



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

**Seminarios del Área de Biofísica y
Ciencia de Materiales**

Estrategias para el Modelado y el Análisis de Estructuras Históricas

Fernando Peña Mondragón



Identificación de Tipos de Falla (Daño)

Diagnóstico de Seguridad Estructural (Crítico, Moderado, Leve)

Desarrollo de Técnicas de Rehabilitación

Evaluación de Eficiencia de Procedimientos de Refuerzo
(Económico, Seguro, Funcional, etc)

Limitar daños y salvaguardar vidas

Para edificios históricos

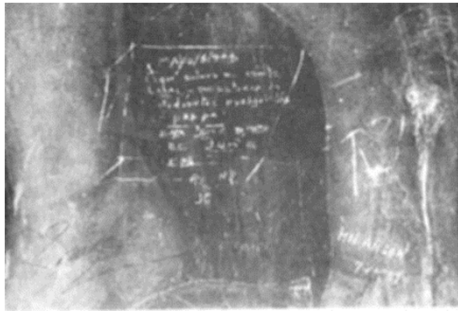
SE DEBE UTILIZAR UN CRITERIO ESPECÍFICO

Preservar el “**VALOR INTRÍNSECO**” del inmueble



Arte

El valor artístico reside tanto en su arquitectura, como en todos los demás elementos que le proporcionan una identidad al edificio, como pueden ser: frescos y pinturas murales, elementos de adorno (cielos rasos, adornos en columnas y muros, pisos, etc.), bienes muebles conservados en el interior del edificio.







Historia

El valor cultural histórico de un inmueble no se refiere únicamente a la época en que fue construido, sino también a todos los hechos de que ha sido testigo mudo. Como por ejemplo, ser la casa en donde vivió cierto personaje de la historia, lugar donde se redactó o firmó cierto acuerdo, etc.





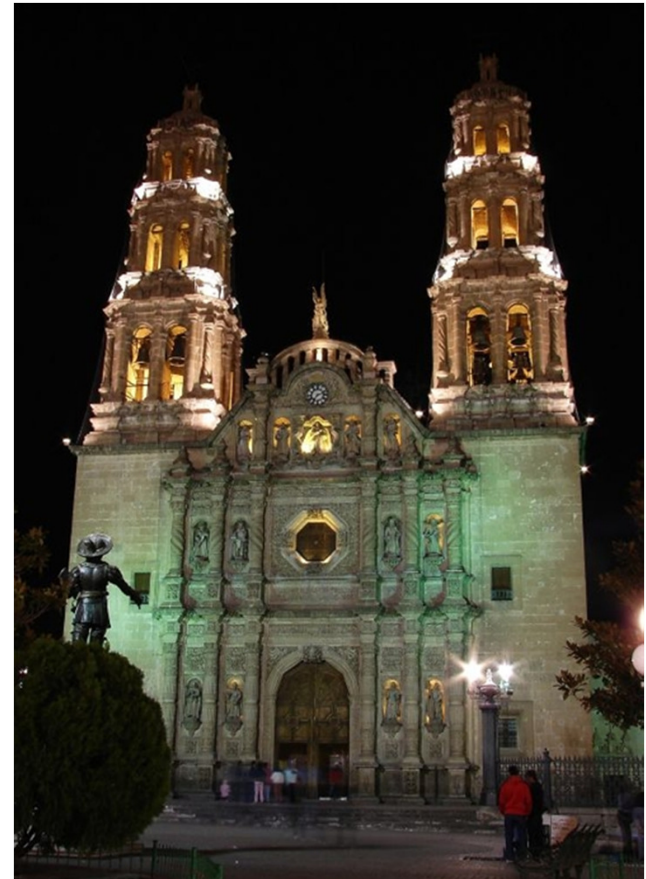
Valores Intrínsecos





Arquitectura

No solamente el estilo arquitectónico forma parte del valor cultural del edificio histórico, sino también la distribución de espacios, usos y modificaciones a lo largo de su historia.





**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

Valores Intrínsecos





Ingeniería

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.







Económico

Los edificios y centros históricos son, muchas veces, la atracción principal de una ciudad, siendo el centro de la vida y creando beneficios económicos directos e indirectos.





**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

Valores Intrínsecos





El objetivo de una intervención es la salvaguarda de los valores intrínsecos de la estructura; y no sólo de la seguridad estructural.

El objetivo central de la estrategia de análisis se convierte en *el entendimiento global de la estructura*.

El término *análisis no* se refiere a un *análisis numérico*, como comúnmente se sobreentiende.

De acuerdo con la Real Academia, *análisis* es el “estudio de los límites, características y posibles soluciones de un problema.

El *análisis numérico* se *subordina a un proceso más general*, y por ende más completo, de la estructura.



Se establece una serie de análisis de diferente tipo proporcionando información necesaria para el entendimiento global de la estructura:

- Análisis de las Condiciones Pasadas
- Análisis de las Condiciones Actuales
- Análisis de las Condiciones Futuras
- Análisis Numérico

Diferentes *análisis* se complementan en *un proceso más general*, y por ende más completo, de la estructura.



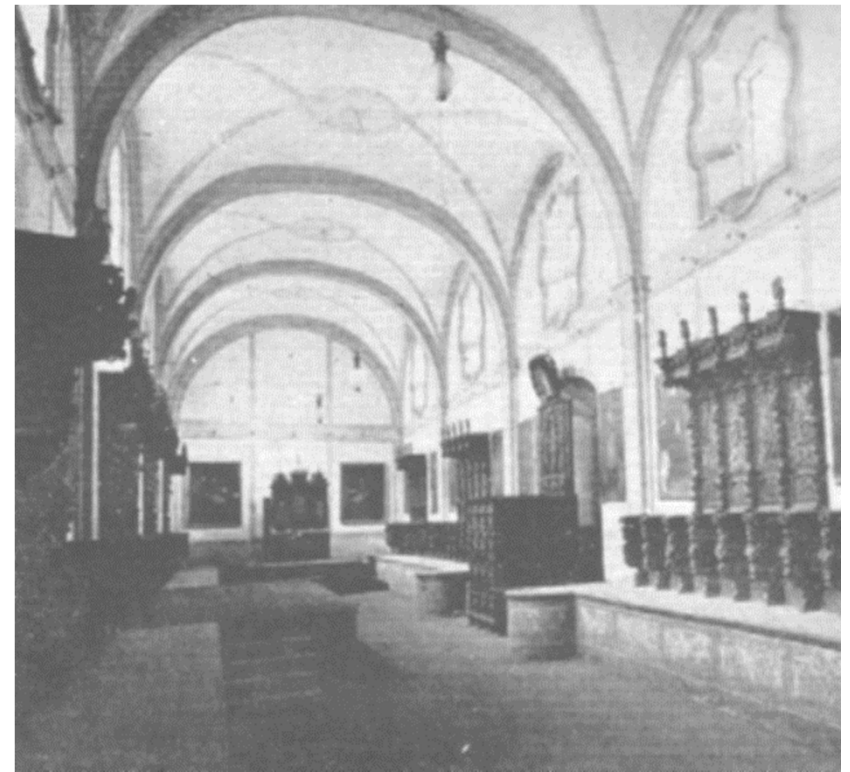
La información histórica es de suma importancia, pues ella nos llevará a entender el comportamiento estructural del edificio histórico a lo largo del tiempo. Este análisis debe contener:

- Información de las edificaciones que hayan ocupado el predio
- Edificación original: cimientos, materiales, arquitectura, etc.
- Análisis cronológico que muestre los daños, modificaciones y supresiones que el edificio haya tenido a lo largo de su historia.
- Se debe indicar los diferentes usos a los que ha sido dedicado el inmueble; ya que estos pueden haber modificado la estructura, cambiado las cargas o producido algún daño
- Un punto importante del estudio histórico es la recopilación de material fotográfico, planos, diversos levantamientos, pinturas, etc., que ayuden a tener un mejor entendimiento de la estructura.



**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

Análisis de las Condiciones Pasadas





**INSTITUTO
DE INGENIERÍA
UNAM**

Análisis de las Condiciones Pasadas







Las condiciones actuales de la estructura nos permite saber el grado de afectación de la misma. Estas condiciones se ven complementadas por el estudio histórico. Se debe incluir:

- Levantamientos: de daños, arquitectónico, etc.
- Características de los materiales
- Problemática estructural
- Cargas



