



Boletín del Colegio de Ingenieros Militares **"Tte. de Ings. Juan de la Barrera," A.C.**

Año 02 No. 22

Extraordinario

Diciembre - 2015



**Simulación Numérica del edificio principal de la Dirección General de Educación Militar y Rectoría de la Universidad del Ejército y Fuerza Aérea.
Sometida a Hundimiento y Sismo**

Juan Edmundo Mayorga Castro (1), Norberto Domínguez Ramírez (2), Arturo Suárez Suárez (3)

Nuestra Patria, "México", requiere de profesionistas comprometidos con ella, con un alto sentido de la ética profesional y el cumplimiento del deber.

SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL EDIFICIO PRINCIPAL DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE EDUCACIÓN MILITAR Y RECTORÍA DE LA UNIVERSIDAD DEL EJÉRCITO Y FUERZA AÉREA SOMETIDA A HUNDIMIENTO Y SISMO

Juan Edmundo Mayorga Castro (1), Norberto Domínguez Ramírez (2), Arturo Suárez Suárez (3)

(1) EMI-SEDENA. Avenida México-Tacuba S/No. Esq. Carrillo Puerto, Colonia Popotla, México D.F., 11400, *mayorga.edmundo@gmail.com*

(2) SEPI-ESIAZ-IPN. Edificio de Posgrado e Investigación anexo al 12, Av. Miguel Bernard s/n, Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", Col. Lindavista Zacatenco, México D.F., 07300, *ndominguez@ipn.mx*,

(3) *raelius1@hotmail.com*,

México D.F., 07300, *ndominguez@ipn.mx*, 3 *raelius1@hotmail.com*,

RESUMEN

En los últimos años, la conservación, restauración y reutilización de edificios históricos se han convertido en actividades prioritarias para la sociedad, siendo una de las mayores dificultades ingenieriles determinar el estado real de estabilidad e integridad estructural por daño y degradación, y el riesgo que esto representa para la seguridad de las personas y del mismo inmueble.

En el caso de edificios históricos de mampostería, el análisis estructural es aún muy complicado debido a una serie de factores que deben considerarse en su simulación numérica, entre los que destacan: a) la baja resistencia en tensión y cortante con falla cuasi-frágil de la mampostería; b) la aleatoriedad e incertidumbre de parámetros, asociadas al carácter compuesto de este material, a la orientación de las juntas y a los procedimientos constructivos empleados; c) el desconocimiento de métodos numéricos desarrollados específicamente para el comportamiento lineal y no lineal de la mampostería.

En este trabajo se presenta una metodología para edificios históricos de mampostería basada en análisis numérico secuencial lineal y no lineal, la cual se aplicó al caso particular del edificio militar conocido como "**Frontispicio**", sede actual de un plantel militar en México.

La metodología se compone de tres etapas consecutivas: **(A) Trabajos preliminares; (B) Estudios iniciales y (C) Análisis estructural mediante simulación numérica.** Empleando el programa de elementos finitos CODE_ASTER, se construye y analiza un modelo virtual del edificio ante diversos escenarios de carga ocurridos a lo largo de su historia (hundimiento, sismos), para entonces predecir numéricamente su futuro estado de estabilidad (progresión del hundimiento a lo largo del tiempo).

ABSTRACT

In recently years, conservation, restoration and reuse of historical buildings is becoming a society's priority, and determining the real state of damage and degradation of an ancient structure, as well as the risk associated to extraordinary extreme events like earthquake, are one of the most difficult engineering troubles that should be solved in order to ensure the structural security of the building. In the case of the numerical analysis of historical masonry buildings, this is still very complicated due to a set of factors to be considered into the model: a) the low traction and shear resistance with a brittle failure of masonry; b) the incertitude about material parameters due to the mixed nature of masonry, the joint's orientation, and the traditional procedures of masonry construction; and c) the not-knowing of numerical methods specifically intended to deal with the nonlinear behavior of masonry. The aim of this work is to introduce a methodology for numerical analysis of historical masonry buildings, based on a linear and nonlinear sequential strategy, which was applied on an ancient military building known as "**Frontispicio**" –which is currently used as a military school. This methodology is integrated by three consecutive stages: (A) Preliminary works; (B) Initial studies of site; (C) Numerical analysis based on FEM. The numerical model was constructed and analyzed with the help of the finite element code CODE_ASTER, simulating different scenarios occurred during the life of the building (earthquake) in order to predict numerically the future state of damage and stability of the building.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el proceso de análisis estructural de un edificio convencional cuya seguridad estructural está delimitada en el marco de una normatividad vigente, se vuelve una tarea ordinaria para el ingeniero proyectista quien basado en su propio conocimiento y experiencia, puede proponer para la realización del análisis aspectos tales como las cargas que actúan en el edificio, el tipo de material empleado, el método de análisis numérico por implementar, etc. Inclusive el sistema constructivo más conveniente, con el objeto de que la respuesta del inmueble sea la más satisfactoria. Sin embargo, cuando se enfrenta a la tarea de determinar el estado estructural real de un edificio considerado patrimonio nacional por su alto valor histórico, construido hace más de 100 años por ejemplo, en un contexto cultural, económico e ingenieril diferente al actual, donde no se tiene más información que lo que se puede ver y extraer en sitio y se presume el funcionamiento del sistema constructivo empleado, donde los materiales empleados son diferentes a los de hoy en día, sin duda el problema de analizarlo se complica.

Por su trayectoria histórica, las Fuerzas Armadas de México son responsables de un número elevado de inmuebles de alto valor histórico que deben ser revisados y protegidos para asegurar a largo plazo, su permanencia y posible uso. Por tales razones, se desarrolló una propuesta de metodología ingenieril para la evaluación de la integridad y estabilidad estructural de edificaciones históricas, que servirá inicialmente como referencia para la revisión del patrimonio histórico de las Fuerzas Armadas, y en un contexto más amplio, como un método alternativo para el patrimonio histórico y artístico de la Nación Mexicana [Domínguez et al., 2015]. En esta propuesta, la metodología se basa principalmente en la elaboración de modelos numéricos o computacionales que permiten hacer predicciones de la respuesta estructural ante solicitaciones de diversa índole, los cuales se construyen tomando como punto de partida los datos y parámetros obtenidos de un amplio estudio de campo así como una profunda revisión bibliográfica. Mediante simulación numérica se pueden identificar en una estructura: el estado actual de daño, la ubicación local del agrietamiento y el grado de degradación, sus posibles causas, y sobre todo, se pueden predecir potenciales regiones de daño y colapso, en caso de que no se tomen las medidas pertinentes de reforzamiento.

En este documento se presenta la aplicación de la metodología de evaluación en un caso práctico de gran interés y trascendencia, al tratarse de la evaluación estructural del edificio histórico conocido como “**Frontispicio**”, sede principal de un plantel de educación militar en México, construido a principios del siglo XX con materiales y técnicas de la época, y cuyo sistema estructural se constituye esencialmente de muros de tabique junteado con mortero, con sillería labrada en la planta baja del cuerpo principal [CNMH, sin fecha]. Pensado desde un principio para acoger a la incipiente Escuela Normal y desarrollar en él actividades académicas y de enseñanza, el edificio fue erigido en el marco de los festejos del Centenario del inicio de la Guerra de Independencia. La construcción estuvo a cargo del Ciudadano Teniente Coronel Ingeniero Porfirio Díaz Ortega (Hijo del Presidente Porfirio Díaz) [Díaz, 1908] y fue terminado en 1910. Diseñado con los criterios y procedimientos de la época Porfiriana, los cuales se inspiran en el “*Art Nouveau*” francés que imperaba en el mundo, el edificio ha sufrido inexorablemente daño local y global ante el paso del tiempo y particularmente por los efectos de los hundimientos del suelo, típicos de la Ciudad de México.

El “**Frontispicio**” está asentado en una zona de alta compresibilidad en una región fuertemente sísmica y presenta actualmente daños locales con una apreciable configuración deformada a la escala global que permite observar los efectos que la consolidación diferencial del suelo ha tenido en el inmueble a lo largo del tiempo. Respecto a los daños locales, de manera visible resalta el agrietamiento en diversos muros, la deformación en losas de la planta baja, y de manera particularmente importante los asentamientos diferenciales tanto del ala norte como el ala sur del edificio, que han provocado que el ala sur se apoye gravemente sobre el cuerpo central. Si bien se han aportado soluciones constructivas de reparación a lo largo de la vida útil de la edificación, no hay certeza sobre la existencia de daños estructurales internos que potencialmente pueden conducir a la falla de elementos estructurales completos (muros, vigas, cimentación) o incluso al colapso parcial o total de la edificación.

