de daño focalizado en su base, ante cargas que significaban un bajo desempeño. El mecanismo de colapso queda en evidencia en la Figura 7.

Se antepone la **Figura 6** (por corresponder a un paso de carga temprano) donde queda en evidencia otro comportamiento estructural relevante, vinculado a los marcos de HA. Se registraron sectores de falla a la tracción que quedaron contorneados por los ejes de los elementos de barra que representaban vigas y columnas. Este efecto es distinto al mencionado dos párrafos atrás, en tanto que la concentración de tensiones no nació desde los propios ejes, como correspondería a una alineación de puntos rígidos tomando un esfuerzo superior al de sus vecinos con deformación similar. La MAD alcanzó primero el estado de daño antedicho, focalizado en su base, sobre en la cara interior de los muros. Luego, en pasos de carga siguientes, los puntos de mayor tracción se fueron desarrollando y atravesando el interior de los muros, conforme el material cambiaba de rigidez. En la **Figura 6**, se aprecia cómo los sectores de daño se manifestaron sobre la cara externa de un muro de MAD en sectores bajo la viga superior, manteniendo distancia respecto a los ejes de los elementos de HA. Este comportamiento podría suponer un efecto cortante de los marcos de HA sobre los muros de MAD (consecuencia de su diferencia de rigidez), pero su detalle escapaba a las posibilidades de la simulación planteada, sin interfaces materiales.

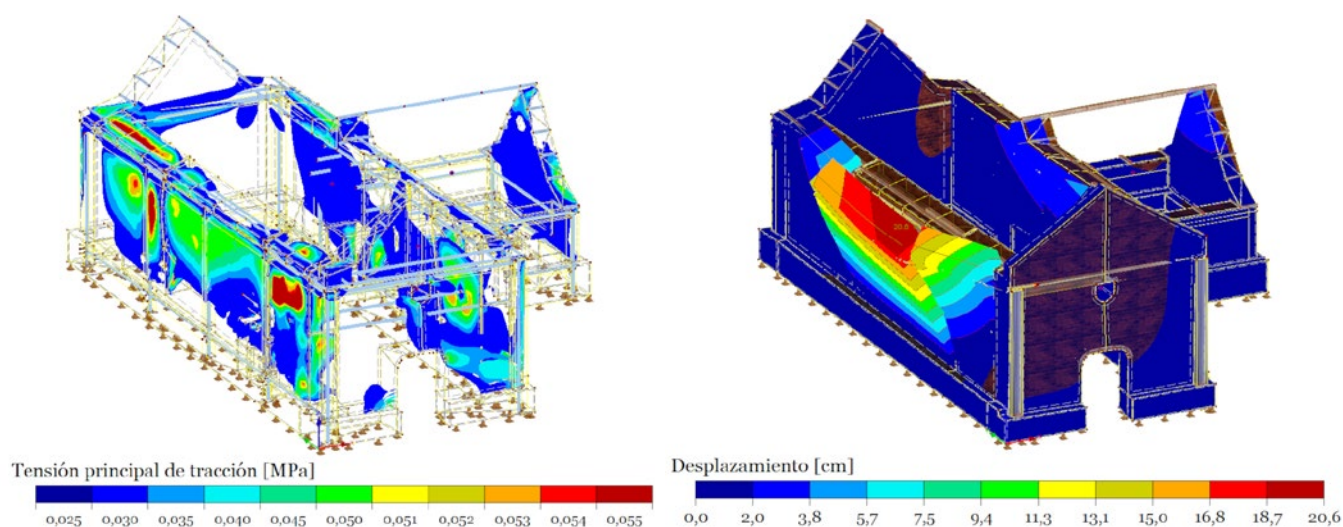


Figura 6. Envolventes de tensiones principales ante un empuje lateral en sentido transversal a la nave.

Figura 7. Desplazamientos correspondientes al último paso de carga para el cual el modelo numérico mantiene convergencia.

El desempeño sísmico de la arquitectura fue evaluado en función del desplazamiento lateral máximo obtenido a nivel de coronamiento de muros, respecto al corte basal producido sobre toda la arquitectura [14], de forma consecuente a la línea de trabajo presentada en las secciones de introducción y metodología. Los resultados obtenidos para cada sentido de empuje suponían una baja prestación sísmica por parte de la iglesia de Uquía, aún de garantizarse un trabajo solidario entre la MAD y el HA, lo que demostraba la necesidad de un mejoramiento en las condiciones de seguridad sísmica del edificio.