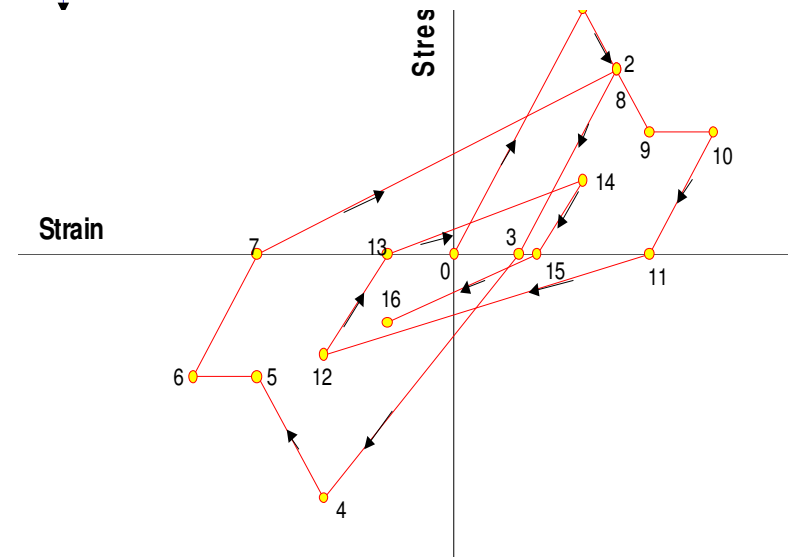
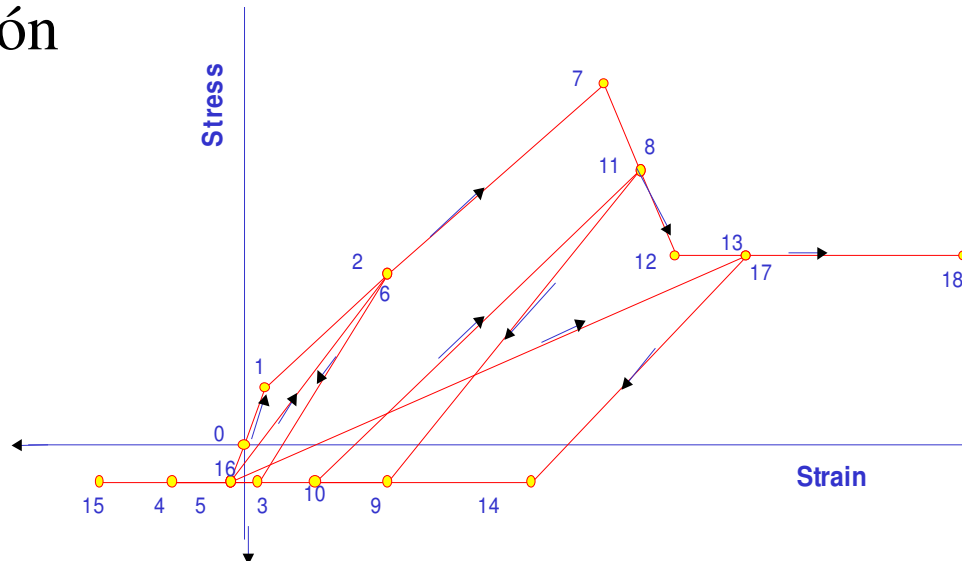
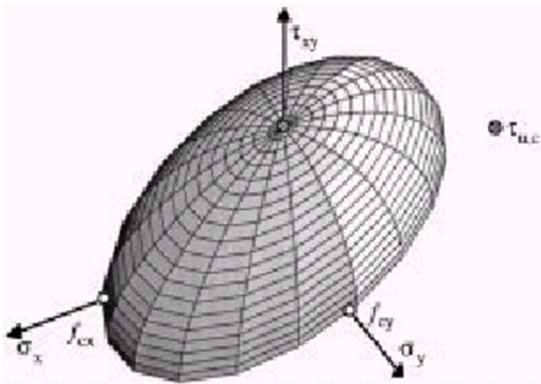
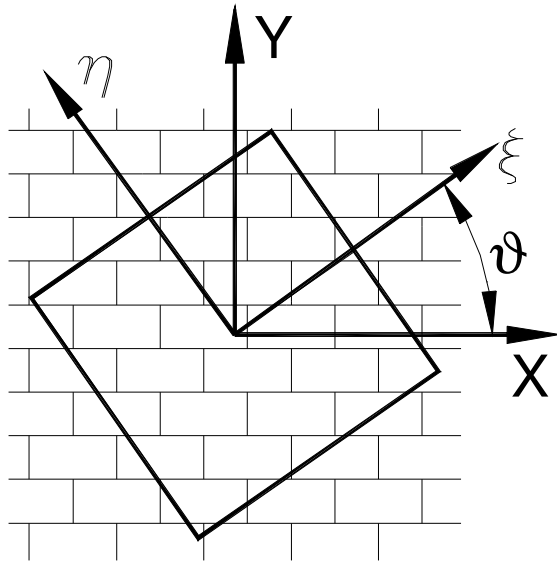
Análisis de las Condiciones Actuales

Materiales y
elementos estructurales



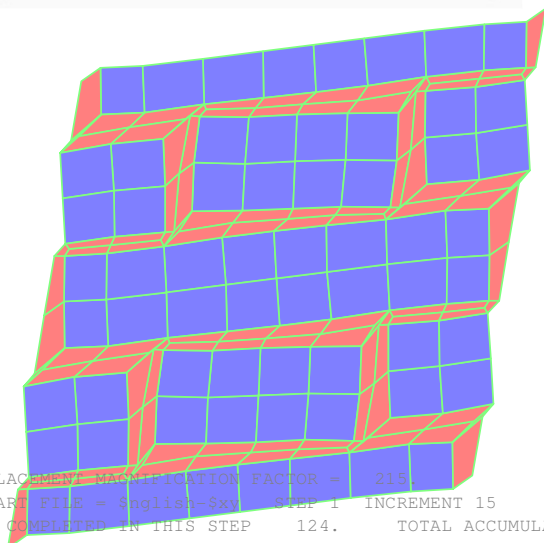
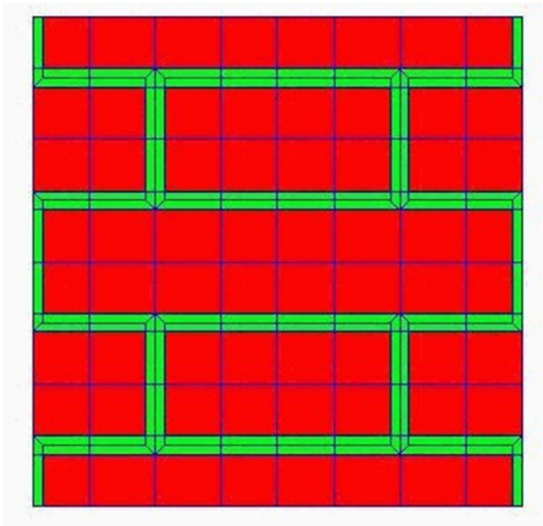