El análisis de la integridad y estabilidad estructural del **Frontispicio** se realizó conforme a las siguiente etapas: (1) Trabajos preliminares; (2) Estudios iniciales; (3) Análisis estructural; (4) Análisis de resultados; (5) Conclusiones; y en cada una de ellas se describe de manera precisa las hipótesis, los procedimientos adoptados y las indicaciones necesarias para la modelación, análisis y simulación de la edificación, estimándose finalmente la respuesta estructural aproximada que el inmueble ha tenido ante los posibles escenarios a los que ha estado sujeto a lo largo de sus más de cien años de existencia.

DEFINICIÓN DE ESCENARIOS Y ESTRATEGIAS DE MODELACIÓN NUMÉRICA

Preámbulo histórico

Antes de llevar a cabo los análisis numéricos, es necesario conocer la evolución de las solicitudes que han actuado en el inmueble a lo largo de su historia y de ser posible, determinar las afectaciones estructurales y la solución de reforzamiento –buena o mala- que se aplicó en su momento. Una vez hecho esto, desde una perspectiva ingenieril y fenomenológica, se deben identificar la naturaleza de las solicitudes y los escenarios –aislados o combinados simultáneamente- a los que se ha sujetado la estructura, para evaluar el desempeño estructural que ésta ha tenido –debería haber tenido- ante ellos; en algunos casos, se debe considerar si existe una correlación temporal entre los escenarios (es decir, si un evento dado promovió o agravó otro evento posterior) y si se pueden analizar por separado como eventos independientes. A partir de esta identificación de escenarios, se definen los casos de estudios mínimos que deberán simularse numéricamente; es decir, si una estructura ha estado sujeta a “*n*” eventos sísmicos a lo largo de su existencia, es posible que se simule únicamente el evento sísmico de mayor envergadura. A continuación se presenta el estudio histórico que se hizo para el caso específico del “**Frontispicio**” (ver Tabla 1).

Tabla 1. Eventos mayores durante la vida útil del Frontispicio.

AÑO	Estado del Frontispicio	Observaciones
1908	Inicio de la construcción	El inmueble se concibe como sede de la Escuela Normal Primaria para Maestros, en el marco de los preparativos para el Centenario de la Independencia
1910	Término de la construcción	Fue inaugurado el 12 de septiembre de 1910, durante las fiestas del aniversario del Centenario de la Independencia, habiendo asistido el Presidente de la Republica Porfirio Díaz
1918	Abandono	El edificio fue cerrado en 1918 por falta de presupuesto y entregado a la Secretaría de Guerra y Marina para ser convertido en la nueva sede del Colegio Militar, después de algunas modificaciones y adaptaciones para ser utilizado como centro de estudios
1920	Reapertura y puesta en servicio	Fue reabierto el 5 de febrero de 1920 por el C. Presidente de la República Venustiano Carranza.
1925	Remodelación	El Colegio Militar funcionó hasta el año de 1925 cuando fue cerrado para efectuar nuevas ampliaciones y adecuaciones, reabriéndose sus puertas en julio de 1926.
1957	Sismo de la Ciudad de México de magnitud 7.7	No se encontraron registros respecto a la evaluación inicial de daños después del evento sísmico.
?	Reestructuración	No se encontraron registros del corte realizado al edificio, con el fin de evitar daños al mismo por efectos del hundimiento diferencial presentado.
1970	Afectaciones por construcción del metro	No se encontraron registros sobre afectaciones por la construcción del metro.
1985	Sismo de la Ciudad de México de magnitud 8.1	No se encontraron registros respecto a la evaluación inicial de daños después del evento sísmico.
?	Reforzamiento	No se encontraron registros respecto a posibles reforzamientos realizados al edificio.
?	Revisión estructural	No se encontraron registros respecto a evaluaciones estructurales realizadas al edificio.

Tomando como base los resultados de la investigación documental [CNMH, sin fecha], se identificaron a lo largo de la vida de la estructura, los eventos que de alguna manera han influido en el devenir de su integridad y estabilidad estructural.

Dependiendo de la robustez del equipo de cómputo y de los programas computacionales empleados para el análisis, cabría la posibilidad de encadenar numéricamente tales eventos simulando cada uno de ellos y haciendo que la respuesta para un instante de tiempo dado dependa de la configuración perturbada producida por el evento previo. En el **Frontispicio** se identificaron los eventos históricos que han marcado su desempeño estructural (tal y como aparece en la Tabla 1), pero por el momento no se realizó ningún procedimiento de encadenamiento sucesivo, por lo que cada caso de estudio es independiente de los otros y único en el tiempo (como se describirá más adelante en el apartado de casos de estudio).

eventos históricos que han marcado su desempeño estructural (tal y como aparece en la Tabla 1), pero por el momento no se realizó ningún procedimiento de encadenamiento sucesivo, por lo que cada caso de estudio es independiente de los otros y único en el tiempo (como se describirá más adelante en el apartado de casos de estudio).

Definición de escenarios

Del seguimiento de los diversos eventos históricos que se han presentado a lo largo de la vida del **Frontispicio**, desde un punto de vista mecánico-estructural se pueden redefinir los principales escenarios fenomenológicos ordinarios y extraordinarios a los que ha estado sujeta la estructura y que han marcado tanto su deterioro como su desempeño. En términos ingenieriles a estos escenarios se les identifica burdamente como las posibles “combinaciones de carga”.

En esta metodología de revisión de edificaciones históricas entendemos por fenomenologías al conjunto de procesos físicos de índole diversa que al aplicarse a un sistema estructural producen una respuesta, y que dependen directamente de una variable identificable [Lourenço, 2013] [Lourenço, 2006] [Lourenço, 2006-b]. Sólo como referencia, en la Tabla 2 se presentan algunas de estas fenomenologías con sus respectivas variables de Estado Local, así como las llamadas “Variables dependientes asociadas”.

Tabla 2. Fenomenologías posibles con sus correspondientes variables de estado

FENOMENOLOGÍAS	VARIABLES DE ESTADO LOCAL	VARIABLES DEPENDIENTES ASOCIADAS
Estática (Mecánica)	Desplazamientos traslacionales y rotacionales	Deformaciones, esfuerzos, elementos mecánicos
Dinámica (Mecánica)	Desplazamientos, velocidades, aceleraciones	Deformaciones, esfuerzos, elementos mecánicos
Térmica	Temperatura	Deformaciones y esfuerzos térmicos, calor (energía)
Mecánica del Medio Poroso y flujo	Concentración	Flujo, masa, etc.
Otras fenomenologías	...	...

Vale la pena señalar que la identificación de las fenomenologías y sus acoplamientos no es una práctica común en los despachos de cálculo, pues generalmente los análisis numéricos que ellos desarrollan se enfocan a estructuras convencionales modernas, abordando únicamente aspectos mecánico-estructurales y dejando de lado otras posibles fenomenologías que en el ámbito civil no son comunes en una cierta región.

En el ámbito militar, fenómenos como impacto, explosión, incendio, inundación, atentado, etc. son del orden común y no es inviable pensar que una estructura histórica de uso militar haya estado expuesta a este tipo de fenomenologías, por lo que de ningún modo deben descartarse.

Para el caso del **Frontispicio**, no se detectó algún evento particular que haya marcado el desempeño de la edificación (como podría haber sido un incendio), por lo que los escenarios detectados son los que se asientan en la Tabla 3.

Algunos de los escenarios condensan en un solo evento múltiples situaciones similares aparentemente repetitivas, como es el caso de los sismos. Otros son singulares y probablemente irrepetibles, como es la construcción de una línea subterránea de metro que, sin embargo, no pudo ser documentada y en consecuencia, no se pudo modelar.

La delimitación de los escenarios permite conceptualizar matemáticamente el problema de las solicitaciones y de las condiciones límite, y establecer un posible procedimiento de análisis que permita reproducir de forma virtual, la respuesta que la estructura desarrolló cuando se sujetó a una determinada combinación de cargas reales.

Tabla 3. Escenarios relevantes derivados de la historia del Frontispicio.

ESCENARIO	FENOMENOLOGÍAS	SOLICITACIONES	CASO DE ESTUDIO
Hundimiento por consolidación	Cuasi-estático (Mecánica)	Carga gravitacional combinada con consolidación temporal de suelo, con y sin daño continuo	C1-HEL: Hundimiento Elástico Lineal
Sismo con configuración original	Dinámico (Mecánica)	Carga gravitacional con excitación sísmica artificial o registrada en sitios cercanos	C2-SEL: Sismo Elástico Lineal

Estrategia adoptada para la simulación numérica

El método de los elementos finitos es una técnica matemática que consiste en simular un objeto o sistema estructural a través del ensamblado de un conjunto de figuras geométricas de dimensiones conocidas muy pequeñas; cada figura está definida por un conjunto de funciones que permiten construir una matriz de rigidez “*elemental*” o propia, en la cual se integra el comportamiento del material en unos puntos precisos (puntos de Gauss, generalmente): el comportamiento puede ser lineal o no lineal, en pequeñas deformaciones o considerando grandes transformaciones. La solución del sistema se alcanza a través de una formulación matricial basada en rigideces x desplazamientos = fuerzas, y las interacciones entre objetos múltiples se consiguen mediante la construcción de una rigidez ficticia asociada a algoritmos de contacto.

