

Métodos de estudio para determinar la vulnerabilidad sísmica en edificaciones patrimoniales en Bolivia

Cuéllar, M.^a, Arízaga, A.^b, Arraya, C.^c, Bellido, L.^d, Romero, D.^e,

- a Docente Investigador en el área de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: mirkocuellar2405@gmail.com.
- b Técnico Superior en Construcción Civil, Estudiante Egresado en el área de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: alejan386@gmail.com
- c Investigadora en el Área de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: Carolfaby18@gmail.com.
- d Investigador en el Área de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: luisfernandobellidojim@gmail.com.
- e Investigadora en el Área de Estructuras de la Facultad de Ingeniería Civil (USFX), Destacamento 317, Ex Campus REFISUR, 573, Sucre, Bolivia. E-mail: romerofloresdanitza27@gmail.com

Recibido: 03/10/2022

RESUMEN

Alrededor del mundo tenemos una gran cantidad de infraestructuras históricas, que son un emblema internacional por su riqueza patrimonial, al poseer diseños arquitectónicos de grandes arquitectos e ingenieros de sus respectivas épocas.

El trabajo que se presenta a continuación presenta diferentes metodologías para evaluar sísmicamente las edificaciones patrimoniales, para que ante posibles desastres naturales no haya pérdidas grandes. El objetivo es conservar estas infraestructuras de la mejor manera posible ya que por su sistema de construcción, características que posee el abobe, material con que éstas se construyen, estas infraestructuras se consideran vulnerables.

La metodología a desarrollar es usando el método de elementos finitos, posteriormente utilizaremos simulaciones informáticas avanzadas con caracterización física y estructural adecuada para identificar edificios históricos.

La siguiente etapa consistirá en desarrollar estudios de campo que permitan su calibración y ajuste para lo cual se hace necesario un trabajo interdisciplinario que involucre historiadores, arquitectos, ingenieros y en general todas aquellas personas interesadas en la preservación y conservación del patrimonio histórico.

Palabras clave: Vulnerabilidad, Riesgo Sísmico, Patrimonio Cultural, Edificios Históricos.

ABSTRACT

Around the world we have a large number of historic infrastructures, which are an international emblem for their rich heritage, having architectural designs of great architects and engineers of their respective eras.

The following work presents different methodologies for seismic evaluation of heritage buildings, so that in case of natural disasters there are no major losses. The objective is to conserve these infrastructures in the best possible way since, due to their construction system, the characteristics of the abobe and the material with which they are built, these infrastructures are considered vulnerable.

The methodology to be developed is using the finite element method, then we will use advanced computer simulations with appropriate physical and structural characterization to identify historic buildings.

The next stage will consist of developing field studies that allow their calibration and adjustment, for which an interdisciplinary work involving historians, architects, engineers and in general all those interested in the preservation and conservation of historical heritage is necessary.

Key words: Vulnerability, Seismic Risk, Cultural Heritage, Historic Building.

INTRODUCCIÓN

Las edificaciones históricas y antiguas, debido su gran importancia cultural y patrimonial, tiene que tener una seguridad estructural para preservar su integridad arquitectónica colonial y su conservación de materiales históricos, por lo tanto, es necesario realizar un diagnóstico y evaluación sísmica para determinar el grado de vulnerabilidad, y así mismo también se debe resguardar la vida de las personas que habitan estas infraestructuras.

Los edificios históricos forman parte fundamental del patrimonio cultural, llegando a convertirse en símbolos de la ciudad, donde se encuentran construcciones históricas que son centros de atracción turística y cultural con las implicaciones económicas correspondientes muchos otros edificios antiguos, aún conservan el curso para el que fueron concebidos como lo demuestran la gran cantidad de Edificaciones Patrimoniales como: Iglesias, Universidades, Colegios, etc. Muchas de estas edificaciones fueron construidas hace décadas, lo cual implicó que el diseño y construcción, fueran realizados por arquitectos e ingenieros de gran relevancia de su época.