Material - Homogenización

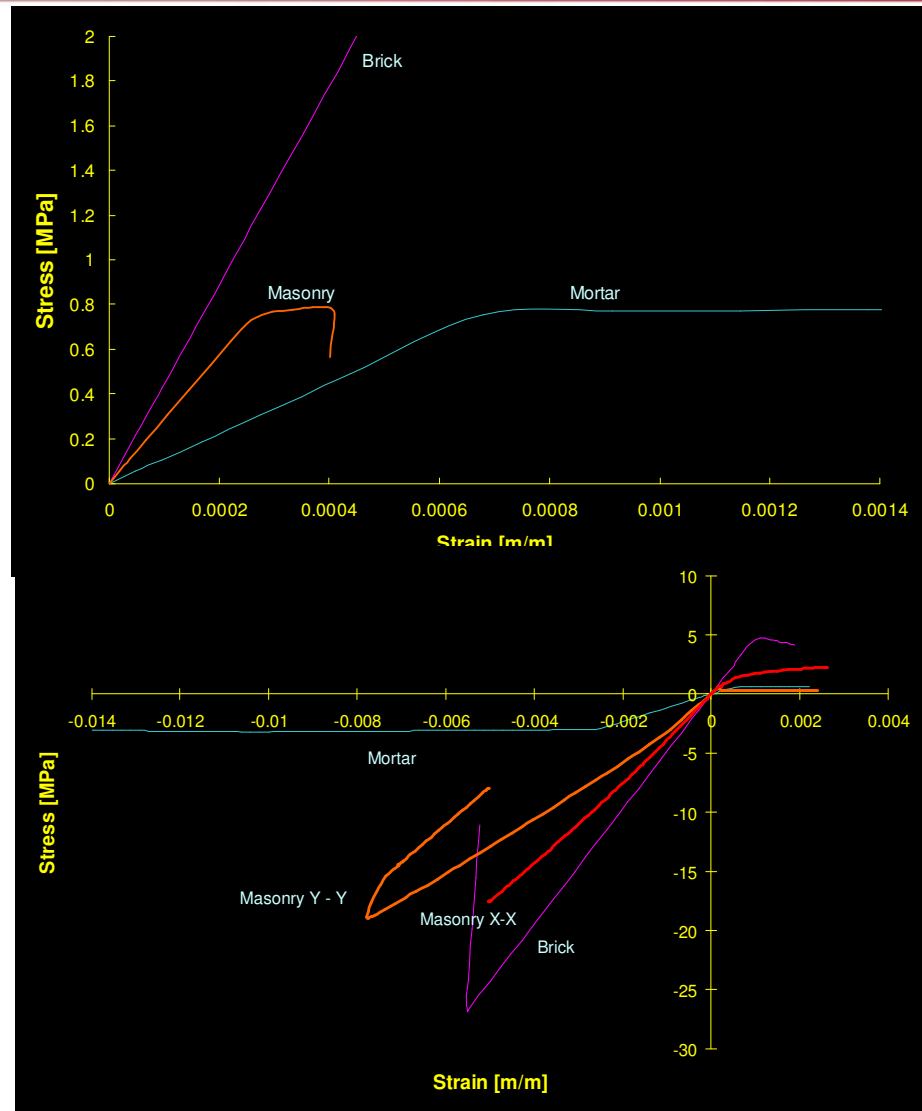




Homogenización

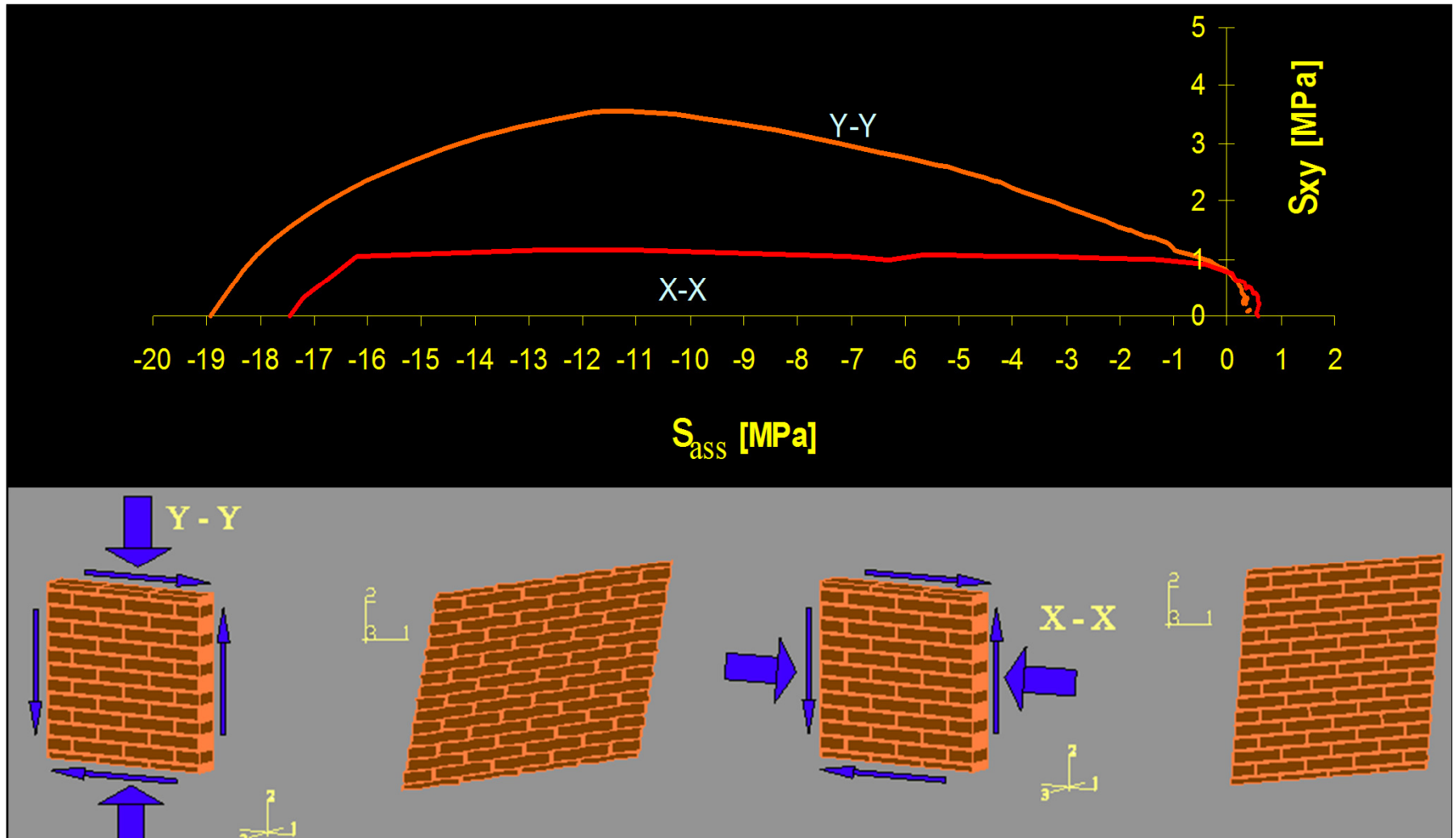


AMPLACEMENT MAGNIFICATION FACTOR = 215.
START FILE = English-Sxy STEP 1 INCREMENT 15
ME COMPLETED IN THIS STEP 124. TOTAL ACCUMULATE
AQUAS VERSION: 5.8-18 DATE: 20-FEB-2002 TIME: 13:36:





Homogenización

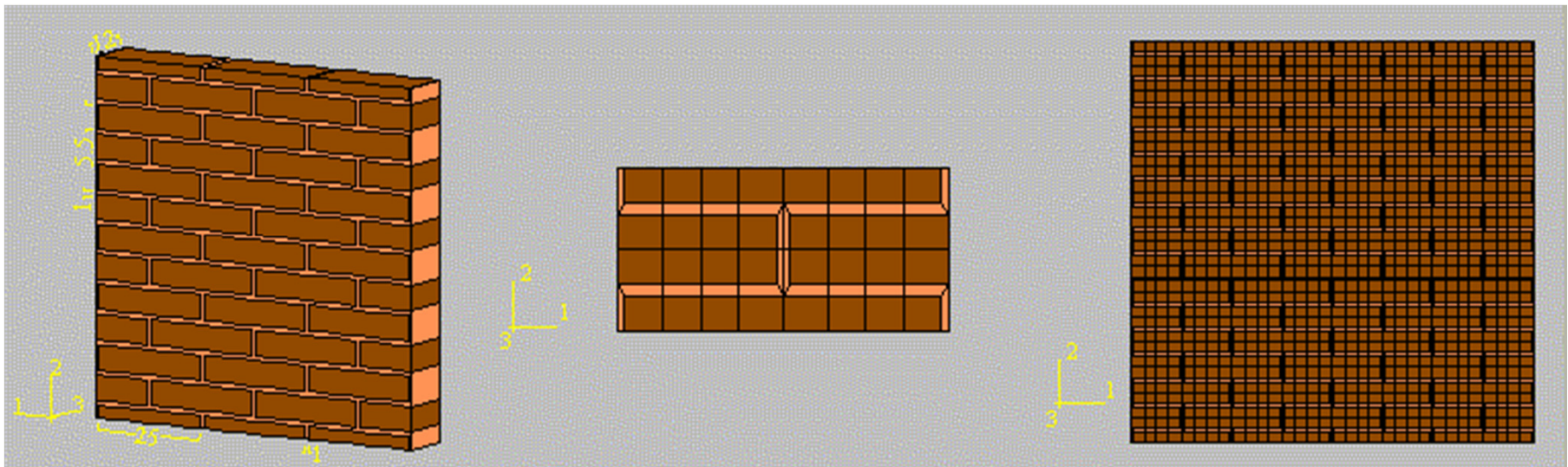




Homogenización

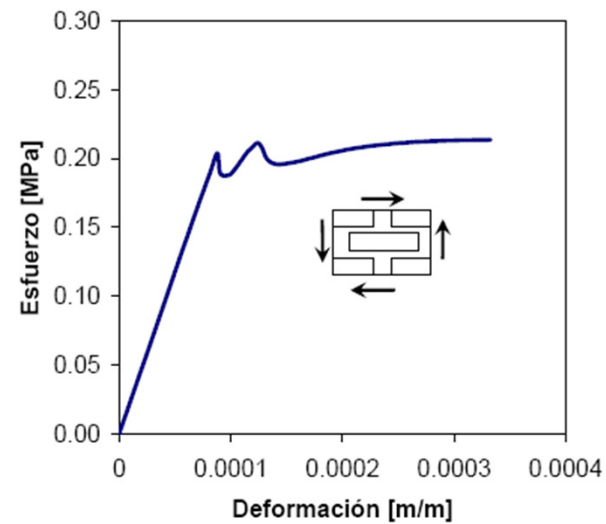
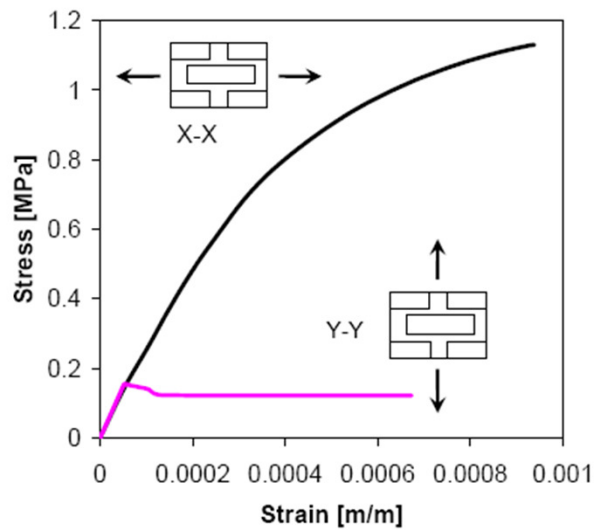
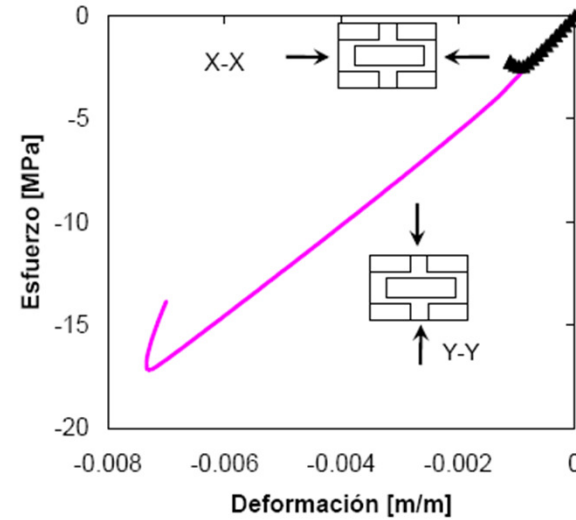
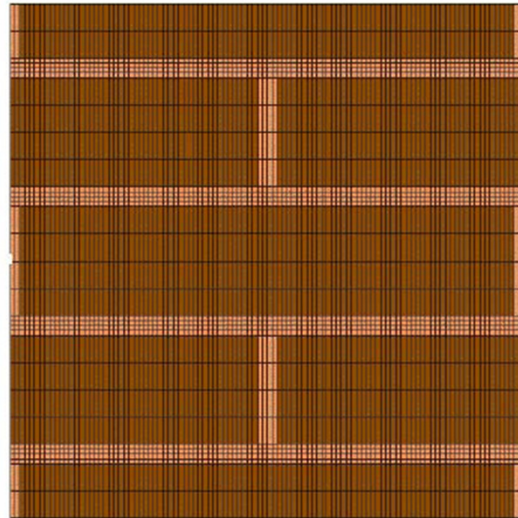
$$\{\Sigma_m\} = \frac{1}{V} \int \sigma_{ij} dV$$

$$\{E_m\} = \frac{1}{V} \int \varepsilon_{ij} dV$$





Homogenización





Fundamentalmente se refiere a las cargas que deberá resistir la estructura en el futura, por ejemplo:

- Sismo
- Hundimientos diferenciales
- Degradación de los materiales
- Flujo plástico
- Fauna nociva



Análisis de las Condiciones Futuras





Dentro del mismo análisis numérico se deben establecer una serie de pasos que se deben seguir, con el fin de superar las dificultades inherentes al análisis de estructuras históricas:

- Herramientas de Análisis
- Proceso de Calibración y Validación
- Tipos de Análisis
- Análisis Paramétricos



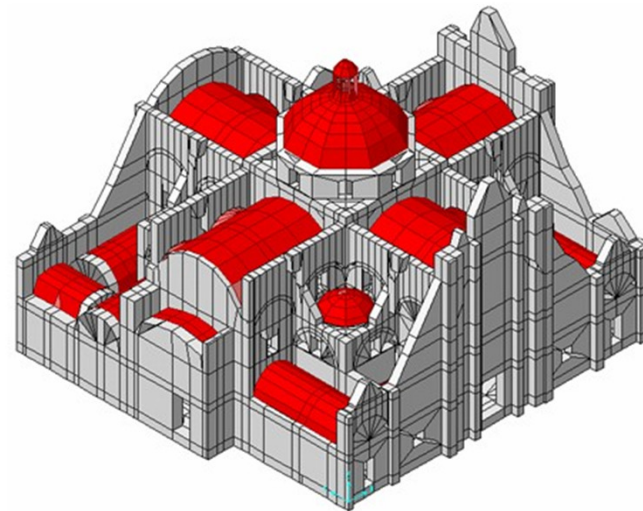
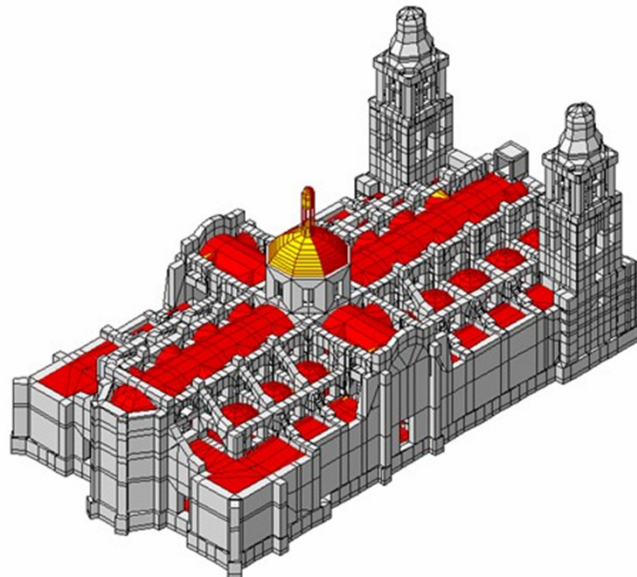
Existen diversos métodos y modelos para estudiar edificios históricos. La utilización de cada método depende del problema y los recursos para resolverlo. Además de que cada método tiene ventajas y limitaciones. Aspectos a tomar en cuenta:

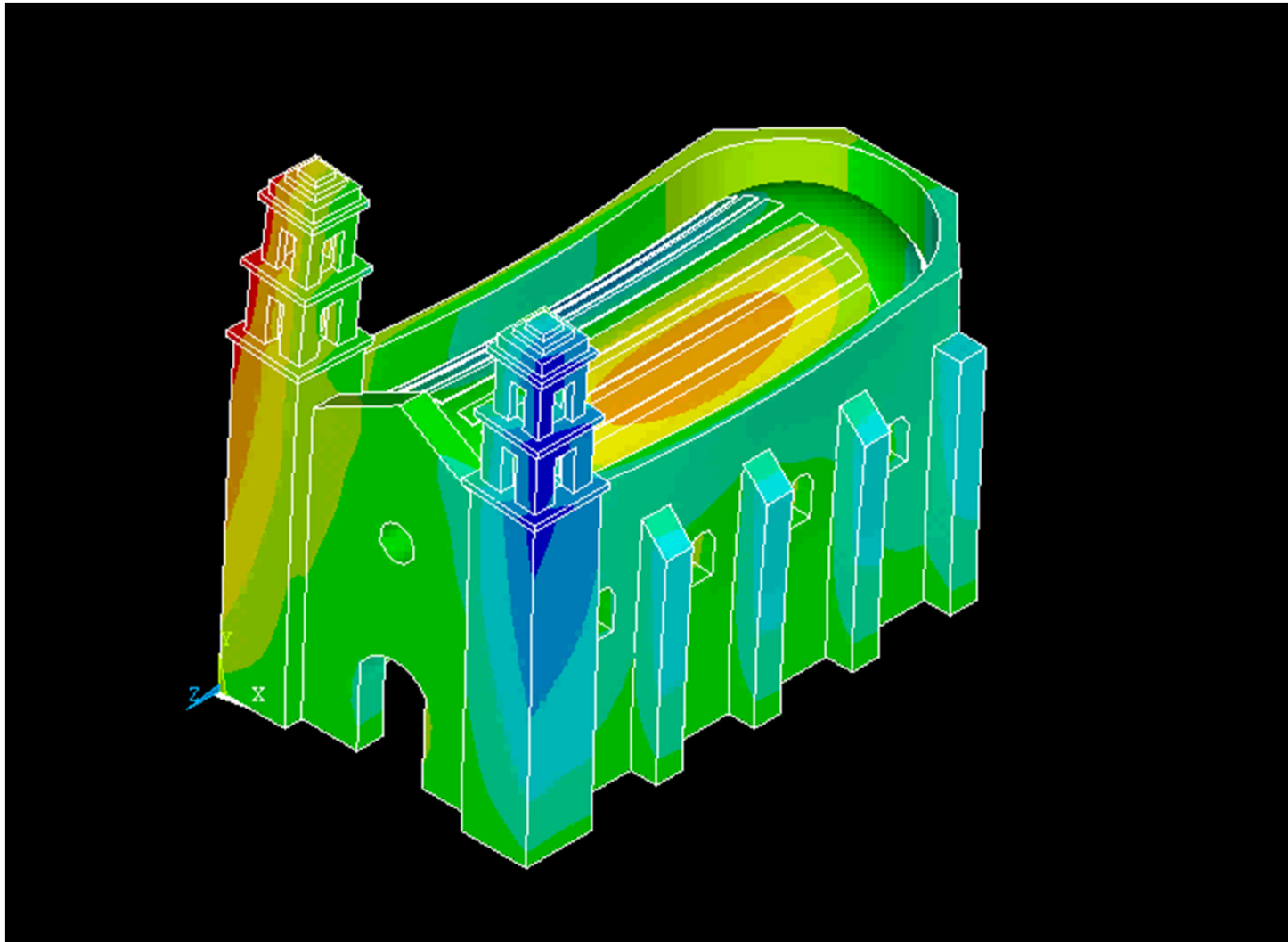
- Información Disponible
- Resultados Esperados
- Disponibilidad y Compatibilidad
- Costos
- Idealización y Validación



Selección de la Herramienta de Análisis

Método de Análisis	Ventajas	Limitaciones
Elementos Finitos	Permite definir cualquier tipo de geometría, tanto en dos o tres dimensiones. Permite una buena definición de las características de los materiales y solicitaciones. Adecuado para cualquier tipo de estructuras. Su formulación es ampliamente conocida.	Demanda una gran cantidad de recursos computacionales, muchas veces no disponibles. Varios parámetros para definir las propiedades de los materiales son difíciles de evaluar.