El método como cualquier otro procedimiento numérico está integrado por tres etapas claramente definidas, aunque vale la pena señalar que muchos programas comerciales “*disfrazan*” estas etapas al usuario, con el fin de asemejarse al procedimiento manual con el que están acostumbrados a trabajar los ingenieros calculistas. Las etapas mencionadas son: (I) Pre-proceso; (II) Cálculo matricial y solución global; (III) Post-tratamiento o resultados locales.

Identificación de parámetros y técnicas numéricas

Derivado de los escenarios, y en función de los datos paramétricos obtenidos, la dificultad de construcción del modelo, de la capacidad de cálculo en términos de *software* y *hardware*, del tiempo disponible y sobre todo, de la importancia de la simulación para determinar el desempeño de la estructura, se debe hacer un programa de selección y construcción de modelos numéricos así como posibles encadenamientos y secuencias. En el caso del **Frontispicio**, a partir de la evaluación de los escenarios se definieron seis casos de estudio, siendo éstos:

- 1) C2-HEL. Hundimiento Elástico Lineal:** Caso de hundimiento con desplazamiento incremental inducido, considerando comportamiento elástico lineal para la mampostería (Tabla 4).
- 2) C5-SEL. Sismo Elástico Lineal:** Caso de sismo de 1985 con excitación registrada en SCT, considerando comportamiento elástico lineal para la mampostería (Tabla 5).

Tabla 4. Caso de estudio C2-HEL, para hundimiento de tipo cuasi-estático con comportamiento elástico lineal para mampostería.

1	
CASO DE ESTUDIO	C2-HEL: Hundimiento Elástico Lineal
ELEMENTOS FINITOS	Sólidos tridimensionales simplex de 8 nodos, con 8 puntos de integración
CONDICIONES LÍMITE	Empotramiento en una línea de borde
SOLICITACIONES	Carga gravitacional combinada con desplazamientos impuestos
MODELOS DE MATERIALES	Mampostería homogeneizada simulada con comportamiento elástico lineal
MÉTODO DE ANÁLISIS NUMÉRICO	Cuasi-estático incremental resuelto con el método de Gauss o similar

Tabla 5. Caso de estudio C5-SEL, sismo con excitación registrada en SCT, considerando comportamiento elástico lineal para la mampostería.

2	
CASO DE ESTUDIO	C5-SEL: Sismo Elástico Lineal
ELEMENTOS FINITOS	Sólidos tridimensionales simplex de 8 nodos, con 8 puntos de integración
CONDICIONES LÍMITE	Empotramiento total en toda la base
SOLICITACIONES	Carga gravitacional combinada con señal sísmica SCT
MODELOS DE MATERIALES	Mampostería homogeneizada simulada con comportamiento elástico lineal
MÉTODO DE ANÁLISIS NUMÉRICO	Dinámico lineal tipo Newmark combinado con el método de Gauss o similar

Caracterización experimental de materiales de la época

El conocimiento de las características, propiedades y comportamiento de los materiales utilizados en los edificios, nos permite una mejor comprensión de la efectividad de los sistemas constructivos empleados. Estos estudios tienen la finalidad de conocer la relación que guardan esfuerzos y deformaciones en el tiempo del material que está sometido a diferentes combinaciones de carga. Para realizar estos estudios, y con base en las recomendaciones establecidas en la metodología propuesta, se tomaron muestras de uno de los sótanos del edificio. Se realizaron pruebas a compresión a dos pilas, obteniendo un $E_m = 3496 \text{ kg/cm}^2$ y un valor de $f_m^* = 9.7 \text{ kg/cm}^2$. Respecto a pruebas a cortante se realizaron pruebas a dos muretes obteniendo valores de $v_m^* = 0.7 \text{ kg/cm}^2$ y $G_m^* = 1349 \text{ kg/cm}^2$ (ver Figs. 1 y 2). Es interesante señalar que las resistencias registradas experimentalmente presentan valores muy inferiores respecto a los que se hubieran obtenido analíticamente con cualquier expresión reglamentaria moderna.

Fig. 1. Curva esfuerzo-deformación del comportamiento a la compresión obtenida experimentalmente de muestras extraídas del Frontispicio

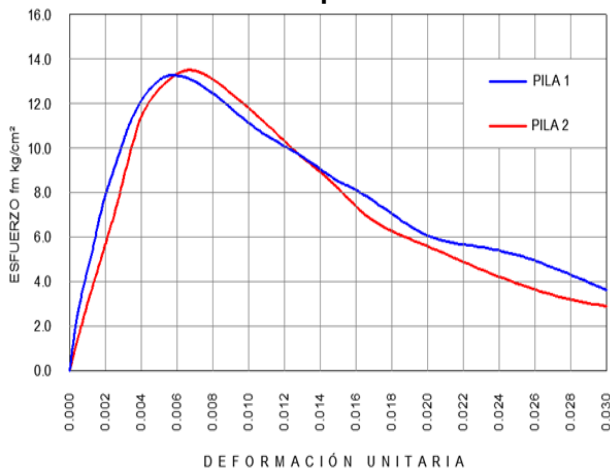
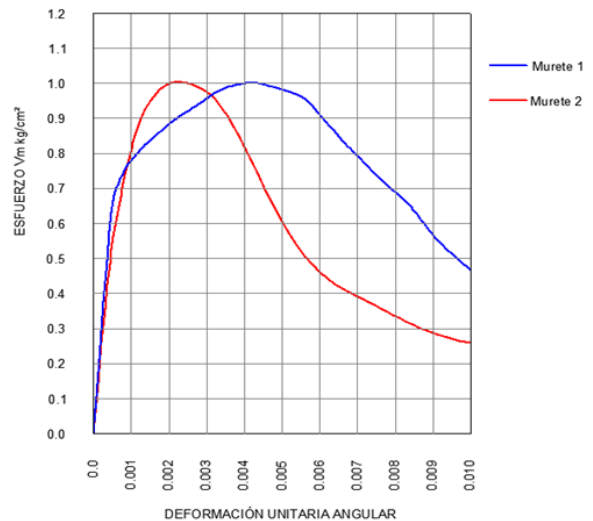


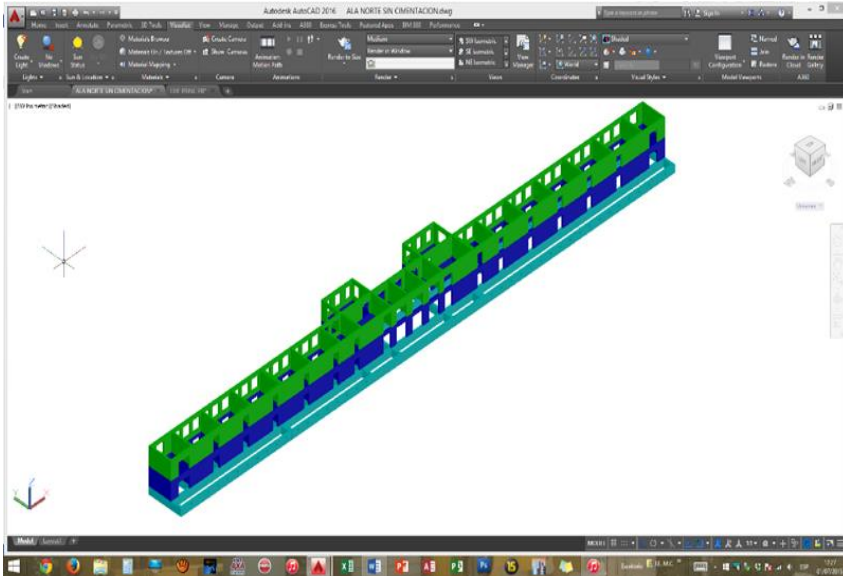
Fig. 2. Curva esfuerzo-deformación del comportamiento a la compresión diagonal obtenida experimentalmente de muestras extraídas del Frontispicio.



Selección de programas computacionales CAD

Para construir el modelo tridimensional del edificio, se empleó el programa AUTOCAD®, se emplearon elementos sólidos para conformar la geometría del modelo [Autodesk, 2013]. Las pequeñas salientes y diagonales que presentan algunos muros, fueron simplificadas para contar con ángulos ortogonales. En la figura 3 se muestra el modelo del edificio realizado en el programa de CAD.

