

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE CONSTRUCCIONES HISTÓRICAS DE ADOBE. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EN CASOS DE ESTUDIO, JUJUY, ARGENTINA

Nicolás Rodolfo Losa

CONICET | Laboratorio de Arquitecturas Andinas y Construcción con Tierra, Universidad Nacional de Jujuy, Tilcara, Argentina, nlosa@kusch.unju.edu.ar

Palabras clave: diseño de intervención estructural, refuerzo sísmico, preservación de patrimonio arquitectónico

Resumen

La técnica del adobe se utiliza en las prácticas constructivas de forma habitual y variada, pero las alternativas para abordar su análisis estructural son relativamente escasas. En consonancia con líneas de investigación desarrolladas por distintas instituciones, este trabajo se propone abordar el Método de Elementos Finitos (MEF) como herramienta para dicho análisis. Se presentan tres casos de estudio, emplazados en la provincia de Jujuy (Argentina) donde se diseñó la intervención de edificios patrimoniales, construidos en mampostería de adobe, con requerimientos de refuerzo sísmico y atención de patologías. El artículo presenta sus distintas aproximaciones desde el MEF como apoyo para las tareas de campo y de diseño en tales proyectos, las cuales evolucionaron conforme los proyectos progresaban y el conocimiento sobre los edificios crecía. Concretamente, se realizaron análisis sísmicos dinámicos con elementos de placas, para luego implementar simulaciones estáticas y elementos sólidos según las necesidades y prioridades dadas en cada caso: el cabildo de San Salvador de Jujuy, la “Casa del Marqués” de Yavi, y la iglesia de Uquía. Las simulaciones realizadas permitieron establecer prioridades y pautas para el diseño de mejoras estructurales en cada intervención, poniendo en evidencia riesgos de índole sísmico, relevantes durante la toma de decisiones referidas a la aplicación de refuerzos, y se esclarecieron las implicancias de irregularidades y patologías constructivas.

1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de diseñar soluciones estructurales al intervenir patrimonios construidos con tierra puede significar un desafío, en tanto muchos de los métodos tradicionalmente empleados en la ingeniería no logran captar las complejidades materiales de técnicas como el adobe (Webster, 2008). Más aún, los métodos que sí logran adoptar estas complejidades suelen hacerlo en base a aplicaciones contrapuestas, a veces, a la concepción y evolución de los proyectos que los demandan. Esto debido a que pueden involucrarse actividades de tipo comunitarias, políticas e historiográficas, que implican tiempos y dinámicas cambiantes a la hora de construir el conocimiento sobre el edificio y la forma de su intervención (Correira, 2007).

Se hace necesaria, entonces, una aproximación al estudio estructural de estos edificios que resulte expeditiva frente a los factores externos al cálculo ingenieril y que, sin descuidar los aspectos internos del mismo y su objetivo de lograr seguridad constructiva, pueda adaptarse y acompañar las diferentes actividades y etapas dentro de los proyectos de intervención (Lourenço; Pereira, 2018).

1.1 Objetivo

El presente trabajo presenta al método de elementos finitos (MEF) como alternativa para dicha aproximación. Se establecen convenciones en base a líneas de investigación anteriores para la aplicación del método computacional y, luego, el artículo se propone estudiar sus alcances y limitaciones. En tal sentido, se exponen los resultados concretos a los que se ha arribado en tres casos de estudio, desarrollando para cada uno una estrategia metodológica adaptada a sus particularidades.

En todos los casos, una aplicación progresiva de las simulaciones por MEF (desde la simplicidad más expeditiva, hasta la rigurosidad convencionalmente aceptada para su aplicación final) permite analizar los requerimientos de aplicarlo como herramienta en cada proyecto, así como sus aportes (Lourenço; Pereira, 2018).

1.2 Casos de estudio

Los tres casos presentados a continuación contemplan casi toda la latitud territorial de la provincia de Jujuy, en el noroeste argentino, así como una amplia variedad metodológica y herramientas proyectuales. El presente trabajo se enmarca en los proyectos que el Laboratorio de Arquitecturas Andinas y Construcción con Tierra de la Universidad Nacional de Jujuy (LAAyCT, UNJu) ha llevado adelante para el estudio e intervención del patrimonio edificado en la provincia. Los métodos inherentes al análisis estructural (y resultados correspondientes) se detallan en las secciones 3 a 5 del trabajo, donde pueden apreciarse también figuras con sus modelos tridimensionales.

a) Cabildo¹ de San Salvador de Jujuy

El primer edificio público de la capital provincial, otrora sede del gobierno colonial a nivel regional. Actualmente funciona en manos del cuerpo policial provincial y a lo largo de su historia ha incorporado habitaciones de materiales diversos, pero el proyecto que motiva su intervención se enfoca en la sección más antigua de la construcción² (Tomasi; Barada, 2020a).

Se trata de una planta en forma de “L” de aproximadamente 65 m de lado, conformada por habitaciones sucesivas, que a su vez cierran un patio interno en su esquina. Su sistema constructivo principal es la mampostería de adobe, con muros que van del orden de los 60 cm a los 140 cm de espesor. Como es común en un cabildo, cuenta con una galería exterior. Ésta enfrenta la plaza principal de la ciudad y, tras ella, un recinto gana una altura aproximada de 10,3 m para conformar una torre, único cuerpo de planta alta en la estructura actual (Tomasi; Barada, 2020a).

El proyecto que motivó el análisis estructural para el caso contempla la refuncionalización del espacio como un museo, siendo el equipo de LAAyCT convocado como asesores en la factibilidad del proyecto y redacción del pliego técnico correspondiente (Tomasi; Barada, 2019). Con ese objetivo, fue necesario examinar el riesgo sísmico del edificio desde su morfología y sistema constructivo, procurando dar información para la obra pública en lo referido a: vulnerabilidad sísmica general, refuerzo de la torre, sostén de la galería (intervenida en un proyecto por separado) e implicancia de la apertura de vanos.

b) “Casa del Marqués”, localidad de Yavi

Se trata de una construcción doméstica de gran escala, acorde a su función colonial como cabecera del marquesado de Tojo. La casa ha sufrido distintos períodos de uso y abandono desde su declaración como Monumento Histórico Nacional (MHN) y posterior expropiación; y actualmente funciona como museo (Tomasi; Barada, 2020b).