Figura 1. Iglesia San Felipe Neri, Patio del Convento



Figura 2. La Catedral Metropolitana

Existen factores externos que pueden afectar a una edificación histórica, algunos de los factores externos pueden ser: la degradación de material por el paso del tiempo, eventos naturales con largos periodos de retorno, acciones originadas por el hombre, como cambios de gusto remodelaciones, entre otros, por esta razón muchas veces es necesario evaluar el estado de la preservación del patrimonio, como también por la seguridad de las personas.

Antes de proceder a la evaluación del estado de la estructura, es recomendable conocer al máximo la historia de la edificación incluyendo las fechas de construcción, origen de materiales, motivaciones de los constructores, técnicas y proceso constructivo y acciones extraordinarias a las que está sometida la estructura, todo respaldo de fuentes y documentos sobre su construcción y posibles mejoramientos es importante para comprender y poder realizar un mejor análisis y poder entender el comportamiento de la estructura.

La demanda sísmica en Bolivia guarda relación con el movimiento de las placas tectónicas sudamericanas que ocasionan sismos de grado variable en los países limítrofes, así también existen sismos originados debido a las fallas internas sujetas a la acción de la placa del altiplano y el rígido escudo brasilero. Las acciones sísmicas hasta el día de hoy no es un evento predecible, por lo tanto todas las normas incluyen en probabilidades estadísticas que repercuten en fuerzas que se aplicaran a la estructura y poder evaluar el comportamiento sísmico.

Es necesario identificar que los objetivos de desempeño de las estructuras históricas dependen mucho de varios parámetros como: zonificación sísmica, tipo de suelo, materiales con los que fue construido, etc. Toda esta información es necesaria para poder evaluar la estructura según los diferentes métodos que existen.

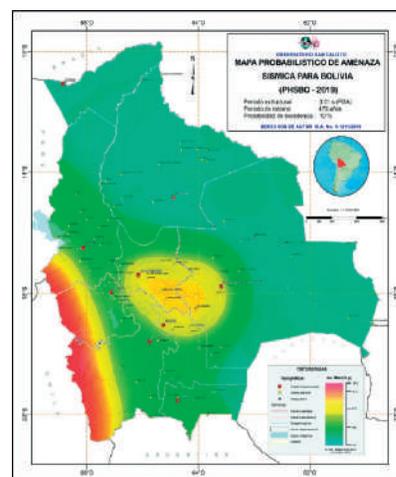


Figura 3. Mapa Probabilístico de Amenaza Sísmica para Bolivia

El presente trabajo se enfoca principalmente en los sismos y los daños que ocasionan a las estructuras, especialmente a las estructuras antiguas, debido a estos sucesos impredecibles es que hasta el día de hoy se evidenciando falencias en este tipo de estructuras donde se pierden vidas e historia que guarda dentro de sus ambientes. Es por ello, que es necesario conocer el comportamiento que tendrá una estructura ante una actividad sísmica y más aún conocer cuáles pueden ser las edificaciones más vulnerables de una respectiva zona a sufrir daños estructurales y no estructurales. Hoy es necesario realizar una evaluación preliminar para poder tener un diagnóstico inicial, del cual se pueda derivar a realizar otros estudios o análisis de más detalle, si fuera el caso según el diagnóstico preliminar mediante métodos simplificados y evaluativos según la concepción y construcción de la edificación.

En noviembre de 1650 un terremoto destruye la bóveda de la catedral de los españoles en Chuquisaca; en 1845 otro terremoto en Santa Cruz causa daños en construcciones de adobe; en 1871 otro terremoto causa daños cerca del pueblo de San Antonio (hoy Villa Tunari); en 1887 y 1899 dos fuertes terremotos destruyen viviendas de adobe en Yacuiba (al este de Tarija), causando algunos heridos (Descotes y Cabré, 1973).