Fig. 3. Construcción en AUTOCAD® del modelo físico tridimensional previo a la exportación para mallado



SALOME

Es un software libre para pre-procesado y post-procesado en simulaciones CFD y numéricas en general [Open Cascade, 2015]. Incluye aplicaciones para generar modelos de CAD3D y mallas. Permite crear, modificar, importar/exportar diversos formatos como IGES, STEP, BREP, etc. y permite mallar modelos de CAD, comprobando calidades de malla e importar/exportar mallas en diversos formatos. Integra en ella diferentes módulos, como **Code_Aster** para problemas mecánicos y **Code Saturne** para simulaciones CFD.

Este programa integra las herramientas necesarias para realizar estudios científicos de problemas multi-físicos; térmicos, fluidos, mecánicos, entre otros. En su versión más básica, Salome-Meca está integrado por los siguientes módulos: Geométrico, Mallado y Post-proceso.

ASTER

Code_Aster es un programa libre y gratuito para el análisis de elementos finitos y simulación numérica en mecánica estructural y multifísica [Électricité de France, 2012]. Su aplicación abarca múltiples disciplinas: análisis tridimensional mecánico y térmico, hidrodinámica, metalurgia, hidratación, secado... ya sea en condiciones estacionarias o transitorias, y tanto para procesos lineales como no lineales; posee herramientas específicas para el cálculo de la fatiga, las deformaciones diferidas, la fractura, el contacto, problemas específicos de geotecnia, materiales porosos, etc. La combinación de estas herramientas con los diversos programas de pre- y pos-procesado le permiten abarcar áreas como acústica, sísmica, energía atómica y otras. Desarrollado por **Électricité de France** (EDF) para el estudio y mantenimiento de plantas y redes eléctricas, tiene Licencia Pública GNU (General Public License). **Code_Aster** está disponible oficialmente para Linux y Free BSD.

PARAVIEW

Es una aplicación de código abierto, para el análisis de datos multiplataforma y una aplicación para la visualización [Ahrens et al., 2005]. Los usuarios de **ParaView** pueden crear rápidamente visualizaciones para analizar sus datos utilizando técnicas cualitativas y cuantitativas. La exploración de datos se puede realizar de forma interactiva en 3D o mediante programación con capacidades de procesamiento por lotes de **ParaView**. Es una gran herramienta para mostrar la malla de entrada y los resultados obtenidos del *solver* basado en el Método de los Elementos Finitos.

Construcción del modelo base

Un **modelo base** numérico es la construcción virtual de un sistema -caracterizado por su geometría y sus propiedades materiales- delimitado por unas consistentes condiciones de frontera (Condiciones-Límite Esenciales: CLE), y sujeto a un conjunto de solicitaciones físicas que pueden evolucionar total o parcialmente con el tiempo (Condiciones-Límite Naturales: CLN).

Desde esta perspectiva, varios modelos pueden tener en común únicamente el sistema estructural y combinarse con diversos conjuntos de condiciones límite y/o solicitaciones dependiendo del escenario por simular: en otras palabras, se puede construir una representación virtual de un sistema estructural (mallado) en el que se incorpore un comportamiento particular de los materiales

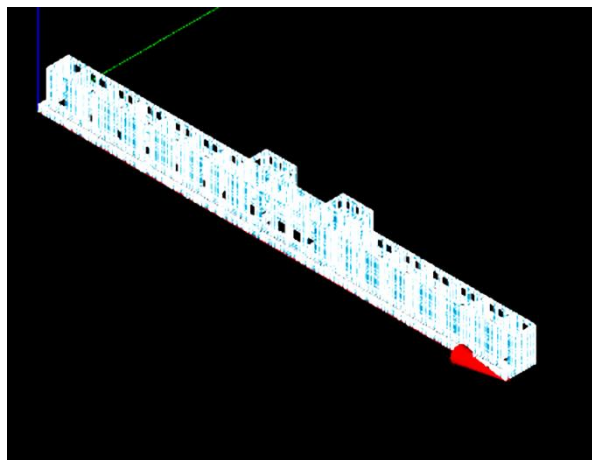
(elástico lineal, por ejemplo), y posteriormente se le asigna un conjunto de apoyos específicos, así como un conjunto de solicitaciones (desplazamientos o fuerzas) que pueden o no variar con el tiempo.

La construcción del modelo depende en gran medida de las capacidades y limitaciones de los recursos informáticos disponibles, y particularmente, de las herramientas integradas en las plataformas numéricas por utilizar. Dado que para el caso del **Frontispicio** se utilizaron diversos recursos computacionales, se requirió construir un modelo base común para los dos escenarios en estudio, dividiendo así la etapa del pre-proceso en dos fases: en la primera fase se construyó un modelo geométrico para la posterior creación del mallado; en la segunda fase, se reescribió el modelo numérico para cada escenario mediante la escritura en un archivo con extensión .COMM, de los comandos necesarios para su análisis en **Code_Aster**.

Geometría

En la primera fase de la etapa del pre-proceso, se construye propiamente lo que se conoce como un modelo numérico de un problema físico dado. Esencialmente, se trata de reconstruir el objeto en estudio (en nuestro caso, la edificación histórica) a través de un mallado, asignarle un conjunto de propiedades materiales y geométricas, sujetarlo o brindarle apoyos en ciertos puntos y someterlo a varias combinaciones de carga. Desde el punto de vista de los ingenieros, esta etapa se asocia con el efecto de “dibujar” al objeto de estudio considerando únicamente los elementos que conforman la estructura de soporte, es decir, retirando los elementos no estructurales u ornamentales que no participan directamente en el sistema. Como se mencionó anteriormente, la geometría fue creada en el programa **AUTOCAD®**, para después exportarla al programa **SALOME**. Se emplearon elementos sólidos tridimensionales simplex de 8 nodos, con 8 puntos de integración. En **SALOME**, se crea la malla del edificio, se generan los grupos de superficie, donde se aplicarán las cargas o se asignarán las restricciones, definiéndose el tipo de elemento finito por emplear (ver figura 4).

Fig. 4. Construcción del mallado tridimensional en SALOME



Comportamiento de materiales

Esta sección forma parte de la segunda fase de la etapa conocida como PRE-PROCESO. En esta se definen los parámetros que caracterizan el comportamiento del material (o materiales) que se emplearán en el modelo, tanto en el rango elástico como –en caso de implementarse- en el rango inelástico. Los parámetros elásticos utilizados provienen del reporte experimental de materiales descrito previamente. Para el comportamiento no lineal, de la librería de **Code_Aster** se empleó el modelo de comportamiento de daño continuo de *Jacky Mazars* el cual distingue entre el comportamiento a la tracción y la compresión, empleando sólo una variable de daño de tipo escalar.

Hundimiento elástico

Condiciones límite

De acuerdo a lo reportado en el levantamiento topográfico respecto a los hundimientos registrados en el **Frontispicio**, se aprecian hundimientos diferenciales a lo largo del inmueble, que alcanzan entre ciertos puntos un valor relativo máximo de 24 cm.

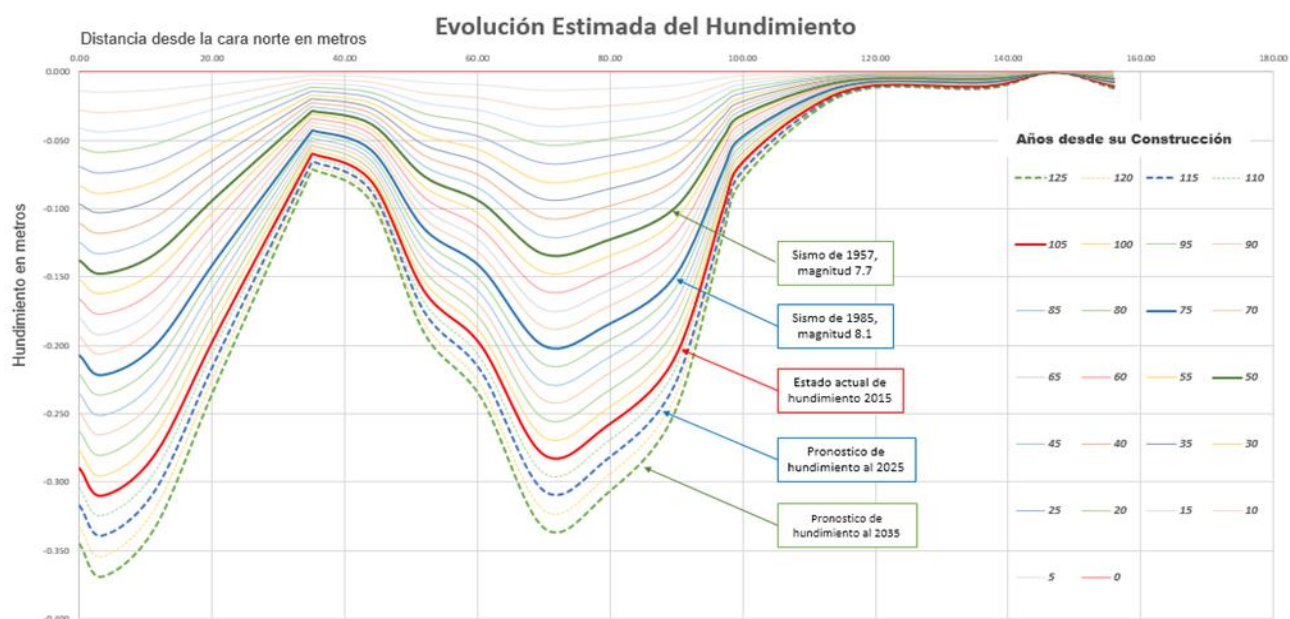
Desgraciadamente, no se cuenta con registro sobre la velocidad de la consolidación del suelo, por lo que se adoptó la hipótesis de que esta velocidad se ha mantenido constante desde la construcción del inmueble en 1910 hasta la fecha.