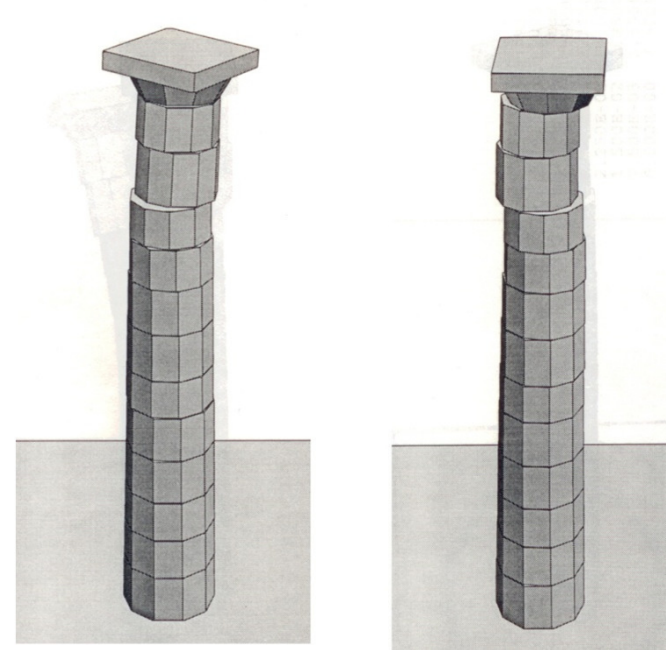






Selección de la Herramienta de Análisis

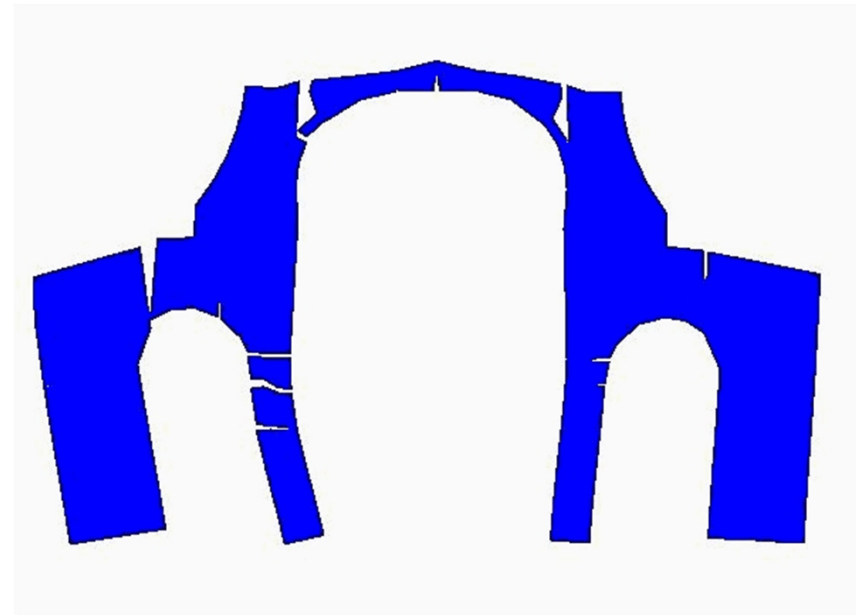
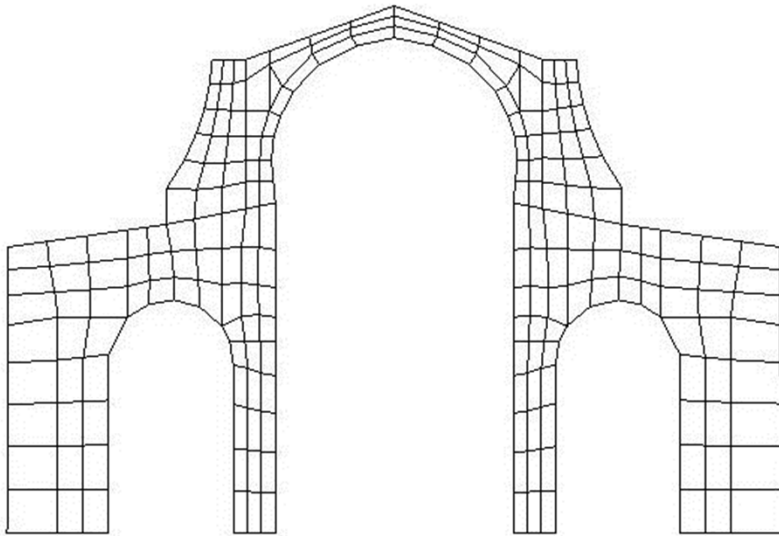
Método de Análisis	Ventajas	Limitaciones
Elementos Discretos	Adecuado para el cálculo de grandes desplazamientos y rotaciones. Permite el movimiento relativo entre elementos y cambios de geometría. Calcula automáticamente la nueva geometría.	Las características mecánicas de las juntas son difíciles de evaluar. Su solución es lenta, debido a que considera cambios en la geometría.





Selección de la Herramienta de Análisis

Método de Análisis	Ventajas	Limitaciones
Elementos Rígidos	Un método sencillo, eficaz y particularmente rápido para el estudio dinámico no-lineal. Son necesarios pocos elementos aún para geometrías complejas.	Solamente permite análisis en dos dimensiones. No hay un programa comercial y su formulación es poco conocida.

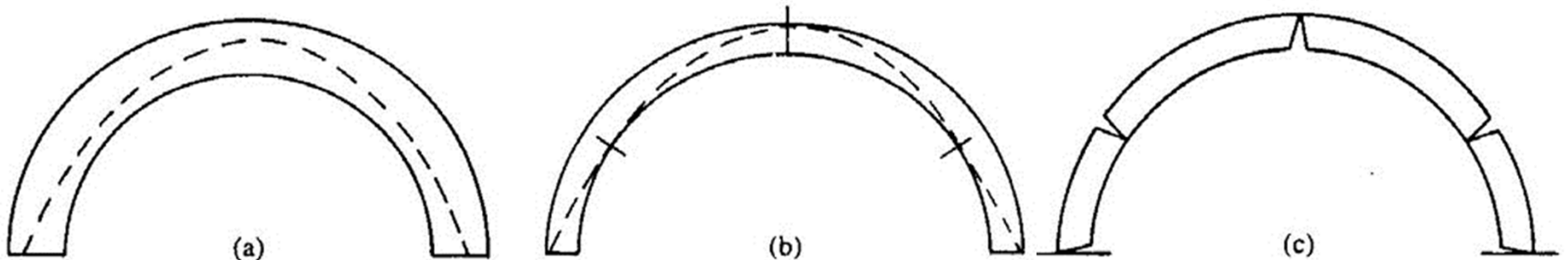






Selección de la Herramienta de Análisis

Método de Análisis	Ventajas	Limitaciones
Análisis Límite	Método adecuado para fines de diseño. Rapidez y sencillez del análisis.	Únicamente se puede conocer el mecanismo de colapso y la carga última.





Análisis con diferentes herramientas

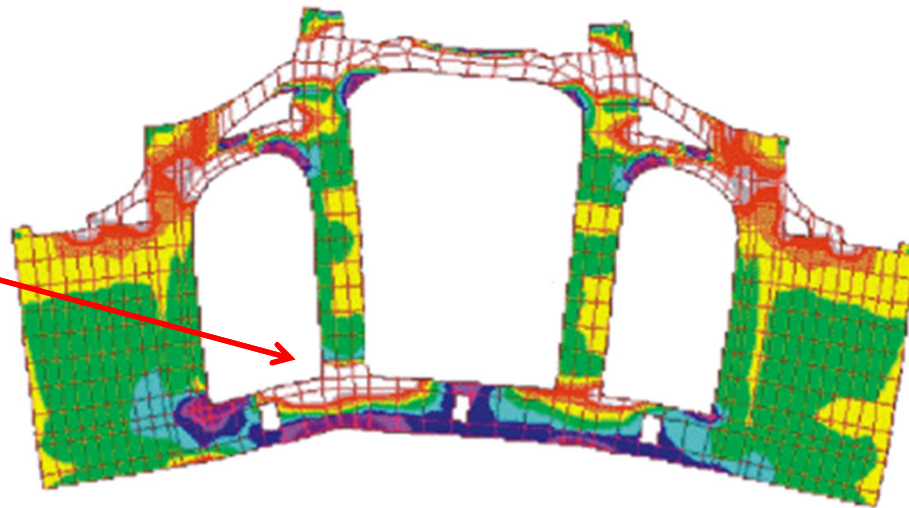
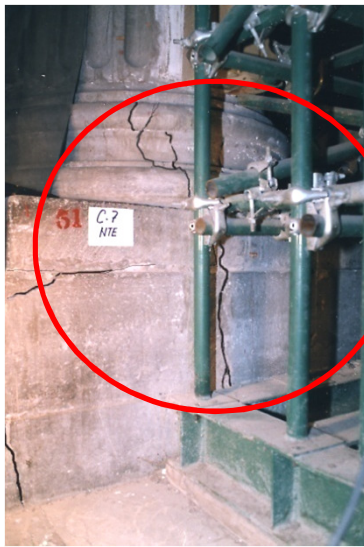
Muchas veces, una sola herramienta de análisis no es suficiente para cubrir satisfactoriamente todos los aspectos requeridos.

