

Avances en la aplicabilidad del Método de Elementos Finitos para el análisis estructural de construcciones de adobe en la provincia de Jujuy.

Advances on the Finite Elements Method applicability for the structural analysis of adobe buildings on the Jujuy province.

Presentación: 4 y 5 de Octubre de 2022

Doctorando:

Nicolás Losa

Laboratorio de Arquitecturas Andinas y Construcción con Tierra, Universidad Nacional de Jujuy – Argentina
Centro de Investigación en Métodos Computacionales, Universidad Nacional del Litoral / CONICET – Argentina
nlosa@kusch.unju.edu.ar

Director:

Jorge Tomasi

Codirector:

Pablo Sánchez

Resumen

La mampostería de adobe es una técnica constructiva tradicional que se mantiene vigente en zonas sísmicamente activas de la Argentina, como lo es el Noroeste Argentino. Su presencia en gran parte del patrimonio construido de dicha región, y su rol primordial en la edificación urbana actual, ameritan el estudio de herramientas para su correcto análisis estructural, en la búsqueda de diseñar respuestas eficientes al riesgo sísmico subyacente. Este trabajo presenta una implementación metodológica, basada en un trabajo conjunto entre relevamiento de campo y tareas de gabinete, que busca aplicar el Método de Elementos Finitos como herramienta de análisis estructural en el distrito de Tilcara, provincia de Jujuy.

Palabras clave: Mampostería de Adobe, Análisis Estructural, Método de Elementos Finitos, Refuerzo estructural.

Abstract

Adobe masonry is a traditional construction technique which remains in use in seismically active zones of Argentina, such as the Argentinian Norwest region. Its presence in large part of the built heritage of said region, and its fundamental role in current urban construction, motives the study of tools for its correct structural analysis, in the search for designing efficient responses to underlying seismic risks. This article presents a methodological implementation, based on a joint work between field surveys and office tasks, which seeks to apply the Finite Element Method as a structural analysis tool in the Tilcara's district, province of Jujuy.

Keywords: Adobe Masonry, Structural Analysis, Finite Elements Method, Structural Reinforcement.

Introducción

Actualmente, la construcción con mampostería de adobe se reproduce de una manera limitada territorialmente. Su debilidad estructural ante eventos sísmicos se encuentra ampliamente estudiada; y se adjudica la misma a la incapacidad del sistema de tomar esfuerzos de tracción y en su plastificación temprana (Oliveira et al., 2021). Existe, por ello, un rechazo formal de la tecnología que (junto a los antecedentes de eventos sísmicos en el país¹) sostiene la prohibición de su uso en las áreas sísmicamente más activas de la Argentina. Consecuencia de esto, la mampostería de adobe se encuentra excluida como una alternativa expresa en los reglamentos de diseño y verificación estructural, que no brindan un marco técnico específico a su uso en proyectos de ingeniería (INPRES-CIRSOC 103-III, 2018). Paradójicamente, la mampostería de adobe encuentra su mayor representación en las regiones de mayor nivel sísmico del país.

En el Noroeste Argentino (NOA), los Monumentos Históricos Nacionales (MHN) construidos con distintas técnicas de tierra representan el 69% del total (Herr y Rolón, 2018). En relación a las viviendas, los departamentos de la Quebrada de Humahuaca y la Puna de Jujuy presentan una incidencia de la construcción con adobe que supera el 80% según el censo nacional de población del 2001². Las estrategias prohibicionistas no han limitado el uso de esta técnica y, lejos de mermar a causa de su eventual reemplazo por alternativas industrializadas, incorpora estas últimas en complejos sistemas modernos. Al no existir una reglamentación técnica que regule la práctica, es habitual que sus usuarios y constructores recurran a refuerzos cuyo diseño no necesariamente da una respuesta eficiente a la problemática estructural subyacente. De tal manera, a la tarea de brindar mantenimiento y seguridad a los MHN antes nombrados, se suma la problemática de una población en estado de vulnerabilidad sísmica. Incluso los proyectos de intervención formales (como los que se plantean para trabajar sobre MHN) suelen remitirse a casos internacionales de referencia, que exponen soluciones concretas, sin involucrar pautas de diseño sistemáticamente adaptadas al contexto nacional. Se define, entonces, la necesidad de una metodología de mantenimiento y refuerzo estructural para la mampostería de adobe, que permita diseñar soluciones coherentes y compatibles, válida tanto para la escala de los MHN como para la construcción urbana en situación de riesgo.