Posee una planta de desarrollo prácticamente cuadrado, de 41 m de lado, formada por habitaciones rectangulares interconexas en torno a un amplio patio central. Tiene muros de mampostería de adobe que van del orden de los 50 cm a los 100 cm de espesor; a excepción de un grupo de contrafuertes dispuestos en la contrafachada, con espesor superior a los 110 cm. Previo a su intervención, la estructura mostraba signos patológicos de fisuración en ciertas aberturas y encuentros de muro; y problemas relacionados con el

¹ Cabildo: gobierno colonial instituido por el reino español, en una determinada región, para su administración. Se identifica con el mismo nombre a los edificios que servían de sede a alguno de estos gobiernos, que suelen poseer una arquitectura distintiva (Bellingeri, 2001).

² La sección más antigua en pie; puesto a que un evento sísmico motivó la reforma del edificio en 1863, luego de lo cual su desarrollo conserva una única planta baja.

desagüe de techos e intervenciones eclécticas que se fueron dando en tiempos y materiales diversos (Tomasi; Barada, 2020b).

El proyecto que motivó el análisis estructural del caso contempla la restauración de la construcción, atendiendo a las patologías y problemas existentes (Tomasi; Barada, 2018a). Para ello, fue necesario estudiar las patologías relevadas por el equipo no sólo desde su gravedad constructiva, sino también desde su implicancia estructural. Lo mismo para piezas estructurales que la construcción original no poseía, pero fueron incorporadas en intervenciones anteriores, como ocurrió con un encadenado de hormigón armado revelado tras inspecciones a la mampostería.

c) Iglesia de la Santa Cruz y San Francisco de Paula, localidad de Uquía

Uno de los edificios de culto más reconocidos del territorio y MHN desde 1941. Su construcción data del siglo XVII y en su historia ha recibido diversas intervenciones (Tomasi; Barada, 2020b). De ellas, la última ha sido finalizada recientemente y estuvo vinculada a un proyecto de restauración y consolidación para el que el equipo del LAAyCT brindó consultoría especializada (Tomasi; Barada, 2018b).

Se trata de una nave de 17,5 m por 7,2 m de planta, que posee una altura aproximada de 8,2 m y a la cual se adosa lateralmente un recinto de menores dimensiones, funcional como sacristía. El predio de la construcción incluye una torre campanario de base cuadrada, con unos 4 m de lado por 10 m de altura. Todo el conjunto, incluyendo la torre, está construido en mampostería de adobe de 100 cm de espesor (Tomasi; Barada, 2020a).

El proyecto ya mencionado contempló la reparación integral de la iglesia en lo respectivo a sus muros y cubiertas, como así también la incorporación de refuerzos sísmicos (drizado y viga collar) y constructivos (ante patologías de fisuración y discontinuidades). En este trabajo se muestran algunos de los análisis estructurales realizados con tales fines.

2 MARCO TEÓRICO

Antes de continuar con el desarrollo de los análisis estructurales, su evolución y resultados, es necesario definir brevemente la base conceptual del MEF. Este trabajo no busca presentar todos los detalles vinculados al tema, pero se propone brindar un conocimiento básico sobre las características y entidades involucradas en las simulaciones computacionales. De tal forma, serán comprensibles los resultados arribados con posterioridad, haciendo factible su discusión.

2.1 El método

En primera medida, debe reconocerse al MEF desde dos enfoques: el método como herramienta de ingeniería aplicada y el método como teoría matemática estricta. El primer enfoque está vinculado al medio que nos rodea y su demanda por obtener soluciones a problemas concretos. El segundo está vinculado al rigor de los resultados arribados: a la certeza matemática de que se tratan, en menor o mayor grado, de una aproximación a la solución real del problema, en toda su complejidad (Calderón; Gallo, 2011). Los análisis estructurales mecánicos (como los presentados en las secciones 3 a 5) se basan en principios energéticos³ ampliamente estudiados, por lo que queda validado que la representatividad de sus resultados dependerá de los datos suministrados al cálculo (y no de su operación matemática interna).

Dicho esto, se vuelve válida una analogía muy sencilla: los *Elementos Finitos*⁴ son partes discretas de una estructura continua que se analiza mecánicamente con un comportamiento físico determinado. El *Método* es el procedimiento en el que se realiza la discretización que

³ El *Principio de los Trabajos Virtuales* es una teoría de cálculo estructural hiperestático, en la cual se trabaja iterativamente la variación energética de deformación interna de un punto, para un cambio infinitesimal, hasta alcanzar el equilibrio con las fuentes de trabajo externo.

⁴ De aquí en adelante: "elementos".

los origina (Zienkiewicz et al., 2013). Aplicándolo, un problema mecánico complejo, que sólo se solucionaría por manipulación matemática humana, puede sustituirse por miles de operaciones sencillas que un ordenador trabaje numéricamente.

Dichas operaciones, surgen de ecuaciones asociadas a los puntos geoméricamente compartidos entre los elementos, llamados *Nodos*. A través de ellos, la información estructural cambia y se transmite, permitiendo a la computadora a cargo del cálculo alcanzar una solución al problema, cuando encuentra un equilibrio entre todas las partes del conjunto.

2.2 Comportamiento del material

Repasando lo antedicho en un contexto de aplicación, es necesario establecer comportamientos materiales claros dentro de la estructura, dividir la misma en partes afines al fenómeno que se quiere estudiar y considerar un volumen de información numérica adecuado a la exigencia matemática que suponga dicho fenómeno. Si se programara un comportamiento físico en extremo complejo, con elementos que no contemplen ninguna simplificación respecto a una sección de la estructura real y con la máxima cantidad de nodos admisible; entonces poca sería la facilidad de cálculo adquirida. Si se recurriría al extremo contrario, entonces lo que resultaría insuficiente sería la aproximación que la simulación computacional pueda tener con el comportamiento estructural real.