3.3. Modelos con propuestas de refuerzo

Una serie de intervenciones fueron planteadas bajo las metas de recuperar la integridad constructiva y garantizar un desempeño sísmico superador al que la arquitectura se mostró capaz de alcanzar en los análisis anteriores. Su diseño respondió a diferentes instancias dentro del proceso de restauración, atendiendo a principios de conservación, a la factibilidad técnico-constructiva de las propuestas y a la reproducción de soluciones ya definidas para otros casos patrimoniales, referencias para el equipo responsable. El detalle y discusión técnica de cada propuesta de refuerzo escapan al alcance de este trabajo, pero su verificación estructural fue realizada en los mismos términos que las evaluaciones ya expuestas.

Todos los diseños se hicieron considerando la permanencia de los marcos de HA en la arquitectura y la reparación de la MAD respecto a sus grietas. La eliminación de la discontinuidad de muros se pautó mediante la sustitución de mampuestos para la restitución del entramado de mampostería, junto a la inyección de una mezcla térrea en los intersticios remanentes. A su vez, se atravesaron llaves de madera semidura con anclajes de longitud superior a los sectores de reemplazo de mampostería [16].

Se diseñó una llave de madera a modo de refuerzo en la fachada y los primeros metros de sus muros laterales, funcionando como refuerzo de esquina y anclaje de las vigas-tensor destinadas al coro de la Iglesia [16]. Sus objetivos fueron el de limitar la distorsión de esquina entre muros, evitar la formación temprana de planos de falla coincidentes con la entrada principal y recintos laterales y, en suma, garantizar la vinculación y comportamiento en forma de caja. Bajo la misma perspectiva, se planteó la restitución de la viga-collar en el coronamiento de muros (a pesar de la presencia de la viga superior de HA) y se previó un refuerzo en el tímpano de la fachada [16]. El modelado de estos diseños se aprecia en el modelo de la Figura 8.

El análisis de la estructura así prevista registró un claro cambio de comportamiento, principalmente ante empujes laterales en sentido transversal a la nave, donde las grietas representaban un mayor problema. El desarrollo de tensiones críticas en la MAD, sobre las caras sin HA de los muros, siguió un esquema compatible con el vuelco lateral, formando una franja horizontal en su tramo medio y elevándose en un camino a 45° hacia las esquinas, como es apreciable en la Figura 9. Sin embargo, en las caras externas de muros, en presencia de los marcos de HA, se observó el efecto discutido en el apartado anterior, y se registró la formación de paños rectangulares bajo cada pórtico, apreciables en la Figura 10. El considerable espesor de muros en el caso de Uquía permitió observar, paso a paso, como el esquema de tensiones de la Figura 9 mutaba, al cambiar la rigidez del material, y permitía la formación de tensión crítica atravesando el interior del muro, hasta terminar condicionado por los pórticos, como en la Figura 10. Una vez más, cabe la discusión sobre la posibilidad de un efecto cortante de los marcos rígidos de HA sobre la MAD movilizada.

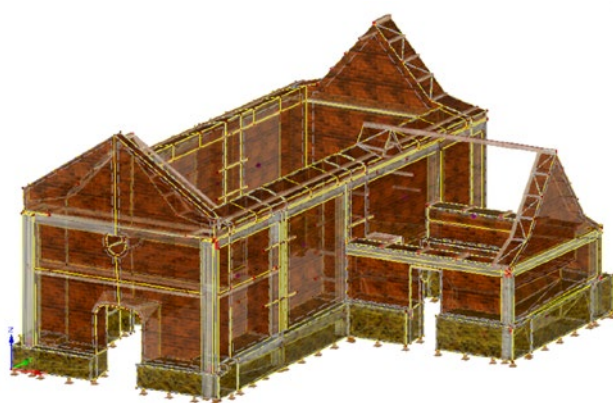


Figura 8. Modelo MEF de la iglesia de Uquía presentando su estructura integrada de HA y los refuerzos diseñados.