En este contexto, desde el año 2020 se gesta una investigación que motiva el presente trabajo, titulada “*Análisis estructural de edificios de mampostería de adobe y diseño de intervenciones estructurales sismorresistentes en las tierras altas de la provincia de Jujuy. Estudio en base al trabajo de campo y la aplicación del método de elementos finitos (MEF)*”. Como su nombre lo indica, busca plantear las bases para la metodología antedicha, aplicando el MEF como principal herramienta en la evaluación estructural de soluciones propuestas. A continuación, se desarrollan algunos aspectos del avance sobre dicho objetivo, a fin demostrar que tal aplicación resulta posible, con enfoque territorial en el departamento de Tilcara y la Quebrada de Humahuaca; una zona sísmica de nivel 2 (INPRES-CIRSOC 103-I, 2018).

Desarrollo

La aplicación de métodos numéricos a la mampostería de adobe resulta compleja, para cualquier escala de dominio estructural. Las principales causas son la heterogeneidad del material componente del sistema, la dependencia al confinamiento de las propiedades mecánicas del mismo, la ortotropía propia de las matrices de mampostería y un claro comportamiento no-lineal de éstas últimas (Parisi et al., 2021). De las diversas estrategias de modelado material, destacan aquellas que se basan en técnicas de homogeneización por MEF, por su comprobado ahorro computacional en la simulación de grandes estructuras (Lourenço, 1996). No obstante, la complejidad de su caracterización mecánica persiste, aun en la simplificación computacional.

Por ello, debe formar parte de la aplicación buscada un estudio sistemático, tanto de la mampostería de adobe como de su interacción con otros sistemas constructivos. Es requerido observar y registrar la naturaleza de los edificios susceptibles de recibir refuerzo estructural y el comportamiento mecánico de sus materiales (a través de protocolos de ensayo) antes de,

¹ San Juan 1944, Salta 1948 y Caucete 1977, por nombrar los eventos sísmicos más recientes que han devastado las construcciones de adobe a su alcance.

² El citado, es el último censo nacional donde se indagó en la materialidad de los muros predominantes en viviendas.

finalmente, simularlos de manera adecuada. En tal sentido, el desarrollo de este trabajo se divide en dos líneas de acción concretas: Por un lado, el trabajo de campo, dedicado al relevamiento del estado de arte actual de la construcción con adobe; y por otro, el trabajo de gabinete, dedicado a definir una estrategia computacional acorde al objetivo buscado, de entre todas las que ofrece el progreso científico actual. Nótese que el trabajo de laboratorio se encuentra excluido del desarrollo, en tanto resulta indispensable resolver primero qué materiales estudiar (en base a su presencia constructiva) y cómo (las propiedades concretas que demande la estrategia computacional escogida).

El trabajo de campo se ha propuesto, en primera medida, identificar las características relevantes de las edificaciones y sus sistemas tradicionales, tanto en el caso de construcciones domésticas como de aquellas con valoración patrimonial. En segunda medida, definir interacciones concretas entre esos sistemas tradicionales y aquellos que hayan evolucionado a partir de materiales industrializados. Y en tercera medida, caracterizar las patologías constructivas observables en las construcciones, tanto desde su origen como en su gravedad respecto a la seguridad y servicio estructural. Cubrir estos tres aspectos es necesario para asegurar una aplicación eficaz del método.

Para alcanzar tal propuesta, se fijó una metodología de visitas de relevamiento preliminar al departamento de Tilcara, provincia de Jujuy, Argentina. Se operó una valoración de los casos urbanos observados en relación a su potencial aporte de conocimiento a la investigación; y se diseñó un fichaje categórico para aquellos que ameriten su registro. Para seleccionar la información de relevancia, se optó por documentar aquella que permitiría un correcto mantenimiento y trabajo de conservación en construcciones patrimoniales, desde las premisas del control de deterioros activos y distorsiones estructurales (Rainer, 2008). Esto ameritó mantener un registro de aquellos síntomas presentes de fisuración, humedad, biodeterioro y praxis anómala.

De forma paralela, el trabajo de campo incorporó también casos patrimoniales, desde los cuales se reunió información sobre la técnica tradicional de la mampostería de adobe, sus características históricas y su encuentro con intervenciones modernas. Concretamente, pueden nombrarse tres casos enmarcados en distintos proyectos que el Laboratorio de Arquitecturas Andinas y Construcción con Tierra de la Universidad Nacional de Jujuy (LAAyCT UNJu) llevó adelante para el estudio e intervención del patrimonio edificado en su provincia. El Cabildo de San Salvador de Jujuy, siendo el equipo de LAAyCT convocado como asesores en la factibilidad de un proyecto de refuncionalización y la redacción del correspondiente pliego técnico (Tomasi y Barada, 2019). La “Casa del Marqués”, en la localidad de Yavi, donde se sigue un proyecto de restauración, atendiendo a patologías y problemas existentes (Tomasi y Barada, 2018a). La Iglesia de la Santa Cruz y San Francisco de Paula, en la localidad de Uquía, en un proyecto de restauración y consolidación estructural-constructiva para el que el equipo del LAAyCT brindó consultoría especializada (Tomasi y Barada, 2018b).