Simular el comportamiento de un sistema de mampostería, por ejemplo, bien podría significar modelarlo en toda su escala, mampuesto por mampuesto y junta por junta. Sin embargo, existen técnicas de homogenización que permiten traducir el comportamiento del sistema en un modelo constitutivo del continuo, recurriendo a estrategias como, por ejemplo, el uso de la mecánica de fracturas para caracterizar la falla típica de las unidades compuestas de mampostería (Lourenço, 1996).

Líneas de trabajo como la del Getty Conservation Institute y su *Proyecto de Estabilización Sismorresistente* siguen esta estrategia, pautando además algunas propiedades físicas correspondientes para materiales históricos como el adobe (Lourenço; Pereira, 2018). Si bien se trata de aplicaciones concretas para casos particulares (Lourenço et al., 2020); antecedentes de tales características son necesarios en el uso del MEF como herramienta para el análisis estructural, dada la dificultad que muchas veces se presenta para obtener datos técnicos desde el campo.

En las secciones 3 a 5 se presentan aproximaciones que, con criterios propios a cada caso, también apuntan a la realización de verificaciones estructurales en base a modelos representativos de la realidad, pero con un grado de simplificación suficiente y acorde a la aplicación práctica de dichas verificaciones en sus proyectos de intervención.

2.3 Tipos de análisis

Por otro lado, también se hace relevante en el método la forma en que los esfuerzos considerados sobre la estructura son aplicados. Debe pensarse a la mampostería de adobe como una materialidad que degrada sus propiedades a medida que se fisura y pierde conexión entre sus componentes. Por lo tanto, un análisis no-lineal es requerido para considerar a cada instante un cambio de comportamiento. Para edificios de altura relativamente baja como en los casos de estudio, los efectos dinámicos de tipo ariete pueden despreciarse; y un análisis de tipo estático o *Pushover* se vuelve la opción más adecuada (FEMA 440, 2005).

Sin embargo, los análisis de este tipo requieren una cantidad de recursos considerable y deben ser encarados con objetivos concretos en mente (Deierlein et al., 2010). La programación de los modelos requeridos, con elementos geoméricamente complejos y gran número de nodos, resulta problemática a la hora de introducir cambios como los que ocurren a medida que el conocimiento sobre una construcción crece o cambia.

Considérese también la presencia de refuerzos distribuidos en la mampostería dedicados a resistir a los esfuerzos de tracción. Entonces, el comportamiento ortótropo y no-lineal del

material pierde relevancia (Lourenço, 2008). Aun cuando tal no es, normalmente, el estado de un edificio a intervenir, puede constituir su estado final. Por ello y por lo expresado en el párrafo anterior, no queda descartado del todo el uso de análisis lineales dinámicos.

En las aproximaciones desarrolladas en las secciones 3 a 5, los análisis estructurales fueron “evolucionando” conforme el estado del proyecto, su obra, los tiempos organizativos y los trabajos comunitarios avanzaban. De esta manera, además de adaptar los cambios necesarios respecto al caso de estudio, se fueron implementado los cambios propios del análisis, para alcanzar los objetivos de los proyectos con rigurosidad creciente.

3 CABILDO DE SAN SALVADOR DE JUJUY

3.1 Metodología

Como mencionó, en este caso se asistió al equipo de LAAyCT en la elaboración del pliego técnico para obra pública, a partir de un proyecto de intervención con pautas que, en principio, eran primordialmente arquitectónicas y funcionales. A su vez, su estudio se daba en paralelo a la ejecución del proyecto de intervención sobre la galería. En tal sentido, el análisis estructural estuvo circunscripto a una condición estructural concreta: la reducción del riesgo sísmico sin el uso de contrafuertes que afecten la circulación.

Un análisis más detallado tuvo que hacerse en el caso de la torre. Debía proponerse una solución para el recinto de 7 m por 6,20 m de base, 10,3 m de altura y espesor de muros de 1 m; que contemple múltiples aberturas de paso, la ocupación por parte de personal administrativo y la influencia de la galería exterior de 2,75 m de luz.

Los parámetros para la exigencia de los esfuerzos estructurales siguieron las líneas reglamentarias de CIRSOC 101 (2005) y CIRSOC-INPRES 103-I (2013)⁵. Los parámetros resistentes del adobe se obtuvieron gracias a ensayos mecánicos realizados por el Laboratorio de Materiales y Elementos de Edificios (LEME) de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad Nacional de Tucumán. Tales valores, correspondientes a unidades aisladas de mampuestos, fueron transformados en propiedades físicas correspondientes a las paredes de mampostería que representan, siguiendo los criterios nombrados en la sección anterior. El primer modelo estructural simulado con sendas características puede observarse, en su versión final, en la figura 1.

Ese primer análisis por MEF se programó utilizando elementos de placa, de forma que el modelo poseía sus principales nodos en la posición relativa a los centros de cada muro, situados en los encuentros entre ellos y marcando el contorno de los vanos. Se forzó al material a mantenerse en un régimen elástico lineal y con ello un análisis dinámico de la estructura completa fue factible.

Tras resultados parciales (detallados más adelante) y el consecuente ajuste en las pautas de diseño e intervención, un segundo tipo de análisis por MEF fue requerido para verificar los refuerzos previstos en la torre. Aislar el cuerpo requirió un trabajo computacional iterativo en el que se programaron resortes que igualen, para un modelo por separado de la torre, la resistencia a la deformación traslacional que significaba el resto de la estructura. Lo propio debió hacerse para suministrar al modelo esfuerzos que reemplacen la acción inercial de la masa aladaña ante las aceleraciones sísmicas.

La torre fue simulada en un análisis estático no-lineal, siguiendo las mismas pautas que se dan para el diseño sísmico de edificios por desempeño (Lourenço; Pereira, 2018; FEMA 440, 2005; Aguiar, 2003). Para hacerlo, elementos de tipo sólido fueron utilizados, con un tamaño que permitió la subdivisión del espesor de muro en cinco partes.

⁵ Principalmente en lo referido al análisis elástico lineal realizado, que se explica en párrafos siguientes. El reglamento estipula un espectro de pseudo-aceleraciones en función de la estructura y su implantación territorial; permitiendo el diseño de un sismo del que provengan los esfuerzos últimos a resistir por el edificio.