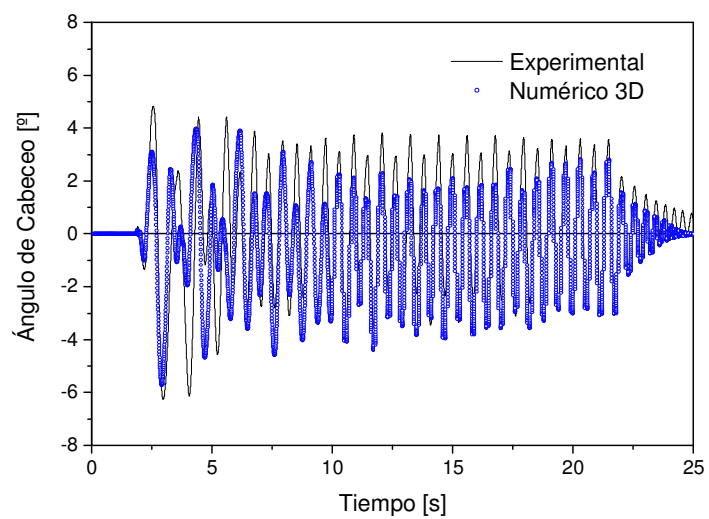
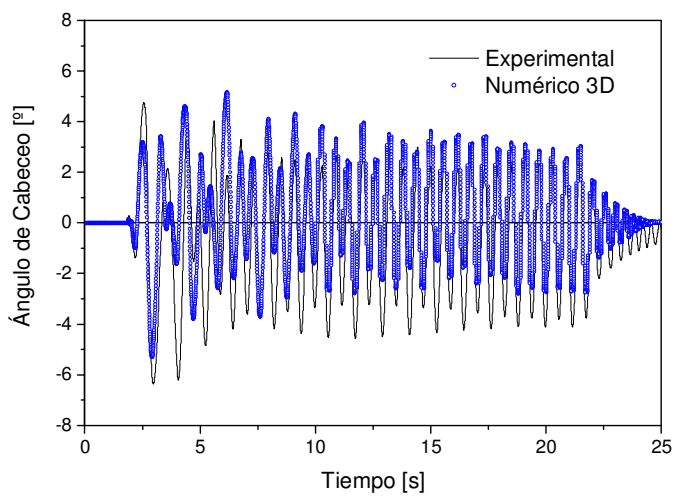
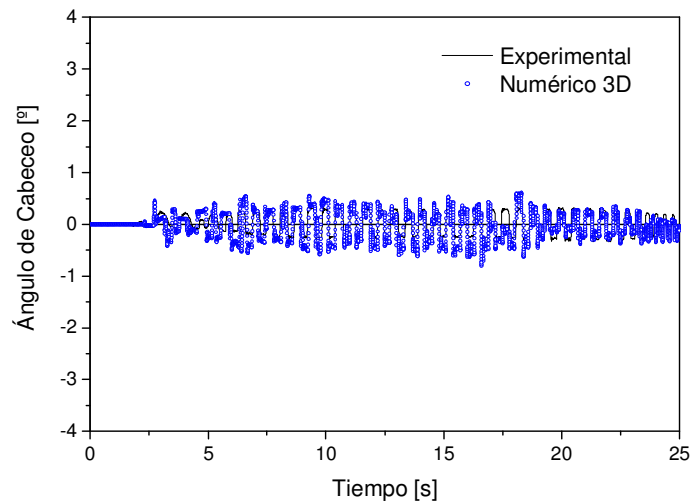
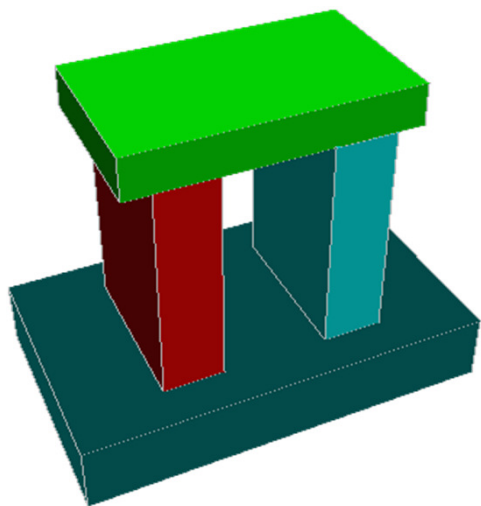
En estos casos, es de gran utilidad el uso de dos o más herramientas de análisis.

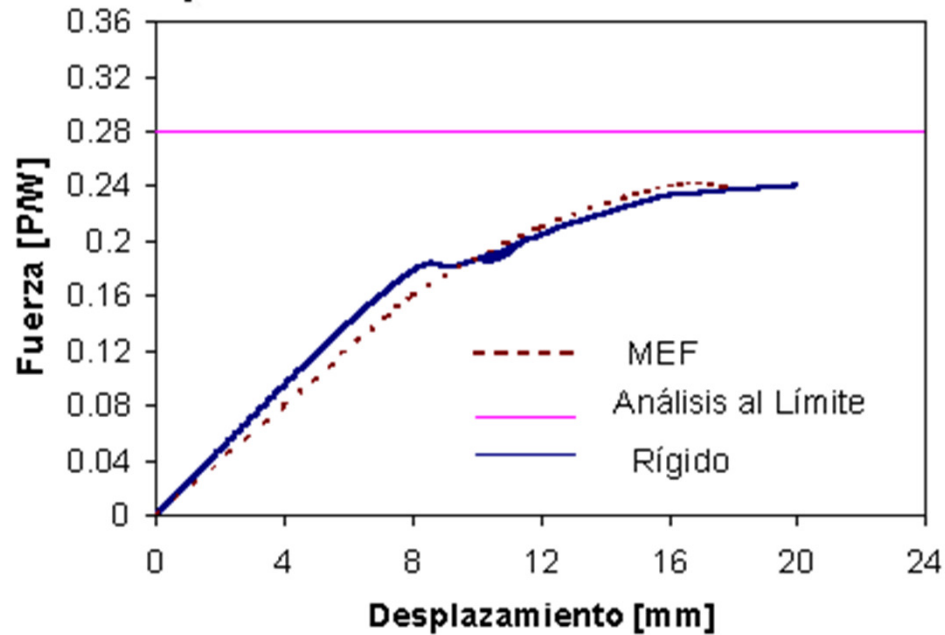
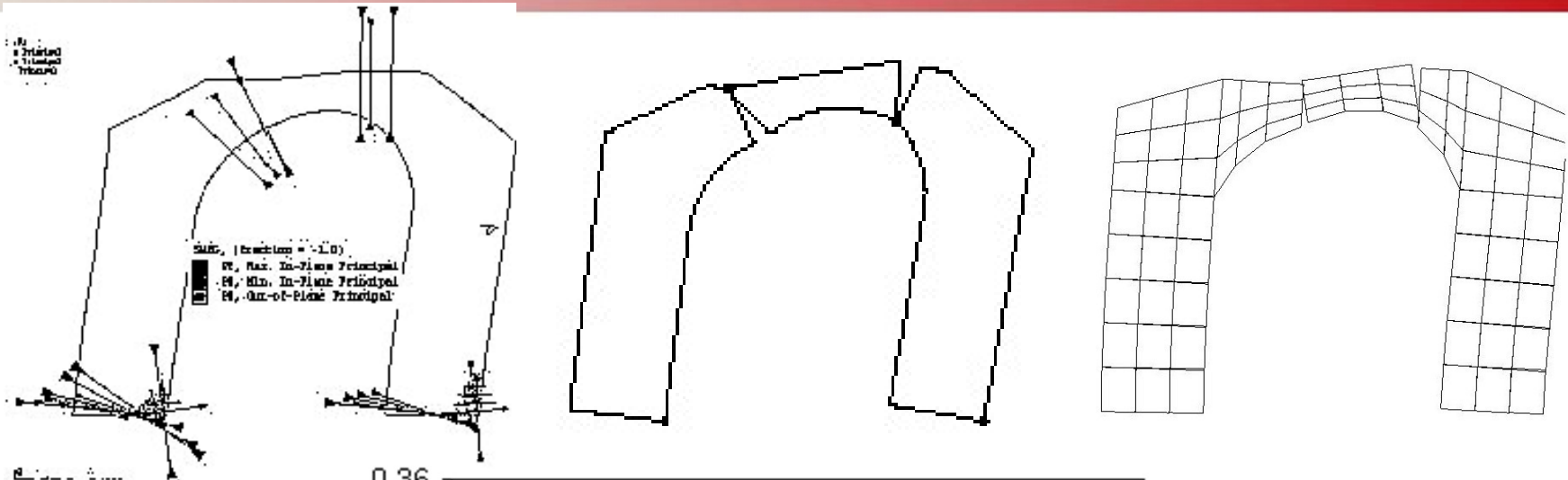
De este modo, se utilizan los resultados obtenidos a partir de una herramienta de análisis como resultados preliminares o para una mejor concepción de otro modelo utilizando una herramienta de análisis diferente.



El modelo matemático resultante de la idealización de la realidad, debe ser validado con el fin de asegurarse de que la idealización sea correcta. La validación puede realizarse con pruebas experimentales (in situ o laboratorio), con el daño actual, con un estudio histórico (de los daños, comportamiento), etc.









Los tipos de análisis se pueden dividir en diferentes formas:

- **De acuerdo a su función:** análisis para validación y calibración; análisis para la evaluación de la estructura
- **De acuerdo al comportamiento del material:** análisis elástico – lineal; análisis inelásticos
- **De acuerdo con el tipo de cargas:** análisis dinámicos; análisis estáticos



El objetivo de estos análisis es el de evaluar la influencia de alguna variable o parámetro en el comportamiento estructural. Idealizaciones no del todo satisfactorias.

Falta de información o a la variabilidad propia del parámetro (por ejemplo registros sísmicos).

Para disminuir las incertidumbres recomienda la realización de análisis paramétricos.