El trabajo de gabinete, por otro lado, no está abocado a seguir una metodología concreta, sino que se propone definirla en la medida de lo requerido. Se continúan elaborando modelos, necesarios en las tareas de análisis estructural de mampostería de adobe, pero desde diferentes expresiones del MEF. La propuesta última es formalizar un proceso de análisis para diseño de refuerzos estructurales, tras el estudio de tales alternativas.

Tal propuesta es indispensable, en tanto los métodos clásicos del análisis estructural adquieren mucha dificultad para modelar el complejo comportamiento material de técnicas como el adobe. Métodos numéricos como el MEF, que son fácilmente adaptables a dichas complejidades, no siempre son capaces de acompañar la génesis y desarrollo de los proyectos que los convocan. El conocimiento sobre edificios ya construidos (en especial los patrimoniales) y sobre la operatoria detrás de su intervención constructiva cambian constantemente, conforme avanzan tareas multi-sectoriales (Correira, 2007). Tal dinámica es contrapuesta al rigor que requiere un estudio estructural sofisticado (Lourenço y Pereira, 2018). Superar este escollo se vuelve, entonces, necesario para asegurar una aplicación eficaz del método.

Por tal motivo, para los tres casos de estudio antedichos, se realizó una aproximación al análisis estructural de forma expeditiva, procurando simultáneamente: flexibilidad metodológica, frente a los factores externos al cálculo involucrado; y

objetivos de seguridad y desempeño concretos, en simulaciones cuya representatividad es convencionalmente aceptada. Para los casos de escala urbana, por otro lado, se comenzó un estudio en función de la información recopilada en el relevamiento, con la premisa de implementar un desarrollo similar.

Resultados

Respecto al trabajo de campo a escala urbana, se han realizado hasta el momento cuatro campañas de relevamiento en el departamento de Tilcara. Como resultado, casi la totalidad de las construcciones de índole doméstico en localidad homónima fueron observadas. Se seleccionó allí una población de 36 casos, de los cuales 26 continúan hoy bajo estudio, por los aspectos constructivos que ofrecen y su relevancia en la investigación. La distribución de los mismos se observa en la figura 1, y responde a la cultura constructiva de cada barrio en los que se implantan, según la relevancia que significan.

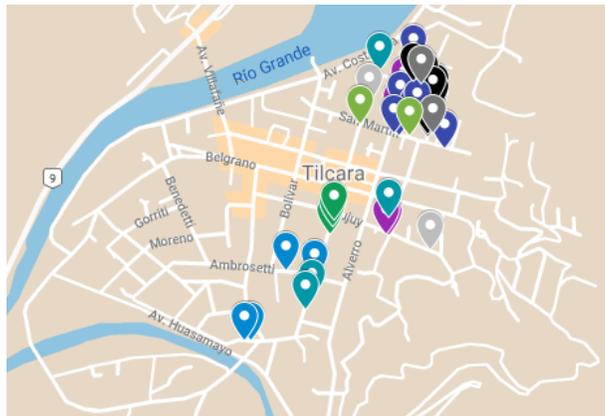


Figura 1: Casos de estudio en escala urbana, localidad de Tilcara.

Tuvo lugar un fichaje sistemático de cada caso. Se documentaron sus condiciones de implantación urbana, retiros de parcela, desniveles topográficos y artificiales, relación constructiva con linderos, pendiente natural, situaciones de entorno respecto a la ladera, cuerpos en elevación y desagüe de montaña. Se registraron también las configuraciones materiales de cada local observable, junto a indicaciones de su nivel de mantenimiento, presencia de refuerzos y evidencias de ampliaciones. De dichas configuraciones materiales, se relevó concretamente la materialidad de muros, detalle del tipo de juntas en mampuestos, tipo de cubierta, presencia de sobrecimientos y revoques. Siempre que fue posible, se detallaron en dimensiones, materiales y tecnología todos los mampuestos y piezas estructurales presentes (Dinteles, encadenados, vigas, columnas, etc.).