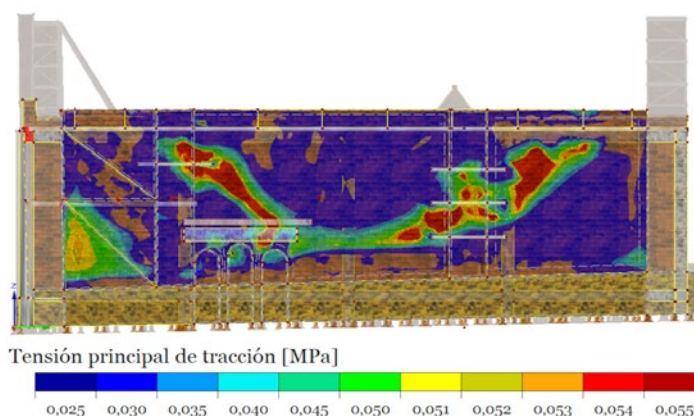


Figura 9. Envolturas de tensiones principales ante un empuje lateral en sentido transversal a la nave, cara interna del muro más desplazado.

Respecto a los empujes laterales en el sentido longitudinal a la nave de la iglesia, la fachada de Uquía aumentó su resistencia, que resultó comparable al muro de contrafachada. Habiendo cambiado las condiciones de rigidez en su tímpano, el muro registró tensiones críticas distribuidas en un sector circular (Figura 11), que al relajarse permitió tomar cargas a los encuentros de muro. No se reportó ningún efecto propio de la interacción entre el HA y la MAD, al menos en los términos simplificados en los que fue planteada la simulación. La llave de madera a media altura, por su parte, pareció funcionar acorde a su diseño, disminuyendo la formación de daño en las esquinas de la entrada principal de la iglesia.

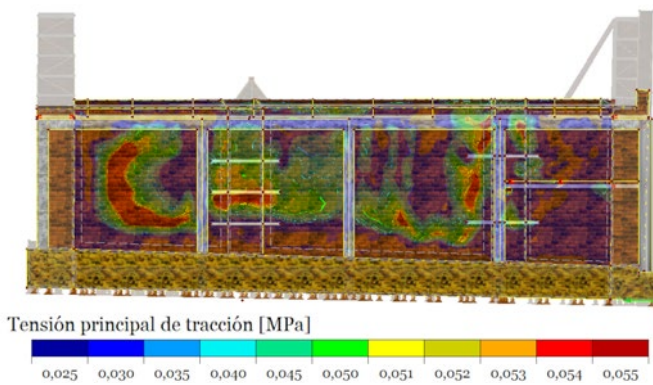


Figura 10. Envolventes de tensiones principales ante un empuje lateral en sentido transversal a la nave, cara externa del muro más desplazado.

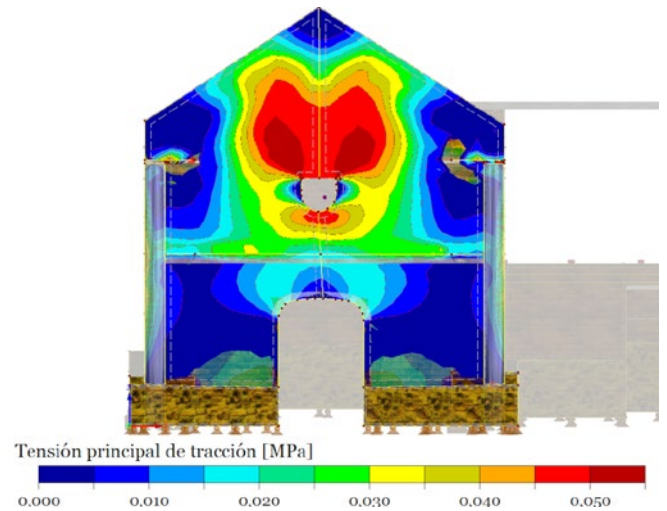
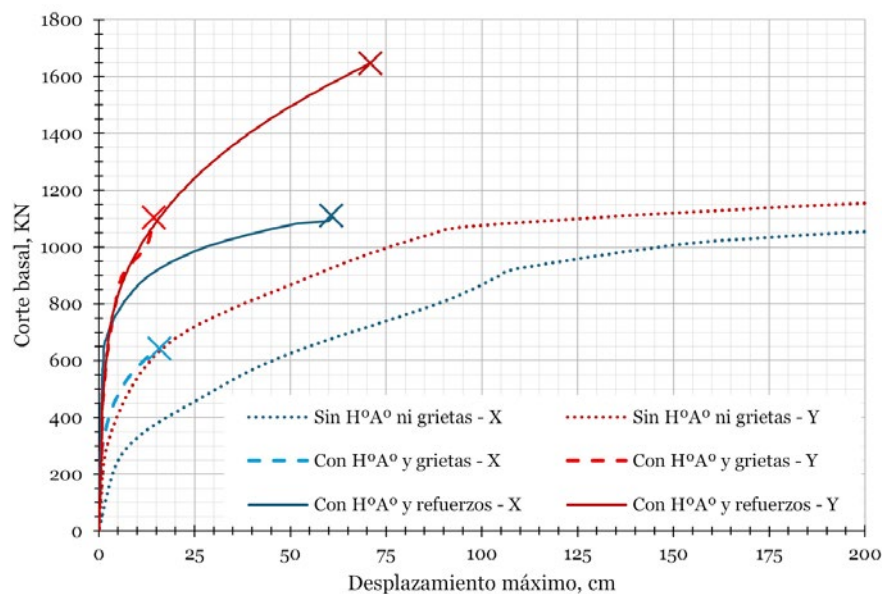