Año	Mes	Día	Magnitud (mb)	Intensidad (mm)	Observaciones
1650	11	10	6.4	VII	La bóveda de la catedral de Sucre es destruida
1884	11	27	5.8	VI	Destrozos en Tarabuco.
1948	3	27	6.1	VII	Destrucción en la ciudad de Sucre, muerta y heridos.
1985	3	19	5.4	VI	En Monteagudo hubo derrumbes.
1994	6	9	8.1	VI	Sismo Profundo, Sentido en casi todo Bolivia
2017	2	21	6,5	IV	Debido a la profundidad fue casi imperceptible.

Tabla N°1 Registros Sísmicos en Bolivia mas relevantes

MÉTODOS Y ANALISIS

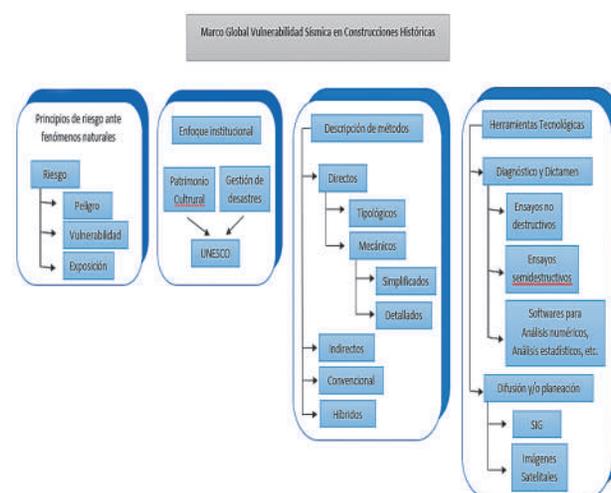
Como subsecuente presentamos el marco global de Vulnerabilidad sísmica en construcciones históricas desde una perspectiva conceptual, institucional, metodológica y parcialmente tecnológica. (ver Figura 2).

En primera instancia se muestra un cuadro conceptual de riesgo ante fenómenos naturales, y la anotación de posibles estrategias de análisis de vulnerabilidad sísmica

en monumentos arquitectónicos históricos mostrando como puntos a observar la vulnerabilidad y exposición.

Posteriormente tendremos un pequeño análisis institucional basado en la relación entre el patrimonio cultural y los fenómenos naturales, los cuales sugieren estrategias de intervención, mencionamos a organismos como la UNESCO ya que estos tienen fondos para utilizar en caso de daños ocasionados al patrimonio cultural, ya que las construcciones históricas conforman un sentido de pertenencia, individual y colectivo que ayuda a mantener la cohesión social y territorial.

En seguida se muestra la descripción de los métodos que podríamos emplear para determinar la vulnerabilidad sísmica.



Finalmente, se aborda una breve perspectiva de los Sistemas de Información Geográfica como parte de las tecnologías de difusión, dictamen y diagnóstico en el patrimonio cultural.

Figura 4. Marco metodológico de vulnerabilidad sísmica en construcciones históricas.

Las infraestructuras patrimoniales tienen una riqueza histórica muy deseada a nivel latinoamericano.

De ahí surge la necesidad de preservar, dicho patrimonio cultural e histórico. Así, si en un futuro se presenta un sismo de alta magnitud, nosotros ya tengamos como información, si estas edificaciones tengan posibles soluciones al mismo o no, de ser así, investigar y plantear nuevas posibilidades de solución, para poder reforzar el material, de tal forma que las consecuencias sean las mínimas posibles.

Valores determinantes de un Edificio Patrimonial

Los centros históricos representan una oportunidad para el desarrollo, de este trabajo la importancia de es-

tos espacios, su concepto, proyectos que han trascendido y que han ofrecido un nuevo enfoque para su aprovechamiento, para lograr contribuciones al desarrollo de los centros históricos, donde no debe olvidarse las vocaciones y la identidad que se puede rescatar, construir desde cero o cambiar.

Los edificios históricos es un campo multidisciplinario en el cual intervienen disciplinas aparentemente disímolas entre sí: Arqueología, Arquitectura, Historia, Ingeniería, Restauradores de Arte, etc.