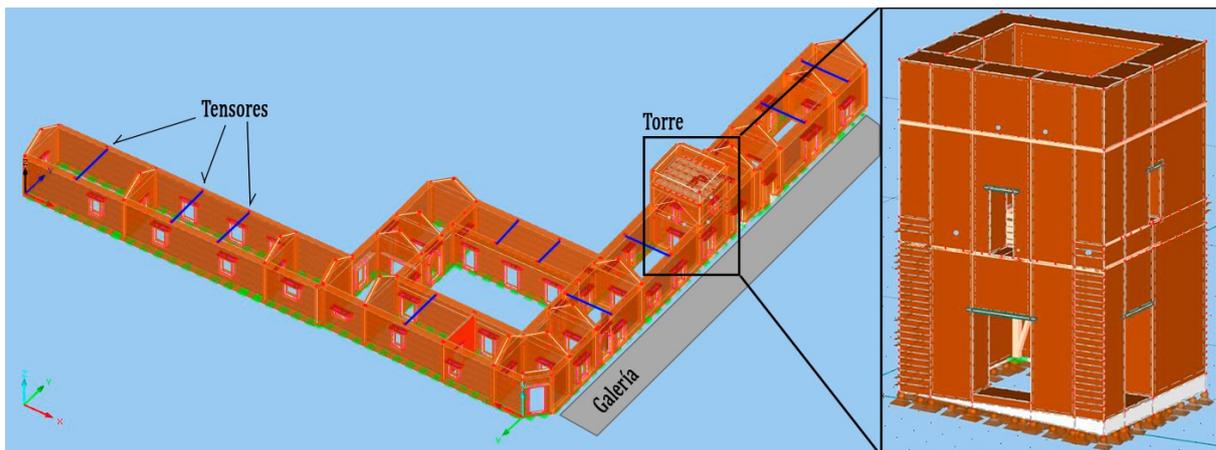


Figura 1. Modelo de placas del Cabildo de San Salvador de Jujuy (programa: RFEM v5.19)

3.2 Resultados

Los primeros análisis, dinámicos lineales, brindaron pautas sobre la vulnerabilidad del edificio respecto a factores conocidos en la temática: irregularidad de planta, extensión de muros sin arriostre transversal, y un cuerpo saliente en planta alta. Considérese que esos modelos se programaron con elementos de placa. Eso significa que la vinculación entre muros y el comportamiento desarrollado en su espesor se calcularon como proyecciones estáticas de los esfuerzos transmitidos al centro de cada pared (que es la posición donde se encontraban los nodos utilizados para analizar la información). Se sabe de antemano, entonces, que el comportamiento simulado dista fundamentalmente del real respecto a su rigidez, además de los modelos constitutivos considerados lineales.

Sin embargo, aunque la simulación no brinde resultados con rigor cuantitativo, sí lo hace con un significado cualitativo de buen grado, motivado por el fundamento matemático que sostiene al método. Un modelo así no funciona entonces como una herramienta analítica de diseño, sino como un mapa conceptual para la aplicación de diseños con base empírica. En esta clave deben leerse los resultados arribados en este y los siguientes casos de estudio.

Para el cabildo, el primer tipo de análisis permitió evaluar sucesivamente cambios en las aperturas propuestas de vanos, factibilidad de alternativas con motivos estético-funcionales y, principalmente, un criterio en la incorporación de sostenes laterales para el coronamiento de muros. La rapidez de adopción de las propuestas y los cambios notorios de comportamiento dentro de la simulación, permitieron pautar el desarrollo final de la planta y la posición de tensores metálicos, ya anticipado en la figura 1. Esta solución permite que, ante un evento sísmico, las vigas-collar de muros enfrentados puedan trabajar de mejor manera (Guillaud et al., 2008).

También, desde este primer análisis, se diseñó el refuerzo de la torre y se estimó su verificación mediante un segundo análisis, más riguroso. El equipo de LAAYCT propuso una estructura independiente de madera contenida dentro del recinto, de dos niveles, de forma que absorba una temida distorsión entre los coronamientos de muro en ambas plantas. Un drizado fue propuesto para mantener la integridad de muros, restando verificar la forma en que los muros fisurarán perdiendo continuidad. Así, el resultado parcial de un análisis es insumo de otro, en la medida que se pauta un objetivo.

Los resultados finales fueron verificados con la metodología antedicha (figura 2). El análisis estático permitió aproximar en mejor medida el comportamiento real del material; y poseer elementos distribuidos en el espesor de los muros (con nodos que transmiten información sobre su equilibrio interno) brindó los resultados sobre tensiones y esfuerzos que antes debieron desestimarse. Ante el empuje basal, la estructura alcanza el equilibrio en valores

de deformación admisibles, manteniendo tensiones adecuadas en las piezas de madera que la refuerzan y sin incurrir en el desprendimiento completo de los muros de adobe⁶.