Figura 11. Fachada de Uquía ante un empuje en el sentido de la nave, en presencia de las piezas de HA y su llave de refuerzo.

Finalmente, el desempeño sísmico obtenido se grafica en la **Gráfica 2**, junto al comportamiento observado en análisis anteriores. El desempeño de la iglesia de Uquía ha mejorado ampliamente respecto al estado previo a la intervención reciente, con grietas que atravesaban los muros de MAD de la nave. El desempeño ha mejorado también respecto al ideal de una iglesia sin HA ni grietas, donde los modelos desarrollaban cortes basales de importancia a costa de desplazamientos de órdenes superiores a los demás. Si bien se podrían considerar tales desplazamientos como una variable de desempeño conceptual, refieren a deformaciones que difícilmente la construcción real podría imitar. Resulta destacable el comportamiento aparentemente rígido y frágil de los modelos que incluían HA, capaces de tomar mayor carga basal a menor desplazamiento de sus muros, pero también incapaces de desarrollar deformaciones postcríticas de importancia.



Gráfica 2. Curvas de desempeño de las simulaciones de la iglesia de Uquía en sentido transversal (X) a su nave principal y en sentido longitudinal (Y) a la misma.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo, se expusieron análisis estructurales vinculados a la intervención de la iglesia de San Francisco de Paula, en la localidad de Uquía, provincia de Jujuy, Argentina. Dadas las intervenciones realizadas, las simulaciones computacionales lograron estimar el comportamiento estructural de la construcción histórica de manera adecuada y suficiente, tanto frente a cargas de servicio como ante empujes horizontales propios de un evento sísmico. La aplicación del Método de Elementos Finitos resultó fundamental, permitiendo un análisis estructural en contemplación del comportamiento no lineal de la mampostería de adobe.

El carácter simplificado y expeditivo de los modelos realizados permitió calcular una batería completa de análisis, adaptada a las características y necesidades del proyecto. Se realizaron verificaciones sobre tres estados constructivos: un estado idealizado de la estructura, el estado surgido del relevamiento (con importantes patologías y previamente intervenido con una estructura interna de HA) y un estado que incorporó los refuerzos propuestos. Se demostró un aumento en el desempeño sísmico de la iglesia tras la restauración planteada.

Las estrategias de caracterización implementadas fueron suficientes para observar el comportamiento estructural complejo en la iglesia, estimar modos de falla y aproximar las implicancias de las grietas y piezas de hormigón armado presentes. En los modelos realizados, la lectura de la tensión principal de tracción, punto a punto y paso a paso, permitió evaluar del caso y arribar a resultados coherentes, que esclarecieron aspectos relevantes de la restauración.

Quedó en evidencia un condicionamiento ejercido por los marcos de hormigón armado sobre el conjunto estructural y sobre los muros de mampostería de adobe en que se insertan. Se registraron en los muros un desarrollo temprano y concentrado de tensiones, así como afecciones sobre el contorno y evolución, paso a paso, de sus envolventes de tensiones. Las características de los modelos utilizados pautan que el efecto surge de la diferencia relativa de rigideces entre materiales, y podrían abrir una discusión sobre las limitaciones de simulaciones como las realizadas.

En casos de estudio futuros, es posible plantear estrategias que combinen las convenciones y simplificaciones propias del análisis de construcciones históricas de mampostería de adobe, a escala macro, con ciertas definiciones estructurales de la escala micro. La simulación de una interfaz entre la mampostería de adobe y las piezas de hormigón armado podría tener resultados significativos en el comportamiento estructural global de este tipo de construcciones. Para el caso de Uquía, fue posible un tipo de lectura donde el condicionamiento de un material sobre el otro quedó expuesto y resultó interpretable.