La parte arquitectónica tiene gran importancia cultural por la información que aporta al estudio histórico de la sociedad, cómo concretización del arte y técnica del diseño, proyecto y construcción de edificios, creando espacios adecuados en función de las necesidades de la vida humana, en las que son indispensables las cualidades de utilidad, estabilidad y estética. Además, de la protección y conservación del patrimonio cultural en cualquiera de sus manifestaciones, como son las obras de arte, los conjuntos históricos, los edificios emblemáticos, los lugares arqueológicos o el conjunto de las artes escénicas.

La concepción estructural de un edificio histórico es también parte de su valor cultural. Ésta muestra en forma tangible las antiguas técnicas de construcción y los materiales usados. Las estructuras de los monumentos constituyen sin duda alguna un documento histórico y un legado vivo de las habilidades de los antiguos constructores.

Lamentablemente, muchas veces el ingeniero no reconoce o toma en cuenta estos valores para proponer el proyecto de intervención. Otras veces, se reconocen sólo algunos de ellos (como arte, historia y arquitectura), pero la falta de información sobre las técnicas y materiales de construcción de épocas pasadas hacen que el valor ingeniería se desprecie y se pierda o mutile al proponer una rehabilitación con técnicas modernas y novedosas.



Figura 5. Casa de la Libertad

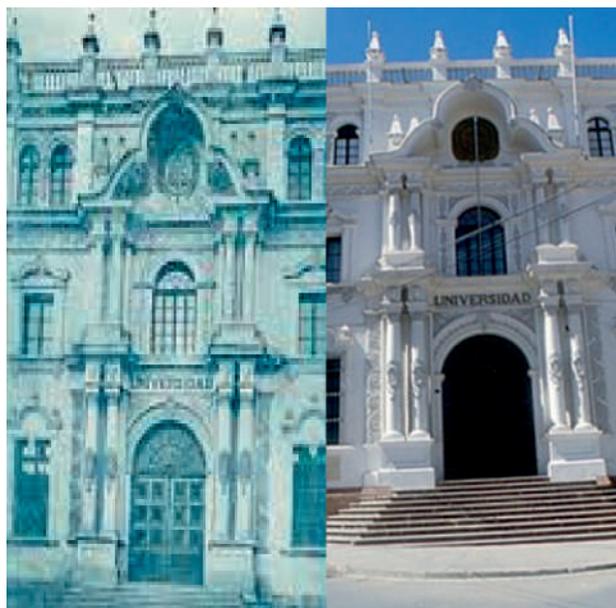


Figura 6. Edificio de la Universidad Mayor, Real y Pontificia de San Francisco Xavier de Chuquisaca

Estimación Estática de Valores Históricos Construcciones

La interpretación de los datos obtenidos de los análisis estructurales de edificios patrimoniales utilizando el método de elementos finitos cambia su interpretación de los cálculos de estructuras, producidos por las tecnologías Ingenieriles actuales. Debido a que no siempre es posible realizar estudios en laboratorio, que determinen las propiedades físico, mecánico de los materiales, así adquiriendo muestras de las estructuras históricas, a veces es complicado determinar las capacidades importantes de los miembros estructurales de acuerdo con los resultados de los cálculos.

Estrategia Integral del Modelado

El objetivo es utilizar simulaciones informáticas avanzadas con caracterización física y estructural adecuada para identificar edificios históricos.

Método Simplificado para determinar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones patrimoniales.

Métodos de análisis simplificados el análisis de Edificaciones Patrimoniales es una tarea compleja, principalmente por las siguientes razones.

- a) La falta información sobre el interior del componente.
- b) Caracterizar las propiedades mecánicas de los materiales utilizados es difícil y de alto costo.
- c) Diferencias considerables en las propiedades mecánicas resultantes del procesamiento y uso de materiales naturales.
- d) Alteraciones en la composición de los elementos estructurales, relacionado con el tiempo de la construcción.
- e) Daños que fue recibiendo la estructura al pasar de los años. Lo que no implica el proceso de la aplicación de normas actuales.
- f). Se desconoce cada uno del comportamiento de los elementos de mampostería (muros, arcos, bóvedas) madera (techos y pisos). Todos estos factores para la carga vertical estática y, más cautelosamente, para la sismicidad. Por lo tanto, métodos más complejos y precisos pueden no corresponder a análisis mejores y más confiables.