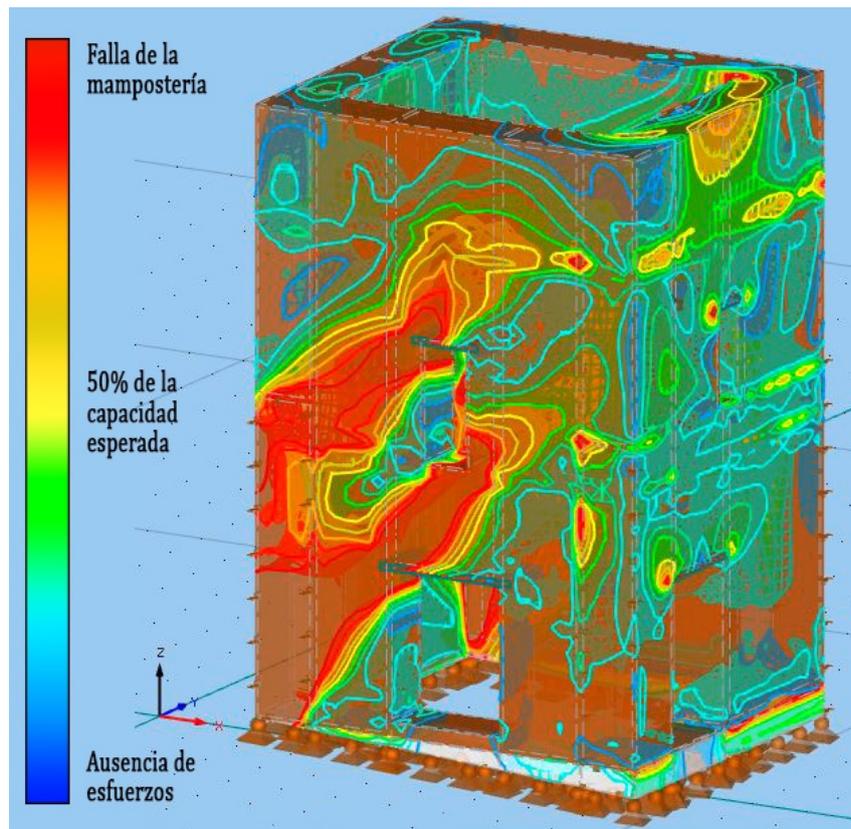


Figura 2. Modelo sólido de la torre del Cabildo de S.S. de Jujuy (programa: RFEM v5.19)

4 "CASA DEL MARQUÉS", LOCALIDAD DE YAVI

4.1 Metodología

Primeramente, los modelos computacionales de la vivienda se realizaron con elementos de placa (figura 3). Esfuerzos de índole sísmica y servicio se programaron siguiendo la misma línea reglamentaria que la mencionada en el caso anterior. En "Casa del Marqués" las propiedades del material eran desconocidas y la logística para procurar un ensayo mecánico cerca de la localidad muy compleja; por lo que esos datos fueron adoptados desde la bibliografía ya citada, en virtud de su base empírica.

El proyecto de restauración motivó una metodología de estas características, en tanto las primeras etapas de trabajo estuvieron caracterizadas por el relevamiento progresivo que el equipo de LAAyCT realizó de la construcción (a medida que las alas del museo que se emplaza en la Casa eran desocupadas y habilitadas para la intervención en revoques). El análisis estructural fue incorporando así cambios en vinculaciones de muro, en su verticalidad, presencia de fisuraciones, piezas de hormigón armado incorporadas a muros y sectores de mampostería afectados por la humedad (Tomasi; Barada, 2020b). La forma de simular estas patologías fue variada, pero en términos de las entidades mencionadas en este trabajo pueden explicarse con una metodología común: Se discrimina un sector o desarrollo longitudinal dentro de un muro, se le incorporan nodos, y se conforma entre ellos un elemento de propiedades diferentes (más rígido y pesado para el caso del hormigón armado; un adobe más débil y deformable sobre una línea de fisuración, etc.).

⁶ Esta conclusión se arriba al visualizar el desarrollo de fisuras y material degradado en las zonas que se marcan en la Figura 2 con color rojo. Allí, el material ha alcanzado el criterio de falla y ofrece resistencia mínima al empuje. Como se observa, este fenómeno no genera una envolvente.

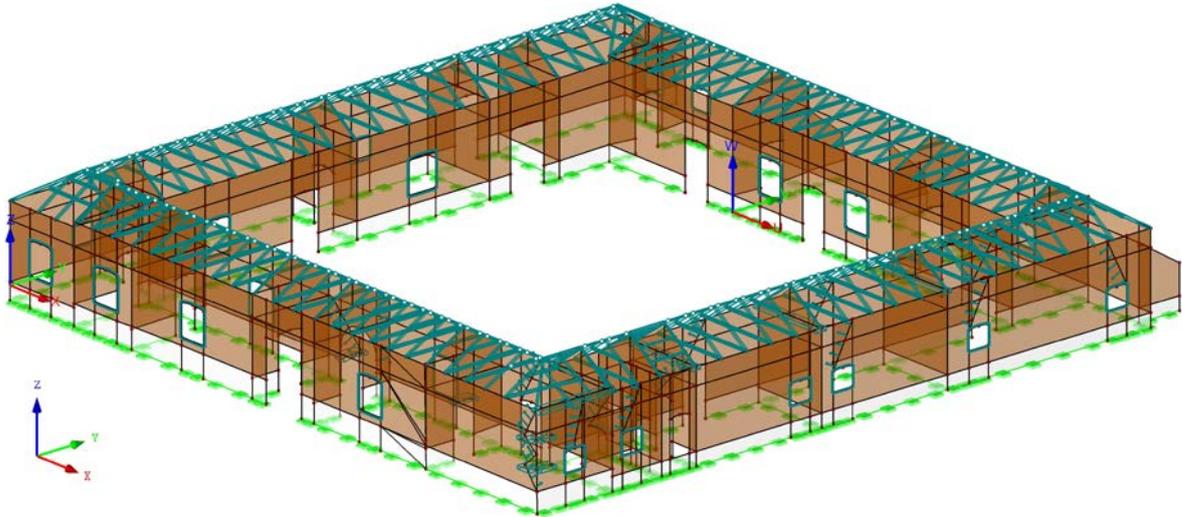


Figura 3. Modelo de placas de "Casa del Marqués", localidad de Yavi (programa: RFEM v5.19)

Se realizaron análisis elásticos lineales bajo consideraciones similares al del caso anterior, con el objetivo de determinar tanto el riesgo sísmico, como la importancia estructural de cada patología e irregularidad constructiva encontrada.

Eventualmente, se hizo observable una pieza de encadenado de hormigón armado que coronaba los muros de los recintos la casa (Tomasí; Barada, 2020b). Para su estudio fue necesario un análisis de mayor rigor en términos físicos⁷, puesto a que debía determinarse si su presencia podía reemplazar una de las piezas de refuerzo proyectadas o si, por el contrario, su resistencia podía considerarse insuficiente y hacer necesaria su remoción.

Para ello, se efectuó un análisis dinámico elástico lineal de un tramo localizado de muro. Allí se estudió si tal régimen era el correspondiente a la pieza de hormigón armado ante esfuerzos sísmicos, o sea, si la misma no incurría más allá de su resistencia, sin rotulación. Para hacerlo, se implementaron elementos sólidos a los efectos de visualizar un desarrollo interno de tensiones, y las mismas consideraciones hechas en el caso anterior para aislar la pieza del resto de la estructura.