Considerando que el desplazamiento máximo absoluto registrado es de 31 cm en un lapso de 105 años, se obtuvo una razón de hundimiento de 2.95 mm/año.

hundimiento reportados se impusieron como desplazamientos negativos en la base de cada uno de los cuerpos del **Frontispicio** en las coordenadas correspondientes, y mediante una función de interpolación se distribuyeron en el resto de los nodos de la base. Para estabilizar la matriz de rigidez y evitar un mal condicionamiento por movimiento de cuerpo rígido, se empotró una línea de nodos – desplazamientos nulos en X, Y Z- ubicada en el borde sur del **Frontispicio**.

En relación con el tiempo, los desplazamientos se incrementaron linealmente con la misma velocidad constante en todos los puntos, adquiriendo la configuración que se observa en la figura 5. Aplicando la hipótesis de velocidad constante de consolidación del suelo (0.295 cm/año) a falta de información en este aspecto, se hizo una **proyección del hundimiento para los próximos 10 y 20 años futuros** (es decir, para los años 2025 y 2035).

Fig. 5. Evolución del hundimiento a lo largo del Frontispicio



Como primera aproximación al problema del hundimiento, se hizo una simulación de hundimiento proporcional a lo largo de la edificación: para ello se impuso una condición particular al apoyo, que restringe los 6 grados de libertad (empotramiento) y al resto de los nodos de la base se les impuso un desplazamiento máximo en la dirección “z” de 0.24 m.

Este desplazamiento será subdividido posteriormente para un análisis incremental. No obstante la simulación realizada, en la realidad el **Frontispicio** está dividido en tres grandes cuerpos, los cuales han presentado diferentes trayectorias de hundimiento, con un mayor desplazamiento en el costado norte (en la cara cercana a la Avenida México-Tacuba).

Por lo anterior, en una segunda aproximación mucho más cercana al hundimiento real observado en la estructura, se definieron tres grupos de funciones que distribuyen espacialmente el hundimiento en la base del **Frontispicio**. Las tres funciones se nombraron: Hu_Z2, Hu_Z3 y Hu_Z4, y corresponden a los tres cuerpos de la estructura.

Solicitaciones

En este caso de estudio, se deben incluir todas las solicitaciones que han estado presentes a lo largo de su historia, como es el peso propio y los empujes laterales del suelo, entre otras. Si existen empujes en cimentación por causa del terreno o presiones de agua, estas deben aplicarse en las caras laterales ya declaradas en el modelo y en la malla. Para todos los casos en general, debido a que la presión lateral del suelo resulta muy baja, se decidió aplicar una presión homogénea en los costados del **Frontispicio** para apreciar algún efecto secundario sobre la cimentación.

Método de análisis

Uno de los grandes inconvenientes de utilizar programas comerciales con métodos de análisis preestablecidos, es que no permiten a un analista avanzado el combinar secuencialmente diversas etapas de excitación: para casos de estudio no convencionales como el del **Frontispicio**, el tipo de fenomenología o tipos de fenomenologías son los que rigen en el análisis del sistema estructural modelado, así como en la selección del tipo de elemento finito por utilizar. Debe señalarse que no todos los elementos finitos están programados para acoplar y resolver diferentes fenomenologías de forma simultánea. De manera resumida, todos los trabajos realizados en el pre-proceso que se describieron con gran detalle se reducen a lo siguiente:

- Calcular los coeficientes que integran la matriz de rigidez de cada elemento y después ensamblar cada una de estas matrices en una sola matriz global del sistema estructural;
- Ensamblar en un solo vector, las fuerzas externas que se están aplicando al sistema – incluyendo peso propio-; y
- Establecer las restricciones nodales que evitan que el sistema esté mal condicionado y por lo tanto, no pueda ser resuelto;

Una vez que se completan los pasos anteriores, podemos decir que el modelo numérico está listo para ser analizado. Ahora bien, tal y como se describió para cada uno de los modelos en los respectivos cuadros sinópticos, se requiere establecer una estrategia de análisis particular que dependerá del tipo de fenomenologías por acoplar y resolver. Al hablar de una estrategia, nos referimos a acoplar diversas metodologías que a mayor complejidad del problema, requieren de un mayor cuidado para su selección y acoplamiento.

La metodología más simple se remite a resolver un sistema de ecuaciones lineales con el método de eliminación Gaussiana– o similar. A medida que se incrementa la complejidad y las solicitudes se vuelven evolutivas- es decir, dependientes del tiempo-, se requiere utilizar otras metodologías tales como el método de Newton (para la solución de problemas no lineales) y/o el método de **Newmark** (para sistemas dinámicos de segundo orden). Esto involucra la adopción y desarrollo de otros algoritmos que controlan la evolución de las solicitudes o la modificación de la matriz de rigidez a cada instante de tiempo, así como la implementación de funciones adicionales. Dentro de los códigos de análisis numérico, el conjunto de algoritmos que permiten resolver el sistema se conoce como “*Motor de cálculo*”, y su eficacia depende del tiempo que emplea para llevar a cabo la resolución y sobre todo, la calidad de los resultados obtenidos. Debe advertirse que no todos los programas permiten que los usuarios controlen este proceso, y limitan su acción simplemente a seleccionar el tipo de análisis que les parezca el más indicado para el problema que se pretende solucionar.

Cuando alguna variable del problema se modifica y evoluciona a través del tiempo, el problema deja de ser estacionario y se vuelve incremental. En estos análisis, el tiempo se puede manejar desde dos perspectivas:

- Como **tiempo real**, en particular para los análisis dinámicos en donde se activan los efectos inerciales, de manera que las unidades de tiempo se vuelven imprescindibles para el cálculo.
- Como un **pseudo-tiempo**, en particular en problemas llamados cuasi-estáticos en donde los efectos inerciales no se activan, de modo que la unidad de tiempo es intrascendente y no tiene algún sentido físico.

Para el análisis del hundimiento, se requiere que éste evolucione respecto a un **pseudo-tiempo**, de modo que el conjunto de desplazamientos impuestos en la base de la estructura varíe espacialmente de manera no uniforme. Para ello, se requiere definir una función multiplicadora de tipo evolutivo, similar a la utilizada en las secciones previas para la distribución espacial de los hundimientos.

Posteriormente, sin ser obligatorio pero siendo altamente recomendable, se puede crear una lista de valores estrictamente creciente, que represente los instantes exactos que se quieren analizar

mediante el programa. La lista puede ser aportada "completamente" por el usuario, o puede estar formada a partir de valores definidos en otras listas que "no son constantes". Para el caso que nos ocupa, se requiere realizar un análisis incremental de tipo **cuasi-estático**. Para ello se calculará la evolución mecánica cuasi-estática de los esfuerzos, que puede convertirse en no lineal, si se vincula con el comportamiento inelástico del material (por ejemplo, adoptando el modelo clásico de plasticidad), o la geometría (por ejemplo, en grandes desplazamientos), etc.

Análisis sísmico “paso a paso” con comportamiento elástico

Condiciones límite

Para este caso se aplica al grupo de nodos de la base, una restricción en los ejes X, Y, Z, ($DX=0.0$, $DY=0.0$, $DZ=0.0$).

Solicitaciones

Como en la mayoría del software de análisis y diseño estructural, es común definir previamente la señal sísmica. Para este caso de estudio se seleccionó un acelerograma de desplazamientos de la estación SCT, correspondiente al sismo del 19 de septiembre de 1985, aplicado en la dirección “Y” del modelo.