Información complementaria ↑

Fuentes de financiación

El autor es becario doctoral por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET, Argentina). El trabajo fue realizado en el marco del proyecto “Relevamiento, Diagnóstico y Propuesta de intervención para la restauración y consolidación de la Iglesia de San Francisco de Paula”, financiado por el gobierno de la provincia de Jujuy, a través de la Coordinación de Patrimonio Material de su Secretaría de Cultura.

Material suplementario

No procede.

Disponibilidad de datos

No procede.

Agradecimientos

Al equipo del Laboratorio de Construcciones Andinas y Construcción con Tierra (LAAyCT, UNJu) del cual el autor forma parte y desde donde ha participado del servicio STAN CONICET ST3753 que dio origen a este trabajo.

Declaración de contribución de autoría

Nicolás Rodolfo Losa: Conceptualización, Análisis formal, Investigación, Metodología, Redacción.

Declaración de conflicto de intereses

El autor de este artículo declara no tener conflictos de intereses financieros, profesionales o personales que pudieran haber influido de manera inapropiada en este trabajo.

Declaración de uso de Inteligencia Artificial

No procede.

REFERENCIAS

- [1] M. Blondet, D. Torrealva Dávila, J. Vargas Neumann, J. Velasquez, and N. Tarque, "Seismic reinforcement of adobe houses," presented at the 1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 2006, pp. 1–8.
- [2] N. Tarque, E. Sayin, M. Masood Rafi, and E. L. Toles, "Behaviour of adobe construction in recent earthquakes," in *Structural Characterization and Seismic Retrofitting of Adobe Constructions: Experimental and Numerical Developments (Building Pathology and Rehabilitation)*, vol. 20, Springer Nature Switzerland, 2021, pp. 15–33. doi: 10.1007/978-3-030-74737-4_2
- [3] Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción, "Norma E.080 Diseño y Construcción con Tierra Reforzada," Reglamento Nacional de Edificaciones, Perú, 2020. Available: <https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>
- [4] B. Orta, J. Adell, R. Bustamante, and S. Martínez-Cuevas, "Sistema de autoconstrucción sismorresistente: características resistentes y proceso constructivo," *Inf. Construcción*, vol. 68, no. 542, p. e145, 2016. doi: 10.3989/ic.15.082
- [5] O. Albarracín, M. Saldivar, L. Libardi, and G. Navarta Navarro, "Reforzamiento de estructuras de adobe con mallas metálicas," in *Memorias del Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra*, no. 14, pp. 209–215, 2014. ISBN: 978-99923-880-4-4.
- [6] R. Meli, O. Hernández, and M. Padilla, "Strengthening of adobe houses for seismic actions," in *Proc. 7th World Conference on Earthquake Engineering*, no. 4, Jan. 1980.
- [7] A. San Bartolomé, D. Quiun, and L. Zegarra, "Effective system for seismic reinforcement of adobe houses," in *Proc. 13th World Conference on Earthquake Engineering*, 2004.
- [8] A. Tavares, A. Costa, and H. Varum, "Common pathologies in composite adobe and reinforced concrete constructions," *J. Perform. Constr. Facil.*, vol. 26, no. 4, Aug. 2012. doi: 10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000200
- [9] F. Parisi, D. Daudon, R. Illampas, P. B. Lourenço, and N. Tarque, "Numerical modelling of adobe structures," in *Structural Characterization and Seismic Retrofitting of Adobe Constructions: Experimental and Numerical Developments (Building Pathology and Rehabilitation)*, vol. 20, H. Varum, F. Parisi, N. Tarque, and D. Silveira, Eds. Springer Nature Switzerland, 2021, pp. 211–242. doi: 10.1007/978-3-030-74737-4_9
- [10] P. B. Lourenço, "Computational strategies for masonry construction," Delft, The Netherlands, 1996. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/1822/26547>