4.2 Resultados

Como se deduce de lo desarrollado en la metodología, los resultados parciales de los análisis estructurales generales representaron una amplia variedad de expresiones, y cada uno podría validar una discusión por sí mismo. Por ello, el trabajo expone sólo el estudio sobre el tramo de encadenado programado (el más exigido, acorde a los análisis sísmicos previos). Su estado final se observa en la figura 4.

Concretamente, lo que puede observarse es el resultado de dos análisis consecutivos. Ante una primera simulación, la pieza de hormigón armado demostró (en las dos secciones marcadas de la figura 4) esfuerzos superiores a la resistencia esperada por los hierros que habían sido relevados en su interior. Siendo esos los únicos puntos donde las tensiones se desarrollaban, se realizó un segundo análisis contemplando las secciones como rotuladas. Las isobandas de tensiones presentes en la figura 4 marcan en color rojo el límite resistente considerado para el adobe, claramente alcanzado bajo las rótulas.

⁷ Recordar que los datos del comportamiento material eran desconocidos; a falta de poder brindar una representatividad completa se realizaron pruebas de sensibilidad de las propiedades mecánicas involucradas.

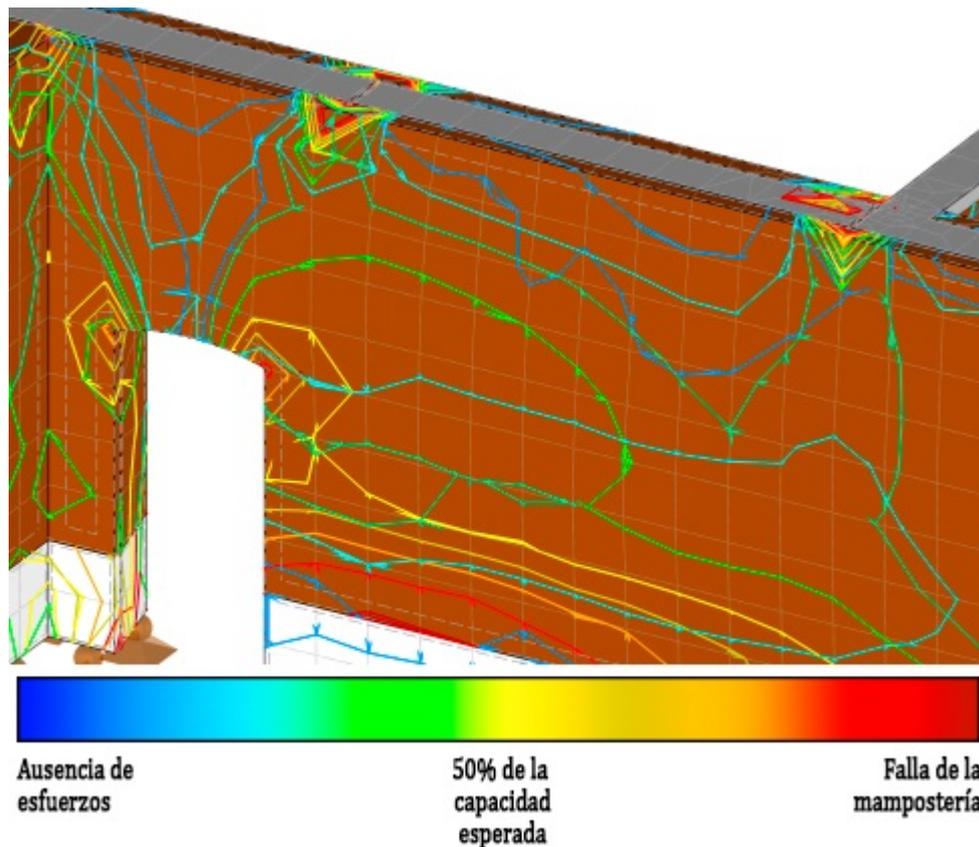


Figura 4. Modelo sólido de un encadenado de hormigón armado en "Casa del Marqués" (programa: RFEM v5.19)

Así queda expuesta la pauta de que la pieza resultaba problemática en el servicio de la estructura. Ante una eventual (y probable) fisuración del hormigón, la rigidez superior que el mismo posee en comparación al adobe se convierte en un problema: los tramos de viga se mueven en torno a una articulación que afecta gravemente a los mampuestos de sus inmediaciones. Esta aproximación desde el MEF permitió una decisión concreta de intervención, que fue la de remover el encadenado y reemplazarlo por una viga collar de madera.

5 IGLESIA DE LA SANTA CRUZ Y SAN FRANCISCO DE PAULA, LOCALIDAD DE UQUÍA

5.1 Metodología

La restauración tuvo, como en los casos anteriores, la necesidad de múltiples estudios estructurales respecto a diferentes cuestiones constructivas y de seguridad. En la figura 5 se aprecia uno de los modelos programados a tal fin, en donde pueden observarse fisuras de profundidad pasante que afectaban a los muros laterales en las inmediaciones de la fachada. Estas fisuras fueron descubiertas durante las tareas de relevamiento. A diferencia de lo que transmite el modelo, el edificio cuenta con una estructura de hormigón armado en el interior de sus muros, también descubierta luego de avanzados los trabajos, que se encuentra presente en todos los recintos (Tomasi; Barada, 2020b).

Dejando de lado la compleja interacción de este sistema de pórticos y sólidos, este trabajo expone el estado más primitivo del análisis, para el cual el objetivo era definir la importancia del esqueleto de hormigón en la seguridad estructural. Concretamente, se buscaba definir si alguno de los paños de muro se encontraba sostenido íntegramente por los pórticos anexos a la nave, ante las dudas sobre como continuar el avance de obra.

Se rescata esta experiencia porque, a diferencia de los casos anteriores, ningún atajo era adecuado a pesar de la necesidad de ser expeditivo. Con las pautas de carga y propiedades materiales antes nombradas, se programó un modelo de elementos sólidos que refleje en el mejor grado posible la geometría de cada paño discontinuo. Se evaluó su comportamiento ante estados últimos de peso propio sin considerar la estructura de hormigón armado brindando su sostén. Se consideró un régimen elástico, entendiendo que de sobrepasarse su límite resistente entonces la mampostería de adobe habría de sostenerse apoyada en los pórticos.