Método de análisis

Para este caso de estudio, es necesario calcular las matrices de rigideces, la de masas de los elementos indicando el material, las condiciones de apoyo para que posteriormente sean ensambladas. Una vez que se han ensamblado las matrices, se calcula la respuesta dinámica transitoria a cualquier excitación temporal. El tiempo de carga se administra como una combinación lineal de vectores de fuerza aplicados constantes en el tiempo. Se pueden aplicar directamente en forma de vectores o la forma de cargas que se ensamblan en el algoritmo; se define el modelo, el material, las matrices de masa, rigidez y amortiguamiento, el esquema de integración, por default (NEWMARK), la excitación externa o carga con su dirección y la lista incremental.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Hundimiento Elástico

En la actualidad, resulta común que en los modelos en los que se trata de reproducir la interacción entre estructura y suelo, se simule a éste último por medio de resortes autónomos e independientes, cuya rigidez está determinada por un valor experimental conocido como “*módulo de reacción*” del suelo. Comúnmente, el objetivo de estos modelos es predecir el valor del hundimiento ante la aplicación de cargas gravitacionales sostenidas, lo cual depende directamente de las características de la consolidación del suelo. En el caso del **Frontispicio**, se hizo un registro geométrico de los hundimientos observados en el sitio, sin contar con algún valor de referencia para el módulo de reacción del suelo. Con base en lo anterior, se propuso como hipótesis fuerte que los hundimientos se pueden imponer como desplazamientos negativos en la base del **Frontispicio**, siendo el resultado de la consolidación del suelo a lo largo de los más de cien años de existencia del inmueble.

Esto induciría el daño en la estructura independientemente al comportamiento real del suelo arcilloso de la zona.

Debido a que se carece de datos de hundimiento a lo largo del tiempo, se consideró calcular una velocidad constante de consolidación dividiendo el hundimiento máximo registrado entre los 105 años de existencia del inmueble.

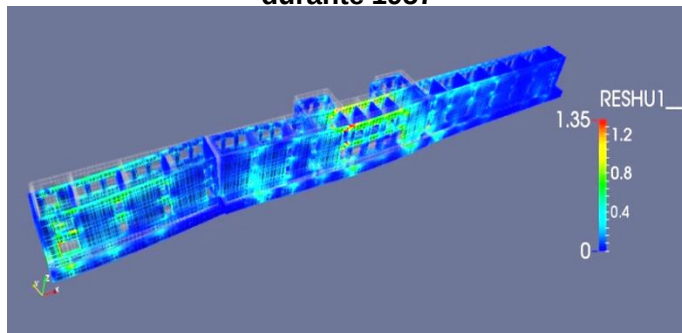
Evidentemente, desde un punto de vista geotécnico, esto no es un valor real de consolidación, pues debe distinguirse la consolidación primaria -que ocurre casi de forma inmediata- de la consolidación secundaria, la que está determinada por las características propias de las arcillas blandas. Esto define sin lugar a dudas, dos velocidades de consolidación para periodos de tiempo diferentes, de modo que la consolidación primaria puede producir un daño temprano en la estructura que no coincida con lo estimado en el modelo.

No obstante lo anterior, la posible aparición temprana del daño no afecta de modo alguno la distribución y progresión del daño en la estructura, en tanto no se hayan tomado acciones inmediatas de reforzamiento, de lo cual tampoco se tiene evidencia

De igual forma, se decidió adoptar un comportamiento elástico lineal para la mampostería, de modo que se considerara como zona dañada, cualquier región en el **Frontispicio** cuyo estado de esfuerzos elásticos rebasara el límite elástico establecido en el estudio experimental aplicado a los materiales de la época (1.3 MPa). Evidentemente como sucede con cualquier modelo elástico, el modelo no distribuye correctamente los esfuerzos ni fuerzas mecánicas internas, en cuanto alguna región incursiona físicamente en el rango inelástico (ya sea porque se agrieta, se plastifica, se fractura, se pulveriza, etc.), pero permite identificar de manera aceptable, las zonas en donde potencialmente podrían ocurrir daños importantes.

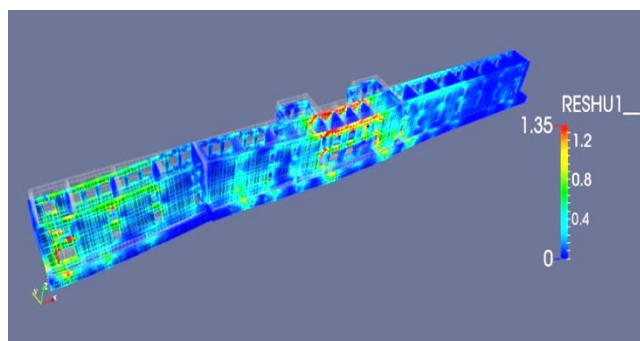
En la figura 7 se puede observar la distribución de los esfuerzos elásticos equivalentes calculados para el hundimiento estimado en 1957 con una velocidad de consolidación constante. Las zonas indicadas con color rojo representan valores de esfuerzos superiores al límite elástico, susceptibles de desarrollar daño.

Fig. 7. Distribución de esfuerzos elásticos equivalentes provocados por hundimiento, durante 1957



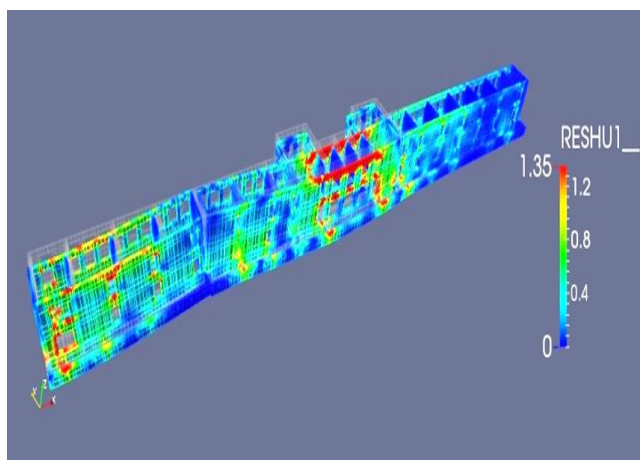
En la figura 8 se puede observar la distribución de los esfuerzos elásticos equivalentes calculados para el hundimiento estimado en 1985 con una velocidad de consolidación constante. Las zonas indicadas con color rojo representan valores de esfuerzos superiores al límite elástico, susceptibles d

Fig. 8. Distribución de esfuerzos elásticos equivalentes provocados por hundimiento, durante 1985



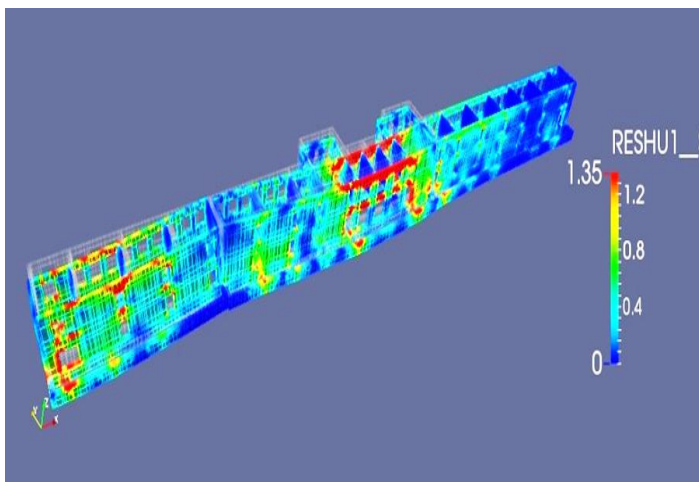
En la figura 9 se presenta una predicción de la distribución de los esfuerzos elásticos equivalentes que se tendría para el año 2025, si se mantiene la velocidad de consolidación constante, en donde el hundimiento máximo alcanzaría un valor de 36.9 cm, tanto en una vista global (a), como en dos acercamientos: (b) al cuerpo central del **Frontispicio**; (c) a la cara extrema del cuerpo Norte del **Frontispicio**. Las zonas indicadas con color rojo representan valores de esfuerzos superiores al límite elástico, susceptibles de desarrollar daño.

Fig. 9. Predicción de la distribución de esfuerzos elásticos equivalentes provocados por hundimiento, para 2025



En la figura 10 se presenta una predicción de la distribución de los esfuerzos elásticos equivalentes que se tendría para el año 2035, si se mantiene la velocidad de consolidación constante, en donde el hundimiento máximo alcanzaría un valor de 39.9 cm. Las zonas indicadas con color rojo representan valores de esfuerzos superiores al límite elástico, susceptibles de desarrollar daño.

Fig. 10. Predicción de la distribución de esfuerzos elásticos equivalentes provocados por hundimiento, para 2035



Sismo Elástico Lineal

En este modelo numérico, el objetivo es evaluar la respuesta sísmica del **Frontispicio** considerando un comportamiento elástico lineal, así como un empotramiento total en su base. Se introdujo la señal registrada en la SCT durante el sismo de 1985, con pequeñas modificaciones para abarcar la mayor parte del evento sísmico. Con el auxilio de los registros de desplazamiento para 500 instantes de tiempo, se hizo un análisis paso a paso con el auxilio del método de Newmark.