- [11] P. B. Lourenço and J. M. Pereira, "Seismic Retrofitting Project: Recommendations for Advanced Modeling of Historic Earthen Sites," Getty Conservation Institute; University of Minho, Los Angeles, CA; Guimarães, Portugal, 2018. Available: <https://www.getty.edu/publications-reports/item/2K7M35>
- [12] S. H. Rafsanjani, A. Bakhshi, M. A. Ghannad, M. Yekrangnia, and F. Soumi, "Predictive tri-linear benchmark curve for in-plane behavior of adobe walls," *Int. J. Archit. Herit.*, vol. 9, no. 8, Nov. 2015. doi: 10.1080/15583058.2014.899408
- [13] N. Tarque, G. Camata, H. Varum, E. Spacone, and M. Blondet, "Numerical simulation of an adobe wall under in-plane loading," *Earthquakes and Structures*, vol. 6, no. 6, Jun. 2014. doi: <https://doi.org/10.12989/eas.2014.6.6.627>
- [14] P. B. Lourenço, F. Greco, A. Barontini, M. P. Ciocchi, and G. Karanikoloudis, "Seismic Retrofitting Project: Modeling of Prototype Buildings," Getty Conservation Institute; University of Minho, Los Angeles, CA; Guimarães, Portugal, 2019. Available: <https://www.getty.edu/publications-reports/item/2K7M3J>
- [15] J. Tomasi and J. Barada, "Patrimonios coloniales y republicanos. Caracterización de sus técnicas y materialidades en la provincia de Jujuy (Argentina)," *Gremium: Revista de restauración arquitectónica*, vol. 7, no. 14, Jan. 2020. doi: 10.56039/rgn14a06
- [16] J. Tomasi and J. Barada, "Recurring damages on earthen heritage. Diagnosis and possible interventions in the highlands of Jujuy (Argentina)," *J. Build. Pathology and Rehabilitation*, vol. 5, no. 1, Jan. 2020. doi: 10.1007/s41024-020-00093-z
- [17] Instituto Nacional de Tecnología Industrial, "Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes. Parte 1: Construcciones en general", Buenos Aires, Argentina; San Juan, Argentina, Julio, 2018. Available: <https://www.inti.gob.ar/areas/servicios-industriales/construcciones-e-infraestructura/cirsoc/reglamentos>
- [18] C. I. Herr and C. G. Rolón, "Registro documento e intervención patrimonial en la arquitectura modesta construida con tierra. Los criterios implementados por la CNMMyLH durante el 1938-1946," *An. Inst. Arte Am. Investig. Estét.*, vol. 48, no. 1, Jan. 2018. Available: <http://ref.scielo.org/257fm7>
- [19] G. Viñuales, "Monumentos Nacionales de adobe y otras técnicas de tierra," *Boletín Informativo de la Comisión Nacional de Monumentos*, vol. 2011, pp. 21–29, 2011.
- [20] J. L. Giner-Robles, M. A. Rodríguez-Pascua, P. G. Silva, and R. Pérez-López, "Efectos sísmicos en yacimientos arqueológicos: catalogación y cuantificación arqueosismológica," *Bol. Geol. Min.*, vol. 129, no. 1/2, pp. 451–467, 2018. doi: <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.129.1.018>
- [21] P. B. Lourenço, J. M. Pereira, and D. Torrealva Dávila, "Seismic Retrofitting Project: Simplified Calculations for the Structural Analysis of Earthen Historic Sites," Getty Conservation Institute; University of Minho, Los Angeles, CA; Guimarães, Portugal, 2021. Available: <https://www.getty.edu/publications-reports/item/2K7M3M>
- [22] J. Mazars, "A description of micro-and macroscale damage of concrete structures," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 25, no. 5-6, 1986.
- [23] D. Butuc, A. De Falco, C. Resta, N. Squeglia, and L. Vignali, "A novel FE model for the Tower of Pisa," in *Proc. 9th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Athens, Greece, 2023, pp. 2452–2464. doi: <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.129.1.018>
- [24] A. De Falco, M. Mori, and G. Sevieri, "Mazars' damage model for masonry structures: a case study of a church in Italy," presented at the COMSOL Conference 2018, Lausanne, Oct. 2018.
- [25] M. Dhanasekar, P. W. Kleeman, and A. W. Page, "Biaxial Stress-Strain relations for brick masonry," *J. Struct. Eng.*, vol. 111, no. 5, Jan. 1985.
- [26] A. Zucchini and P. B. Lourenço, "A micro-mechanical homogenisation model for masonry: Application to shear walls," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 46, no. 3-4, Feb. 2009. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2008.09.034
- [27] N. R. Losa, "Análisis estructural de construcciones históricas de adobe. Aplicación del método de elementos finitos en casos de estudio, Jujuy, Argentina," in *Memorias del Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra*, no. 20, pp. 39–50, 2022. ISBN 978-959-294-263-9