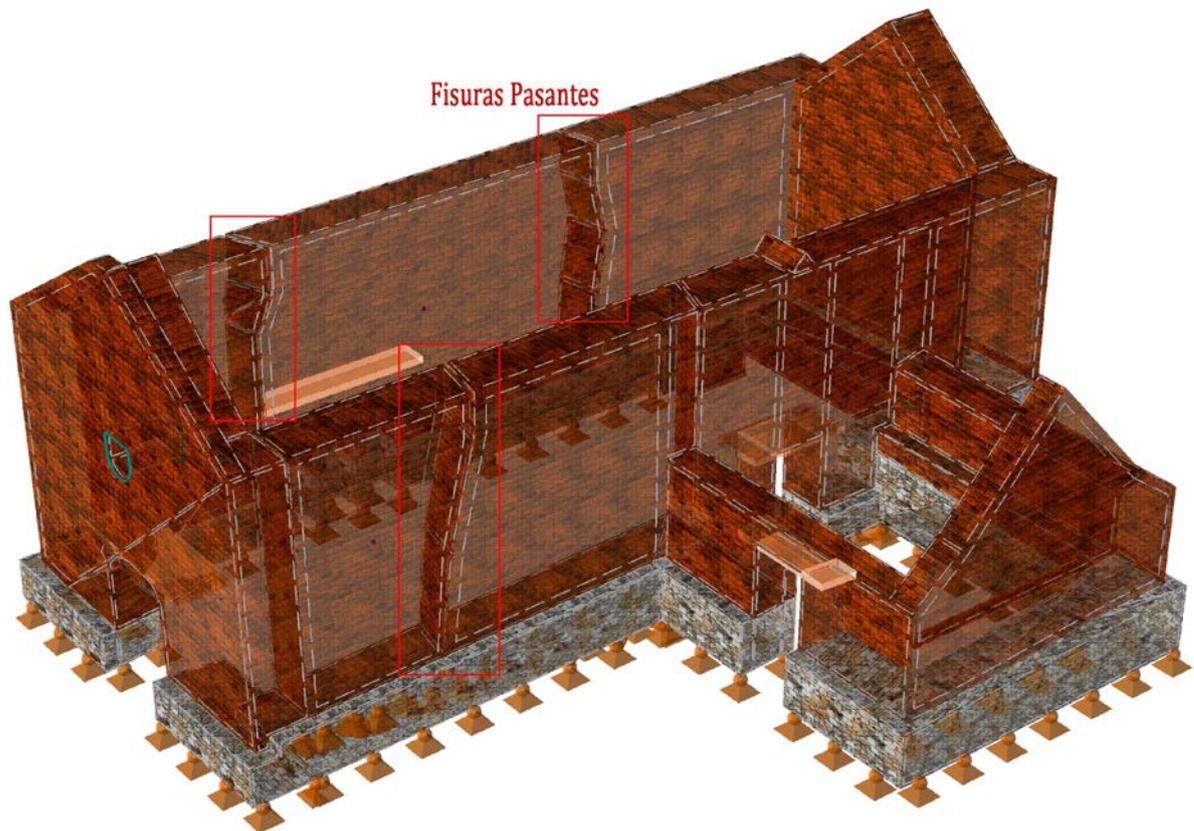


Figura 5. Modelo sólido de la iglesia de Uquía en presencia de fisuras (programa: RFEM v5.19)

5.2 Resultados

El análisis permitió concluir el sostenimiento por medios propios de todas las secciones de muro bajo la tranquilidad de haber simulado con detalle su desarrollo de tensiones interno. En la figura 6 pueden apreciarse las deformaciones de algunos de los bloques. En particular, el lateral con su comportamiento de alaveo resultaba relevante, a causa de su forma de péndulo invertido.

Queda pendiente en el presente trabajo, sin embargo, un análisis del origen de las fisuraciones. Mediante un estudio de sensibilidad que consideró la afectación de los cimientos por pérdida de rigidez y por falta de sustento se observó que el comportamiento es válido para un asentamiento diferencial del muro de fachada. Tal estudio ha de completarse con evaluaciones sobre la extensión real de tal asentamiento, si lo hubiere, y su efecto sobre los paños de muro ya simulados.

La fachada, por su lado, motivó análisis posteriores, en presencia del sistema de refuerzo de hormigón armado, que permitieron esclarecer el orden de tensiones que el sistema mantiene en servicio estático.