En términos generales, los desplazamientos calculados son pequeños en extremo, apreciándose un desplazamiento máximo en el pico de la señal de 6.54 mm, el cual se presentaría en la parte superior del cuerpo Central del **Frontispicio**.

En las figuras 11 a 19 se muestra la distribución de los desplazamientos horizontales en la dirección corta del edificio, para diferentes instantes de tiempo (0s, 6.12s, 12.92s, 19.72s, 26.52s, 33.32s, 40.12s, 46.92s, 53.72s).

Fig. 11. Configuración deformada (desplazamientos horizontales en la dirección corta), instante 0s.

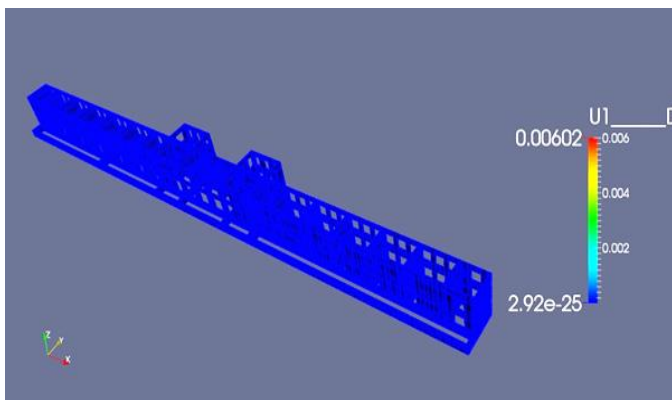


Fig. 12. Configuración deformada (desplazamientos horizontales en la dirección corta), instante 6.12 s.

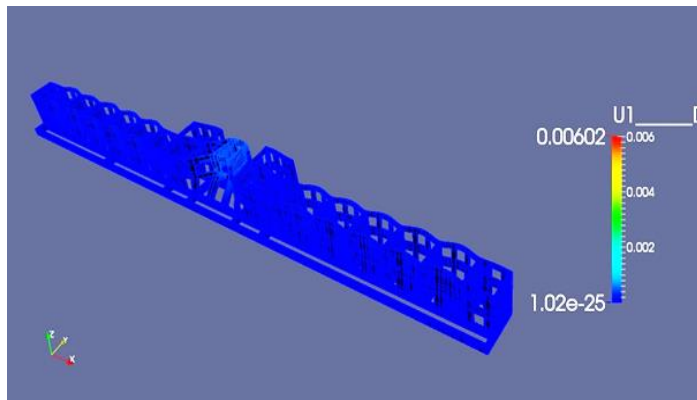


Fig. 13. Configuración deformada (desplazamientos horizontales en la dirección corta), instante 12.92 s.

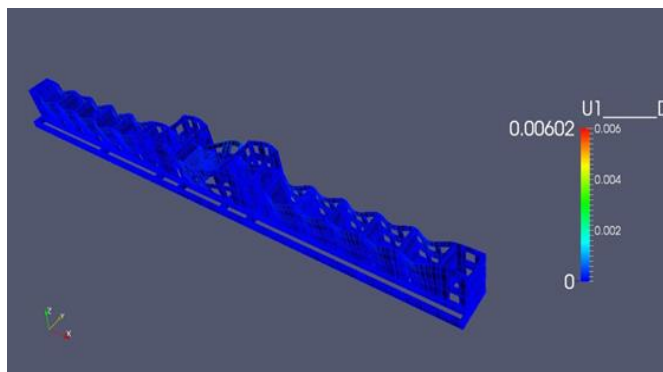


Fig. 14. Configuración deformada (desplazamientos horizontales en la dirección corta), instante 19.72 s.

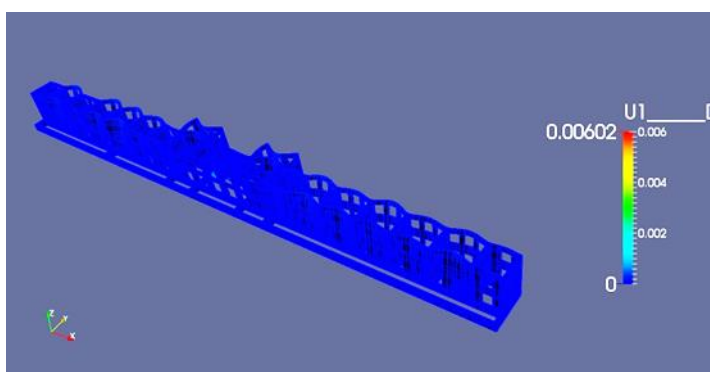


Fig. 15. Configuración deformada
(desplazamientos horizontales en la dirección
corta), instante 26.52 s.

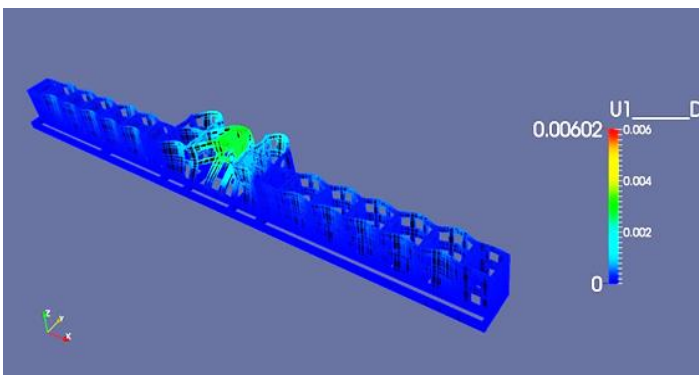


Fig. 16. Configuración deformada
(desplazamientos horizontales en la dirección
corta), instante 33.32 s.

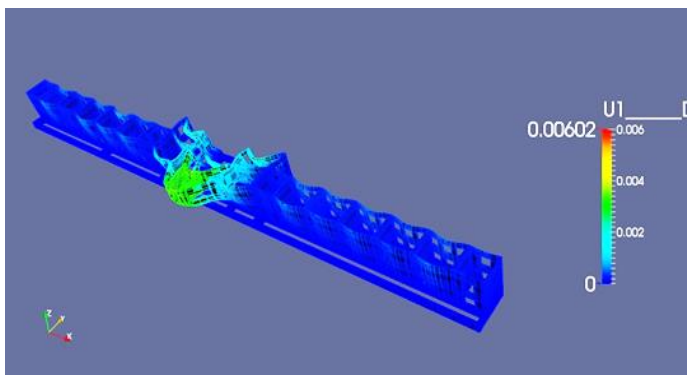


Fig. 17. Configuración deformada
(desplazamientos horizontales en la dirección
corta), instante 40.12 s.

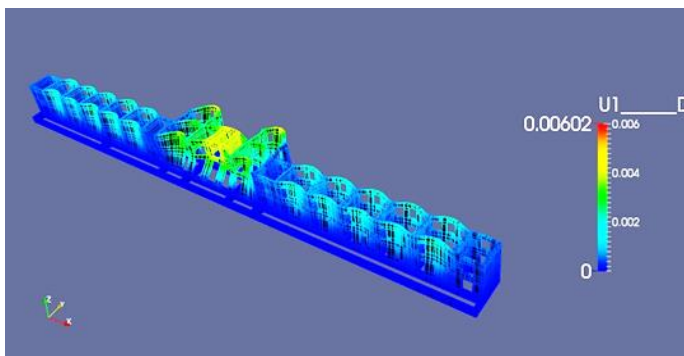


Fig. 18. Configuración deformada
(desplazamientos horizontales en la dirección
corta), instante 46.92 s.

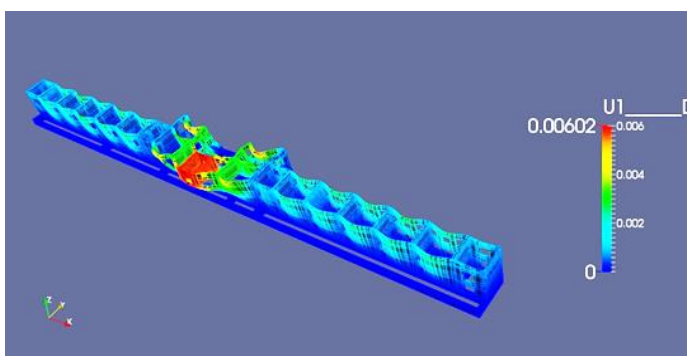
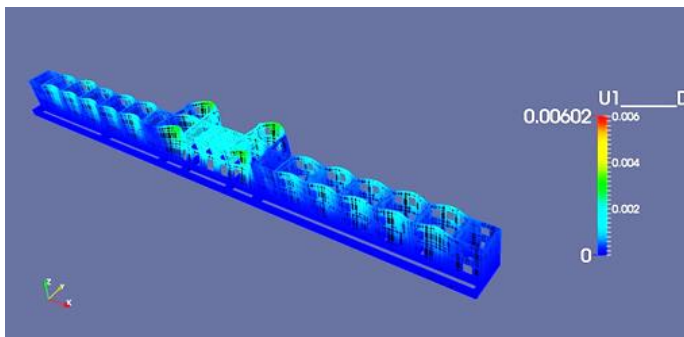


Fig. 19. Configuración deformada
(desplazamientos horizontales en la dirección
corta), instante 53.72 s.