El uso de métodos analíticos simplificados generalmente requiere que la estructura sea regular y simétrica, lo que significa que los muros actúan como una membrana rígida y el modo predominante de colapso es la falla por cortante plano del muro. Por tanto, el procedimiento simplificado no debe entenderse como una evaluación cuantitativa de la seguridad, sino como un simple indicador del posible comportamiento sísmico de un edificio. Se consideran los siguientes métodos de análisis simplificados e indicadores correspondientes.

Modelo y Análisis numérico Estructural Avanzando mediante el Método de Elementos Finitos (FEM)

Paso 1. Recopilación de Información y Estudios Adicionales

En esta etapa, se deben recopilar los datos disponibles: información histórica, materiales, descripciones geométricas y estructurales, investigaciones anteriores, etc. En general, la geometría de las estructuras es compleja. Por lo tanto, la información geométrica estructural es importante para un buen diseño. Esta idealización depende básicamente del tipo de elemento estructural y su geometría, pero también de sus condiciones de contorno, apoyos, tensiones y otras idealizaciones de elementos.

Paso 2. Modelación, Análisis y Calibración

Proceso de calibración y validación

Todo análisis estructural se realiza idealizando la realidad, ya sea geometría, comportamiento de materiales y estructuras, tensiones aplicadas, etc. Es imperativo que la idealización elegida se ajuste al problema en cuestión para que el modelo matemático resultante pueda representar la realidad tal como es. Simular en este nivel se realiza el proceso de calibración y verificación. Esto se puede hacer a través de pruebas empíricas (en el campo o en el laboratorio). Esto depende de la cantidad de datos recopilados en el primer paso. También debe validar su modelo antes de ejecutar varias consultas en él. Dependen obviamente del tipo de análisis realizado (paso). Cada modelo debe ser evaluado de manera individual. (Mondragón)