De manera conjunta, se documentaron debidamente las patologías presentes. Se distinguieron aquellas que provenían de una praxis constructiva anómala, asociadas tanto a sistemas como a instalaciones, aquellas que se identificaban como problemas de humedad, aquellas que podían asociarse a fisuraciones por esfuerzos mecánicos y aquellas que podían asociarse a discontinuidades y desvinculaciones. Para cada una, se registró su orden de magnitud en tamaño y gravedad, un mapeo de su ubicación en cada tipología constructiva y un primer diagnóstico de su origen. Se estableció así un punto de partida temporal para su observación, su evolución temprana y un primer paso en la caracterización de patologías constructivas recurrentes.

El volumen de información recopilado y la relativa accesibilidad para su registro demuestran que son alcanzables las premisas iniciales. De hecho, en relación al trabajo de gabinete, el relevamiento permitió establecer tipologías estructurales novedosas respecto de los antecedentes, correspondientes a mampostería de adobe tradicional. Se constató una amplia presencia de hormigón armado, siendo el material que la población escoge para los refuerzos que incluye en sus construcciones. Actualmente, se estudia el impacto de estos sistemas modernos en las estrategias clásicas de simulación por MEF.

Respecto al trabajo de campo a escala patrimonial, debe considerarse que se trata de complejas construcciones de grandes dimensiones, que han sido estudiadas al detalle en el marco de sus proyectos de intervención. Como factor común, se registró la

presencia de intervenciones estructurales modernas que también incluyeron el hormigón armado (Tomasi y Barada, 2020a), con relaciones estructurales eclécticas entre materiales que se sumaban a las patologías constructivas, relevadas muchas veces durante el transcurso de las tareas (Tomasi y Barada, 2020b). Debe considerarse, no obstante, que tal dinámica en los procesos de estudio de los edificios era esperada. Existen pautas para el análisis estructural de patrimonios, convenidas en el ámbito internacional, que incluyen la aplicación del MEF (Lourenço et al., 2018), pero los ejemplos de su aplicación en el ámbito nacional resultan escasos y ninguno incluía las características particulares de los proyectos realizados.

Igualmente, el trabajo de gabinete a escala patrimonial permitió establecer prioridades y pautas para el diseño de mejoras estructurales en cada proyecto intervención. Se implementó en cada caso una estrategia de simulaciones sucesivas, que combinaban un salto de escala, desde el comportamiento general al detalle de un componente o sector, con un aumento en la rigurosidad mecánica del comportamiento estructural (Losa, 2022). Con ello, se dieron pautas del desempeño sísmico de las construcciones, en consideración de las irregularidades y patologías presentes, necesarias para el diseño de las intervenciones de refuerzo. La figura 2 resume ese proceso de análisis para uno de los casos.

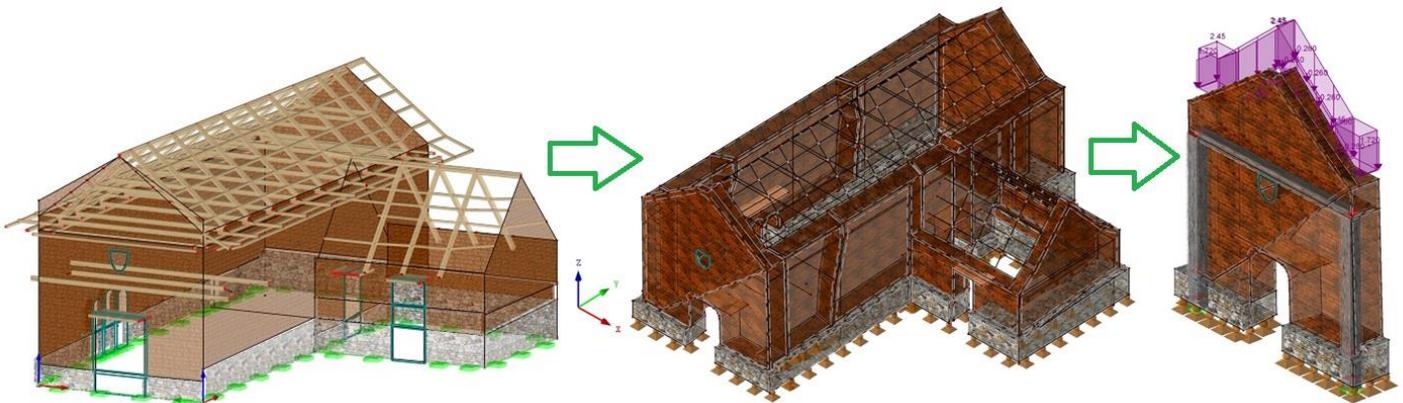


Figura 2: Aplicación efectiva del MEF al análisis estructural de la Iglesia de Uquía.