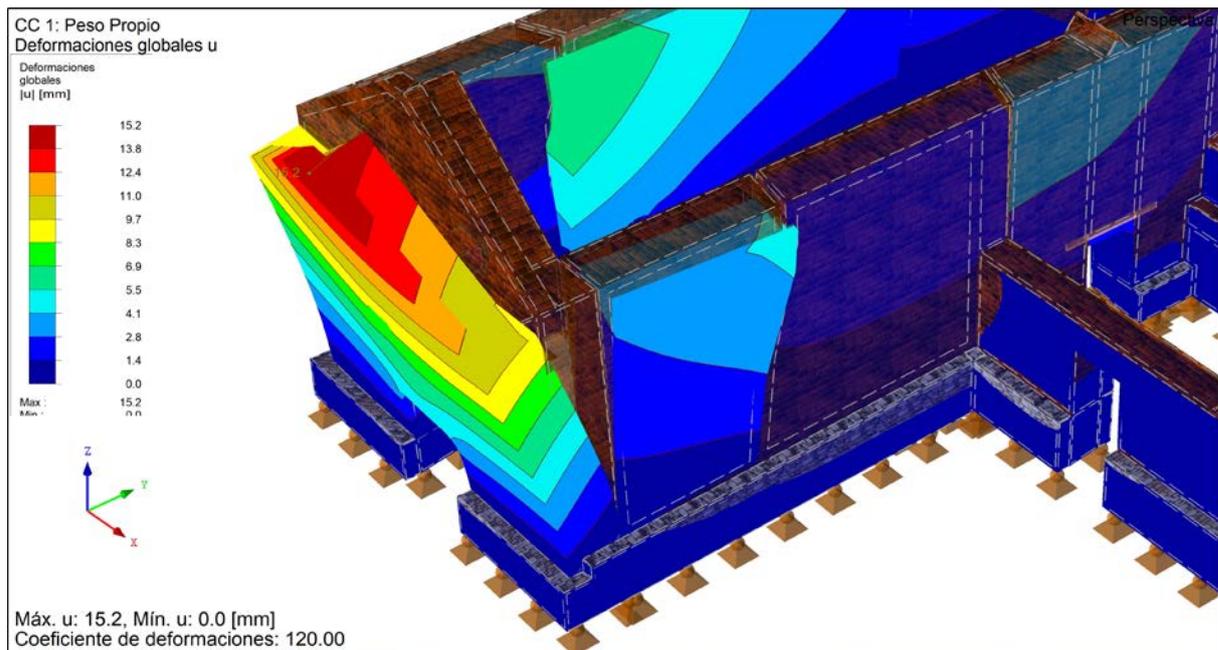


Figura 6. Deformaciones en muros discontinuos, iglesia de Uquía (programa: RFEM v5.19)

6 CONSIDERACIONES FINALES

En el presente trabajo se expusieron tres casos de estudio, para intervenciones sobre construcciones en mampostería de adobe, en los que una diversidad de análisis estructurales fue requerida. Se presentó al MEF como herramienta para generar dichos análisis, buscando exponer sus alcances y limitaciones desde lo teórico y lo práctico.

Como resumen de los resultados obtenidos, las simulaciones realizadas permitieron establecer prioridades y pautas para el diseño de mejoras estructurales en cada proyecto intervención: se dejaron en evidencia riesgos de índole sísmico, relevantes durante la toma de decisiones referidas a la aplicación de refuerzos; y se esclarecieron las implicancias de irregularidades y patologías constructivas, evidentes conforme avanzaban las obras.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar Falconí, R. (2003). Análisis sísmico por desempeño. Quito: Editorial de la Escuela Politécnica del Ejército.
- Bellingeri, M. (2001). Dinámicas de antiguo régimen y orden constitucional: representación, justicia y administración en Iberoamérica, siglos XVIII y XIX. Turín: Otto, Nova Americana, 2000.
- Calderón, G.; Gallo, R. (2011). Introducción al método de los elementos finitos: un enfoque matemático. Caracas: Escuela Venezolana de Matemáticas.
- CIRSOC 101 (2005). Reglamento argentino de cargas permanentes y sobrecargas mínimas de diseño para edificios y otras estructuras. Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial.
- CIRSOC-INPRES 103-I (2013). Reglamento argentino para construcciones sismorresistentes. Parte I: Construcciones en general. Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial; Instituto Nacional de Prevención Sísmica.
- Correira, M. (2007). Teoría de la conservación y su aplicación al patrimonio en tierra. Apuntes: Revista de estudios sobre patrimonio cultural – Journal of cultural heritage studies, vol. 20, nro. 2. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Deierlein, G.; Reinhorn, A.; Willford, M. (2010). Nonlinear structural analysis for seismic design. NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 4. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology.

FEMA 440 (2005). Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures. USA: Applied Technology Council.

Guillaud, H.; Graz, C.; Correia, M.; Mileto, C.; Vegas, F. (2008). Terra incognita. Preserving European Earthen Architecture. Bruselas: Culture Lab Editions y Editora Argumentum.

Lourenço, P. (1996). Computational strategies for masonry structures. Tesis de doctorado. Países Bajos: Delft University of Technology.

Lourenço, P. (2008). Structural masonry analysis: recent developments and prospects. Australia: University of Newcastle

Lourenço, P.; Pereira, J. (2018). Seismic Retrofitting Project: Recommendations for advanced modeling of historic earthen sites. Los Angeles: Getty Conservation Institute; Guimarães: TecMinho – University of Minho.

Lourenço, P.; Greco, F.; Barontini, A.; Ciocci, M.; Karanikoloudis, G. (2019). Seismic Retrofitting Project: Modeling of Prototype Buildings. Los Angeles: Getty Conservation Institute; Guimarães: TecMinho – University of Minho.

Tomasi, J.; Barada, J. (2018). Diagnóstico, propuesta de intervención y fortalecimiento de saberes locales, para la puesta en valor de la Casa del Marques (Yavi, provincia de Jujuy). STAN CONICET ST3753. Disponible en <http://www.conicet.gov.ar/>.

Tomasi, J.; Barada, J. (2018). Relevamiento, diagnóstico y propuesta de intervención para la restauración y consolidación de la Iglesia de San Francisco de Paula (Uquía, provincia de Jujuy). STAN CONICET ST3753. Disponible en <http://www.conicet.gov.ar/>.

Tomasi, J.; Barada, J. (2019). Desarrollo de los pliegos para la restauración de la mampostería de adobe en el edificio del Cabildo de Jujuy. STAN CONICET ST3753. Disponible en <http://www.conicet.gov.ar/>.

Tomasi, J.; Barada, J. (2020). Patrimonios coloniales y republicanos. Caracterización de sus técnicas y materialidades en la provincia de Jujuy (Argentina). Gremium: Revista de restauración arquitectónica, vol. 7, nro. 14. México: Editorial Restauro.

Tomasi, J.; Barada, J. (2020). Recurring damages on earthen heritage. Diagnosis and possible interventions in the highlands of Jujuy (Argentina). Journal of Building Pathology and Rehabilitation, vol. 5, nro. 1. Suiza: Springer.

Zienkiewicz, O.; Taylor, R.; Zhu, J. (2013). The finite element method: its basis and fundamentals. Oxford: Elsevier.

Webster, F. (2008). Earthen Structures: Assessing Seismic Damage, Performance, and Interventions. In: Avrami, E.; Guillaud, H.; Hardy, M. (2008). Terra Literature Review: An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation. Los Angeles: Getty Conservation Institute. p. 69-79.

AUTORES

Nicolás Rodolfo Losa, ingeniero civil; profesor del Departamento de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional (FRSF UTN); becario doctoral de ingeniería mención industrial por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET); miembro del Laboratorio de Arquitecturas Andinas y Construcción con Tierra (LAAyCT, UNJu; Tilcara); miembro de la Red Argentina PROTIERRA.