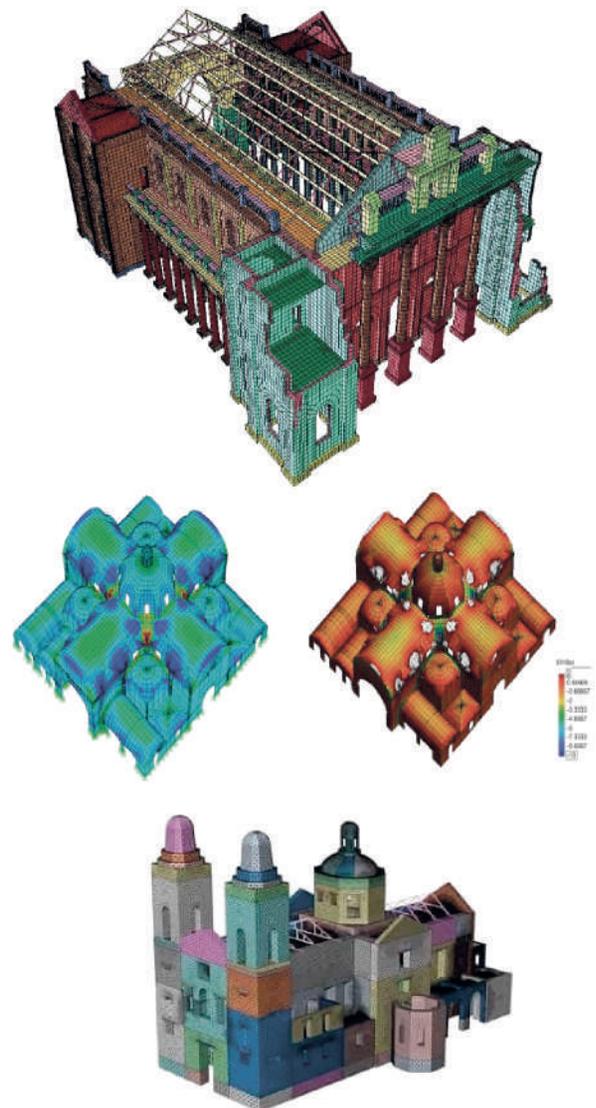


Figura 7. Modelación, Calibración y Análisis de Edificaciones Patrimoniales

Paso 3. Tipo de Análisis Computacional

Dependiendo de los resultados deseados, estos métodos mecánicos o numéricos pueden complementarse con métodos experimentales; teniendo en cuenta ensayos técnicos no destructivos (ej. pruebas sónicas o ultrasónicas), semidestructivos (ej. ensayo de gato plano) o caracterización dinámica experimental (ej. Medición de vibración ambiental con el uso de sismógrafos). Propiedades como la capacidad de resistencia comparada con los esfuerzos sísmicos, módulo de elasticidad, frecuencias asociadas a diversos modos de vibración y amortiguamiento de la estructura, correlacionadas a magnitudes propias del sistema estructural; como la masa, rigidez, esfuerzos, deformaciones, ductilidad, etc. para posibles modelos de calibración detallados y/o simplificados. (M.Sami)

La selección del tipo de análisis dependerá de la herramienta de análisis escogida, de los costos en general (recursos computacionales disponibles, de los tiempos de pre y posproceso, etc.), así como también del tipo de estructura histórica que estemos analizando. También, es importante la forma en cómo se idealizarán las sollicitaciones: sean del tipo estático, dinámico, modal espectral; sean fuerzas, desplazamientos, aceleraciones, etc. Dependiendo del fenómeno a estudiar será la forma de idealizar las sollicitaciones.

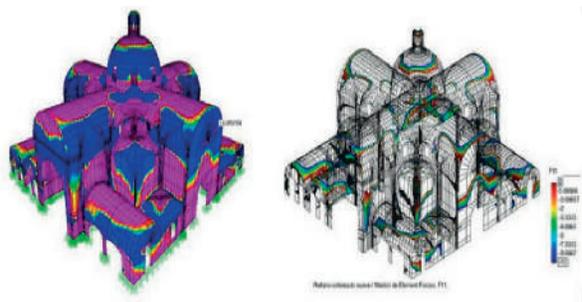


Figura 8. Análisis dinámico del análisis computacional

Paso 4. Interpretación de Resultados

Los elementos finitos están conectados entre sí por puntos, que se llaman nodos o puntos nodales. Al conjunto de todos estos ítems elementos y nodos se lo denomina malla. Debido a las subdivisiones de la geometría, las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico no se resolverán de una manera exacta, sino aproximada por este método numérico. La precisión de los Métodos dos Elementos Finitos depende de la cantidad de nodos y elementos, del tamaño y de los tipos de elementos de la malla. Por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos en una malla, más precisos serán los resultados del análisis.

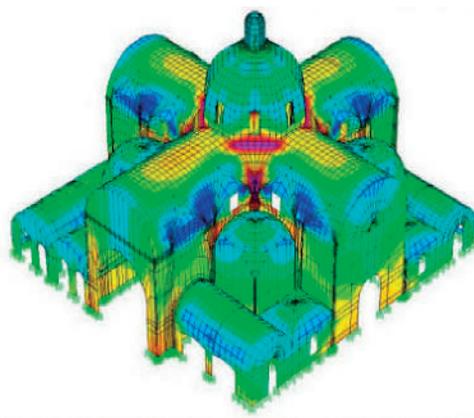


Figura 9. Revisión de Resultados en un Edificio Patrimonial.

CONCLUSIONES

Cuando se realiza el análisis estructural de una infraestructura patrimonial e histórica, se debe hacer una inspección a detalle de la infraestructura tanto en su estado actual, ya sea mediante la observación directa o a través de ensayos in situ, la inspección debe concentrarse en el reconocimiento de patologías, grietas, pérdidas y deterioro de material, así como de todas aquellas muestras de degradación, tanto del material como de la estructura en general.