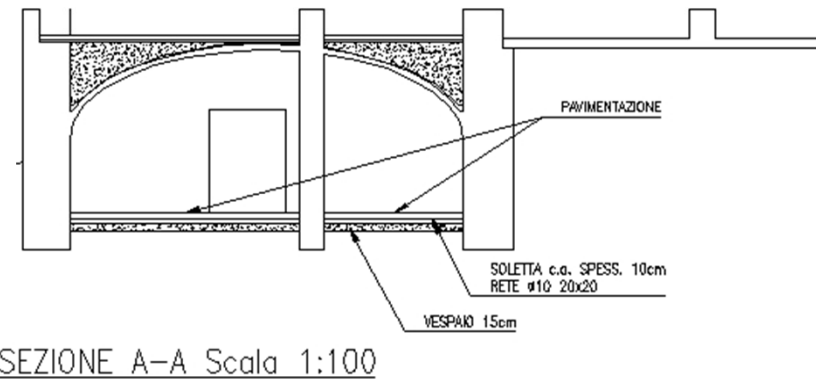
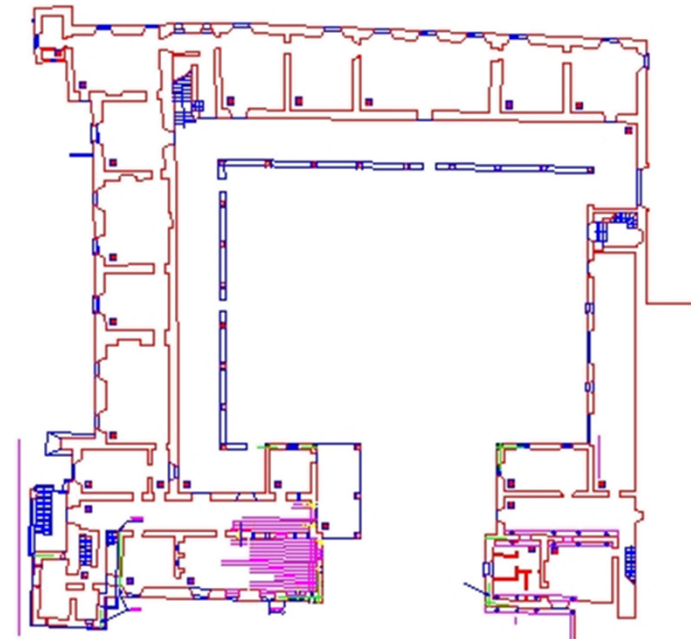
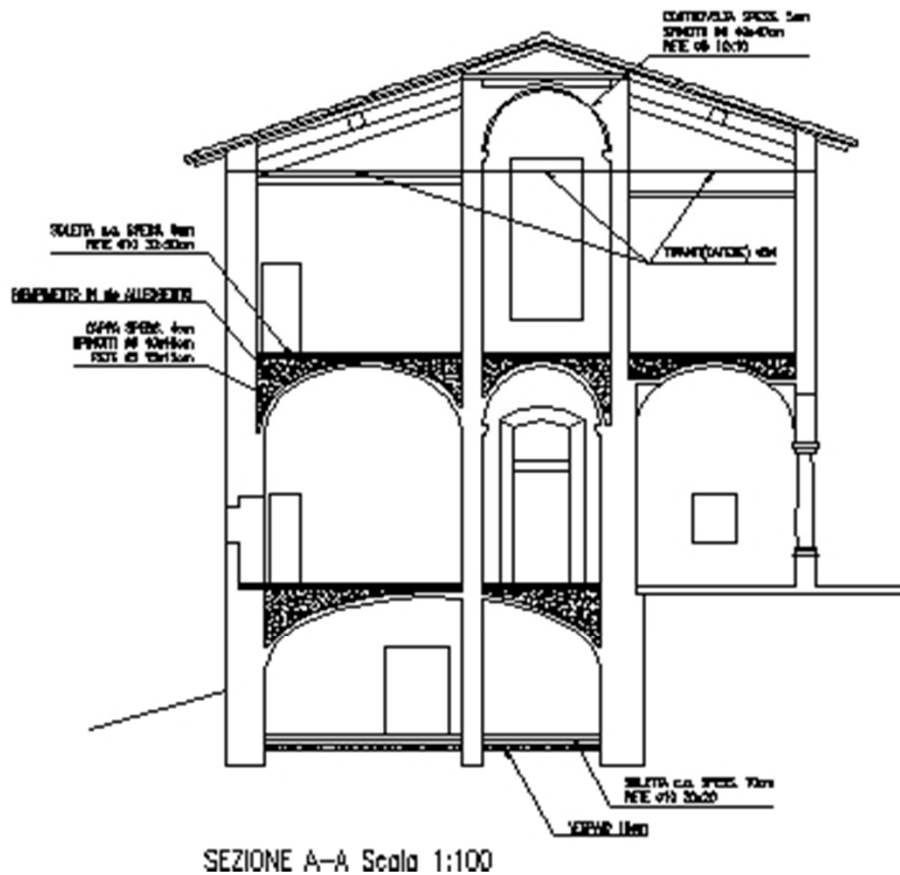


Palazzo dal Pozzo, Montebello della Bataglia, Pavia, Italia.