Conclusiones

En el presente trabajo se introdujo una problemática actual que se registra en el NOA y, en particular, en la Quebrada de Humahuaca en la provincia de Jujuy. Ante la misma, resulta necesario asistir a proyectos de ingeniería con una herramienta adecuada al análisis estructural de edificios construidos con mampostería de adobe. Se propuso desarrollar los avances respecto a la aplicabilidad del MEF como alternativa. Luego, se establecieron las pautas metodológicas involucradas en tales avances, desde dos modalidades: El trabajo de campo y el trabajo de gabinete; circunscriptas a dos alcances diferentes: La escala doméstica y la escala histórica o patrimonial.

En la escala urbana, el trabajo de campo ha realizado un avance en el conocimiento de las construcciones actuales, que combinan mampostería de adobe con materiales modernos, comparable en su detalle al estudio dedicado a casos históricos. Como resultado parcial de tal relevamiento, gracias a la información obtenida, es posible actualmente estudiar desde el trabajo de gabinete un enfoque nuevo, en el modelado numérico por MEF, que se adapte al contexto constructivo doméstico del NOA.

En la escala patrimonial, los trabajos de campo y gabinete se han conjugado para dar respuesta a intervenciones de tres casos concretos en la provincia de Jujuy. Desde premisas y estrategias convencionalmente aceptadas, donde la aplicabilidad del MEF es un hecho, se ha logrado efectivamente incorporar características propias de cada proyecto y sortear dificultades dentro del contexto constructivo patrimonial del NOA. En estos términos, se concluye que existe un cierto avance en la aplicabilidad del MEF para el análisis estructural de construcciones de adobe en la provincia de Jujuy, en toda la dimensión de la problemática que lo convoca.

Referencias

- 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*, 20(2). Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Herr, C. y Rolón, G. (2018). “Registro documental e intervención patrimonial en la arquitectura religiosa de la Provincia de Jujuy. Criterios implementados por la Comisión Nacional de Museos, de Monumentos y Lugares Históricos (CNMMYLH) durante el período 1938-1946”. *Anales del IAA*, 48(1), pp. 31-45. Buenos Aires: Instituto de Arte Americano e Investigaciones Estéticas.
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) y Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC) (Julio 2018). “Reglamento INPRES CIRSOC 103. Reglamento argentino para Construcciones Sismorresistentes. Parte I: Construcciones en General”. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).
- Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES) y Centro de Investigación de los Reglamentos Nacionales de Seguridad para las Obras Civiles (CIRSOC) (Julio 2018). “Reglamento INPRES CIRSOC 103. Reglamento argentino para Construcciones Sismorresistentes. Parte III: Construcciones de Mampostería”. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).
- Losa, N. (2022). “Análisis estructural de construcciones históricas de adobe. Aplicación del método de elementos finitos en casos de estudio (Jujuy, Argentina)”. *Actas de 20° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra, SIACOT XX*, Trinidad, Cuba, 4 al 9 de abril.
- Lourenço, P. (1996). “Computational Strategies for Masonry Structures”, Thesis (Ph. D. in Civil Engineering), Technische Universiteit Delft, Delft.
- Lourenço, P. y Pereira, J. (2018). “Seismic Retrofitting Project: Recommendations for advanced modeling of historic earthen sites”. Los Angeles: Getty Conservation Institute.
- Oliveira, C., Silveira, D., Varum, H., Parisi, F., Miccoli, L., Solís, M., Rodríguez-Mariscal, J. y Tarque, N., (2021). “Mechanical Characterization of Adobe Masonry”, *Building Pathology and Rehabilitation*, vol. 20. Porto: University of Porto.
- Parisi, F., Daudon, D., Illampas, R., Lourenço, P. y Tarque, N. (2021). “Numerical Modelling of Adobe Structures”. *Building Pathology and Rehabilitation*, vol. 20. Porto: University of Porto.
- Rainer, L. (2008). “Deterioration and Pathology of Earthen Architecture”. *Terra Literature Review. An Overview of Research in Earthen Architecture Conservation*. Los Angeles: Getty Conservation Institute.
- Tomasi, J. y 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. y 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. y 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. y Barada, J. (2020). “Patrimonios coloniales y republicanos. Caracterización de sus técnicas y materialidades en la provincia de Jujuy (Argentina)”. *Gremium: Revista de restauración arquitectónica*, 7(14). México: Editorial Restauro.
- Tomasi, J. y Barada, J. (2020). “Recurring damages on earthen heritage. Diagnosis and possible interventions in the highlands of Jujuy (Argentina)”. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 5(1). Suiza: Springer.