Con esta información se pueden establecer conclusiones sobre el origen de dichas degradaciones para comprender el mejor comportamiento de la infraestructura.

La simulación mediante el modelo computacional de la infraestructura nos permite conocer mucho mejor el funcionamiento, así como predecir el comportamiento bajo diferentes acciones, la elección del modelo depende de muchos factores, como la motivación del análisis estructural, el tipo de estructura, del tipo de material, las acciones bajo las cuales se desean analizar.

Es imprescindible conocer otros tipos de métodos para el diagnóstico y evaluación sísmica estructural y poder conocer la vulnerabilidad sísmica y conocer los resultados y zonas vulnerables de la edificación, para tener la confiabilidad necesaria de su comportamiento estructural, además que si la evaluación preliminar es desfavorable para la estructura, sería necesario realizar otros estudios más avanzados y verificar con mayor exactitud el comportamiento de la infraestructura, usando softwares de última tecnología y ensayos no destructivos.

Otro aspecto muy importante, es el de calibrar el modelo, mediante comparación de otros modelos realizados y comparar sus resultados y verificar la coherencia analítica y computacional, y poder adecuarlo para analizarlo con parámetros del lugar de estudio.

Es de gran importancia la conservación y preservación del patrimonio, riqueza cultural e histórica de la arquitectura antigua que tiene mucha importancia histórica.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CÁRDENAS, M. I. (2013). "VULNERABILIDAD SÍSMICA DE CONSTRUCCIONES PATRIMONIALES HISTÓRICAS DE MAMPOSTERÍA EN CHILE: APLICACIÓN A LOS TORREONES ESPAÑOLES DE VALDIVIA". Valdivia - Chile: Editorial de la Universidad Austral de Chile.
- Clementi, F., Gazzani, V., Poiani, M., & Lenci, S. (2016). Assessment of seismic behaviour of heritage masonry buildings using numerical modelling. *Building Engineering_Volume 8*, 29-47. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710216300791>
- G. González del Solar, P. E. Martín, F. A. Calderón, N. G. Maldonado, & I. A. Maldonado. (01 de Diciembre de 2014). Importancia de la modelación numérica en la puesta en valor de estructuras patrimoniales de mampostería en zona sísmica. *Revista ALCONPAT vol.4*, pág. 15. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-68352014000300211&script=sci_arttext
- Gea, S. B. (2016). *VULNERABILIDAD SÍSMICA DE EDIFICIOS HISTÓRICOS DE MAMPOSTERÍA*. Salta-Argentina: Editorial de la Universidad Nacional de Salta.
- Mondragón, F. P. (20 de Diciembre de 2010). ESTRATEGIAS PARA EL MODELADO Y EL ANÁLISIS SÍSMICO DE ESTRUCTURAS HISTÓRICAS. *Revista de Ingeniería Sísmica No. 83 43-63 (2010)*, pág. 20. Obtenido de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-092X2010000200003
- Muñoz, F., Meza, J., & F. Peña. (s.f.). *scipedia*. Recuperado el 02 de Junio de 2022, de scipedia: https://www.scipedia.com/public/Mu%C3%B1oz_et_al_2012a
- P.B. Lourenc_o, & J.A. Roque. (21 de Octubre de 2005). Simplified indexes for the seismic vulnerability of ancient. *ELSEVIER*, pág. 9. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061805002679>
- Salazar, L. G., & Ferreira, T. (01 de Agosto de 2019). Vulnerabilidad sísmica para la rehabilitación del patrimonio cultural. Un acercamiento teórico-institucional. *REVISTA GREMIUM*, pág. 20. Obtenido de <https://editorialrestauro.com.mx/vulnerabilidad-sismica-para-la-rehabilitacion-del-patrimonio-cultural-un-acercamiento-teorico-institucional/>