La comparación de los resultados obtenidos a partir del análisis de los dos modelos numéricos nos permite dictaminar el estado actual del **Frontispicio**, y hacer un pronóstico de lo que podría sucederle en un periodo no mayor de veinte años en caso de que no se tomen las medidas pertinentes para su rehabilitación [Peña y Lourenco, 2012].

La plasticidad de las arcillas del suelo soportante ha producido hundimientos diferenciales que alcanzan hasta 24 cm entre los puntos más distantes, trayendo consigo una reconcentración de cargas y esfuerzos en puntos clave de la estructura.

Debido a los notables cambios de rigidez que se presentan en las zonas de transición entre el cuerpo central y las alas del edificio, se han concentrado los esfuerzos de tensión y cortante en dichas regiones produciendo agrietamientos y fracturas visibles en los muros de mampostería, tal y como lo muestran los modelos, y que coinciden con lo observado físicamente en el sitio.

Debe remarcarse que históricamente, se le hizo una intervención estructural al edificio separándolo en tres cuerpos aislados en apariencia, de lo cual no existe registro alguno, pero que evidentemente fue producto del daño que ya se estaba desarrollando en el inmueble y que el modelo numérico reproduce notablemente.

Sin tener un conocimiento preciso de la velocidad real de consolidación, la hipótesis adoptada de aplicar una velocidad de consolidación constante, muestra consistencia al permitirnos reproducir e identificar numéricamente las regiones que han sufrido más daño y evaluar su evolución con el paso del tiempo. Es notable apreciar la coincidencia del daño estimado numéricamente con las zonas de agrietamiento reales que si bien, han sido reparadas y/o remozadas recientemente, han dejado su huella visible en la estructura.

El modelo de hundimiento con comportamiento elástico permite hacer una evaluación de la evolución de los esfuerzos aún si rebasan el límite de resistencia elástica proporcionado por los estudios experimentales.

Con la hipótesis de velocidad de consolidación constante se hizo una predicción elástica a 10 y 20 años a partir de este año (2015), y se puede apreciar que los esfuerzos alcanzan valores hasta cuatro veces más altos que los establecidos para el límite elástico. Este modelo permite identificar la generación de vastas regiones susceptibles de daño que pueden formar articulaciones inelásticas e inducir colapsos parciales tanto en el cuerpo central como en la cara norte del **Frontispicio**.

En relación a la respuesta que tendría el **Frontispicio** ante un evento sísmico de importancia, se constató a través del modelo, que aún un sismo intenso similar al que se registró en 1985 no representa un gran riesgo para la estructura, ya que es lo suficientemente estable como para soportar sus efectos. No obstante, en caso de que continúen los asentamientos diferenciales y se produzcan regiones susceptibles de falla, la estabilidad podría estar en riesgo por los potenciales mecanismos que podrían haberse engendrado a lo largo del tiempo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta de manera general, una metodología ingenieril para la evaluación de la integridad y estabilidad estructural de edificaciones históricas, la cual servirá de base para una guía interna de revisión del patrimonio de las fuerzas armadas, y en un contexto más amplio, podría servir como un método alternativo para la evaluación del patrimonio histórico y artístico de la Nación Mexicana. Esta metodología se aplicó de forma particular en el edificio militar de mampostería conocido como **"Frontispicio"**, el cual actualmente es sede de la Escuela Militar de Ingenieros. Con la metodología propuesta, fue posible identificar el estado actual de daño de dicha estructura histórica, lo que incluye la ubicación del agrietamiento y el grado de degradación de varios elementos estructurales, sus posibles causas, y sobre todo, las potenciales regiones de daño y colapso, en caso de que no se tomen las medidas pertinentes de reforzamiento.

El trabajo es arduo y en el caso de evaluación de edificios históricos, se requiere de un equipo multidisciplinario para llevarlo a cabo, además de que el ingeniero que realice la evaluación estructural debe contar con un amplio conocimiento en análisis estructural, elementos finitos, modelación numérica no lineal y empleo de programas CAD. De igual forma, para realizar la simulación numérica se requiere contar con la mayor información posible del inmueble, ya que seguramente no será suficiente la que se encuentre dependiendo de la antigüedad del mismo.

De los seis casos de estudio realizados, y de los resultados obtenidos, se encontró que el hundimiento ha sido el fenómeno que mayor daño ha inducido al edificio y que en caso de no realizar los trabajos necesarios para revertir este hundimiento, continuará agravándolo: los asentamientos están induciendo zonas de daño en las transiciones entre los cuerpos del **Frontispicio**, y están reconcentrando los esfuerzos tanto en el cuerpo central como en el ala norte. Asimismo, con la hipótesis de velocidad de consolidación constante se hizo una predicción elástica a 10 y 20 años a partir de este año (2015), y se puede apreciar que los esfuerzos alcanzan valores hasta cuatro veces más altos que los establecidos para el límite elástico.

Por otra parte, el incluir modelos de comportamiento no lineal para los materiales en las simulaciones, permite reproducir con mejor aproximación la reconcentración de esfuerzos en varias zonas de la estructura, lo cual ocurre en cuanto el agrietamiento se desarrolla en ciertos puntos del sistema estructural. Debe señalarse que los modelos elásticos no tienen la capacidad de reproducir estas redistribuciones de esfuerzos, por lo que su validez queda en entredicho en cuanto se rebasan los valores de límite elástico (tanto en deformaciones como en esfuerzo).

De cualquier modo, se identificaron vastas regiones susceptibles de daño que pueden formar articulaciones inelásticas e inducir colapsos parciales tanto en el cuerpo central como en la cara norte del **Frontispicio**.

En relación a la respuesta que tendría el **Frontispicio** ante un evento sísmico de importancia, se constató que aún ante un sismo intenso similar al que se registró en 1985, esto no representa un gran riesgo para la estructura, ya que es lo suficientemente estable como para soportar sus efectos. No obstante, en caso de que continúen los asentamientos diferenciales y se produzcan regiones susceptibles de falla, la estabilidad podría estar en riesgo por los potenciales mecanismos que podrían haberse engendrado a lo largo del tiempo.

Puede concluirse que en caso de no realizar el reforzamiento adecuado, y considerando una tasa de hundimiento constante, se estima que en veinte años el edificio podría tener un colapso parcial o total, dependiendo de los mecanismos que pudieran generarse.



REFERENCIAS

- Ahrens, J., Geveci, B., Law, Ch. (2005). *ParaView: An End-User Tool for Large Data Visualization*, Visualization Handbook, Elsevier, ISBN-13: 978-0123875822
- Autodesk (2013), "AUTOCAD ver. 2013", <http://www.autodesk.mx/products/autocad/overview>
- Coordinación Nacional de Monumentos Históricos (sin fecha), Ficha nacional de catálogo de bien inmueble con valor Cultural, México, D.F.
- Díaz, Porfirio (1908). Estudio sobre cimentación. México.
- Domínguez N., Mayorga J.E., Flores E., Suarez A., (2015). Manual de análisis y revisión de estructuras históricas. EMI-IPN. Ciudad de México (en prensa).
- Electricité de France R&D (2012), "Code_Aster Libre versión 7.4", Programa "open source" con licencia GPL: Fuentes, documentación, ejemplos: <http://www.code-aster.org/V2/spip.php?rubrique1>
- González Avellaneda, A., Manual técnico de procedimientos para la rehabilitación de Monumentos Históricos en el Distrito Federal, Departamento del Distrito Federal Instituto Nacional de Antropología e Historia, México, D.F. 1988.
- Lourenço, P.,(2013) *Conservation of cultural heritage buildings: Methodology and application to case studies*, Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Vol. 3, número 2, pp. 102-114.
- Lourenço, P B (2006). "Recommendations for restoration of ancient buildings and the survival of a masonry chimney", *Construction and Building Materials*, Vol. 20, pp. 239-251.
- Lourenço, P B (2006). Recommendations for restoration of ancient buildings and the survival of a masonry chimney, *Construction and Building Materials*, Vol. 20, pp. 239-251.
- Open Cascade (2015), "Salome: The open source integration platform for numerical simulation", Programa "open source" con licencia GPL: Fuentes, documentación, ejemplos: <http://www.salome-platform.org/user-section/service-and-support/service-and-support>
- Peña M. F. y Lourenço P. (2012). *Criterios para el refuerzo antisísmico de estructuras históricas*. Revista de Ingeniería Sísmica No. 87. pp. 47-66.