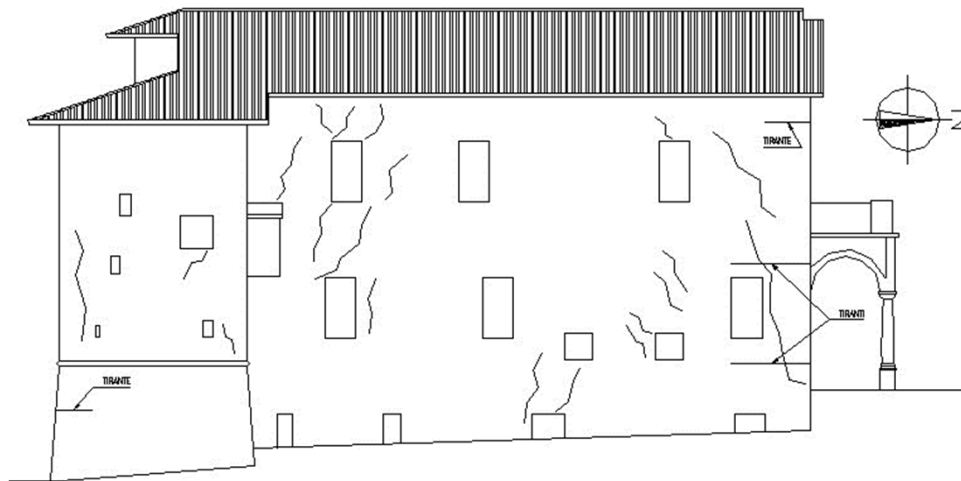


Levantamientos

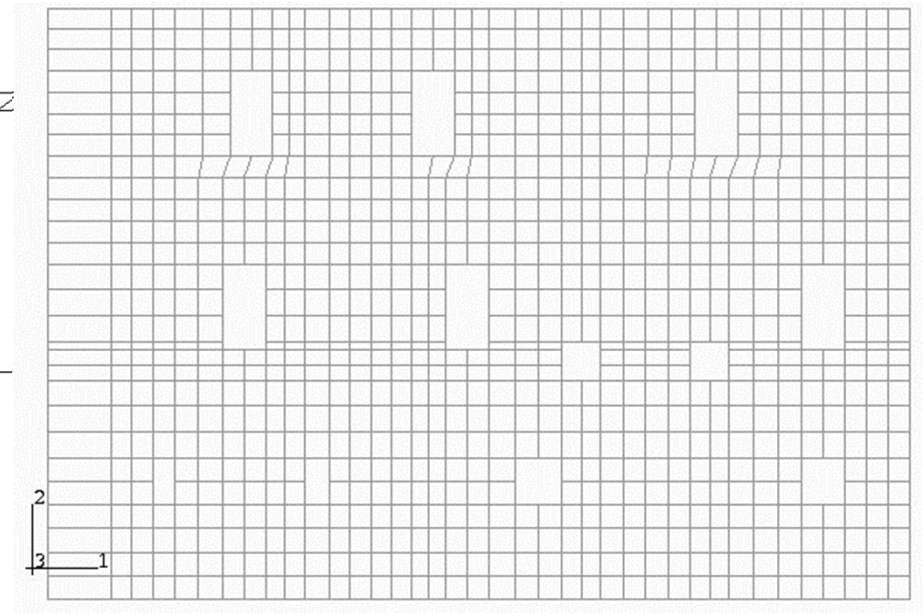


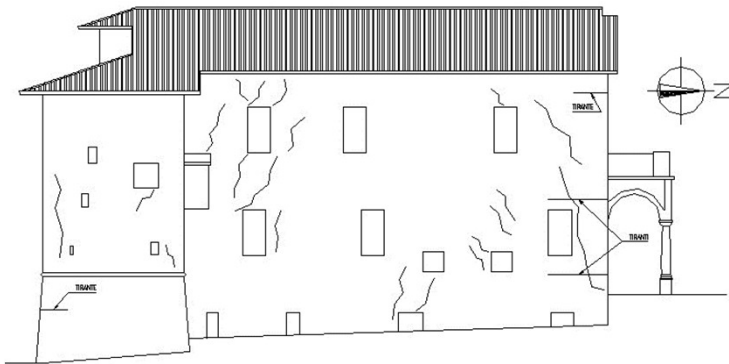


Daños por hundimientos diferenciales

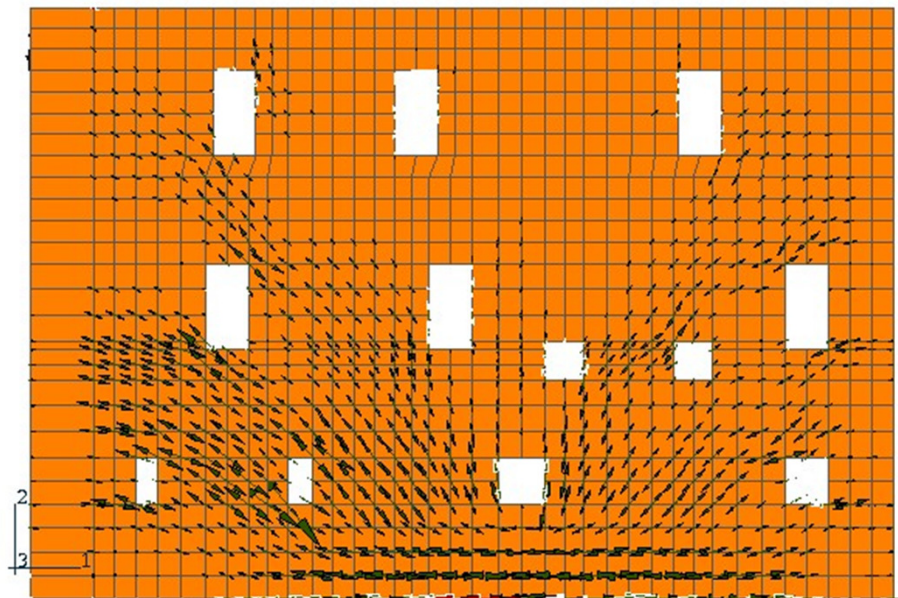
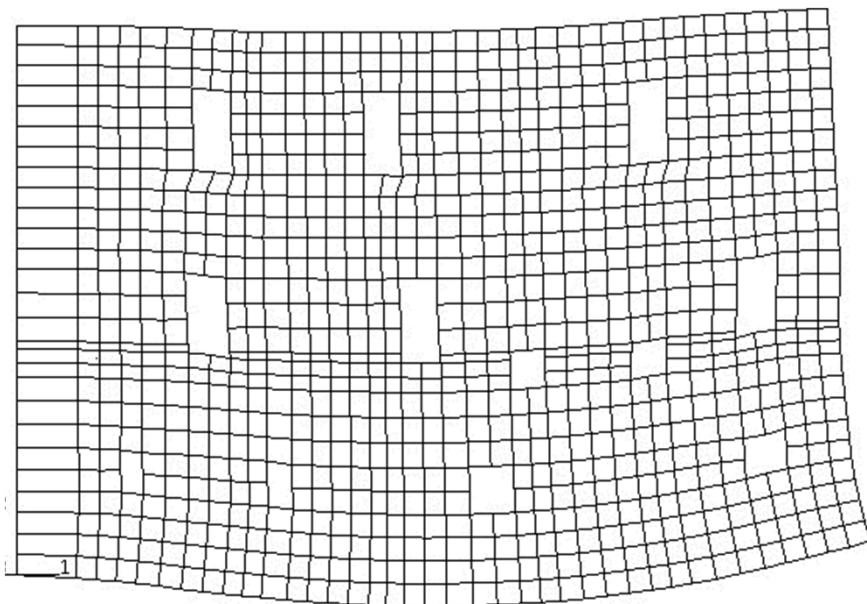
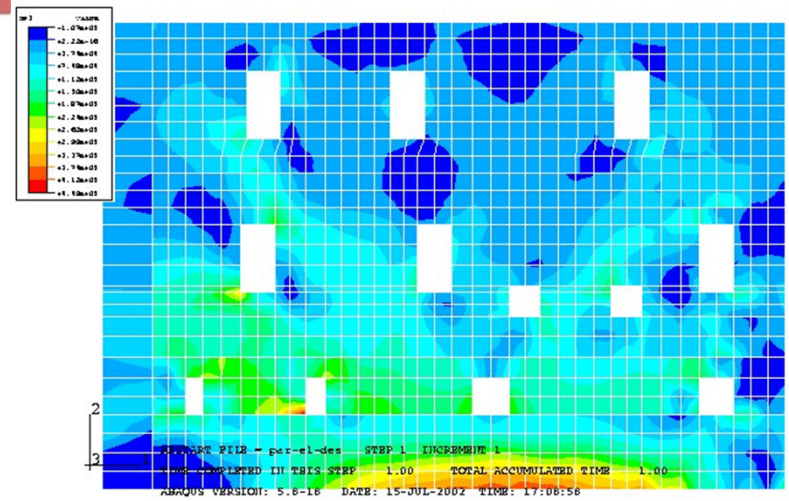


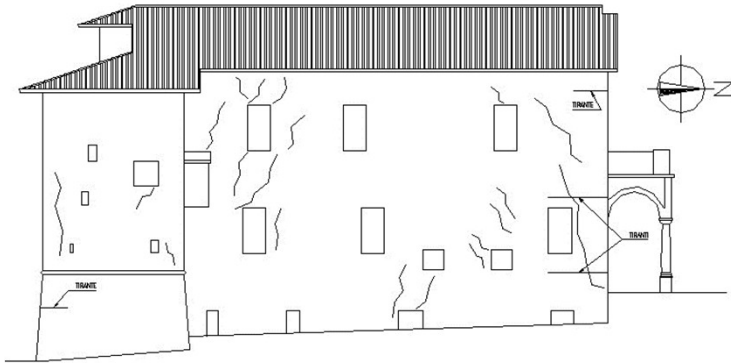
Malla de elemento Finito
Elementos sólidos 2D



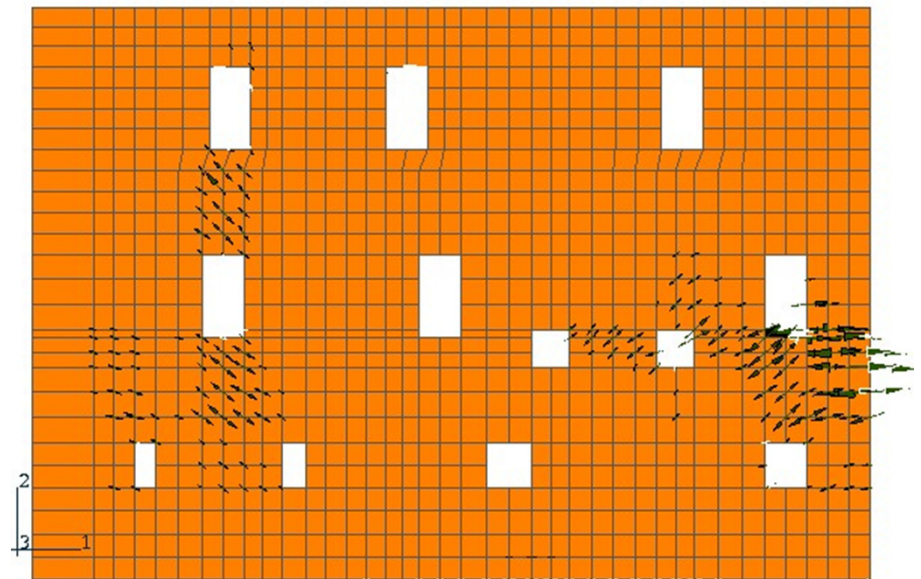
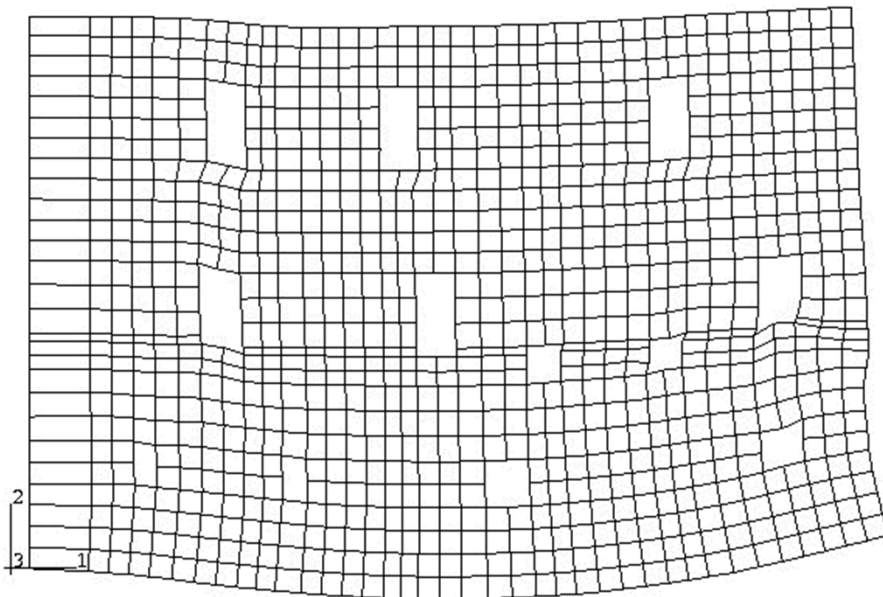
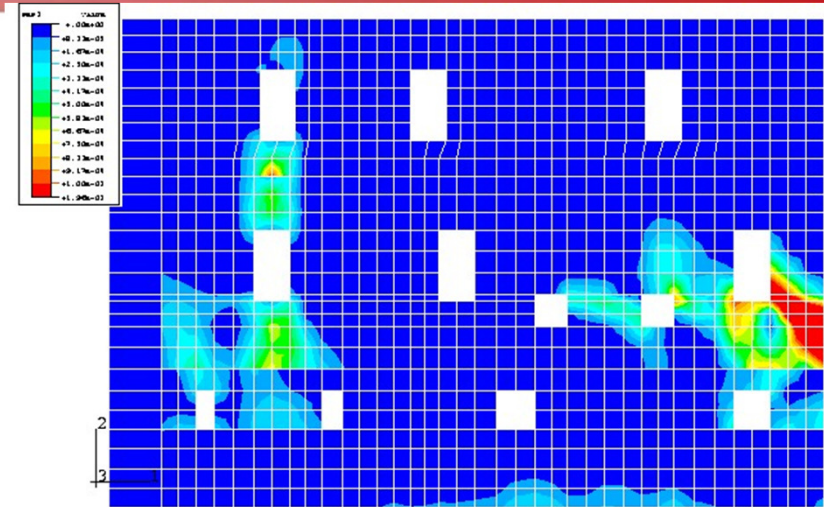


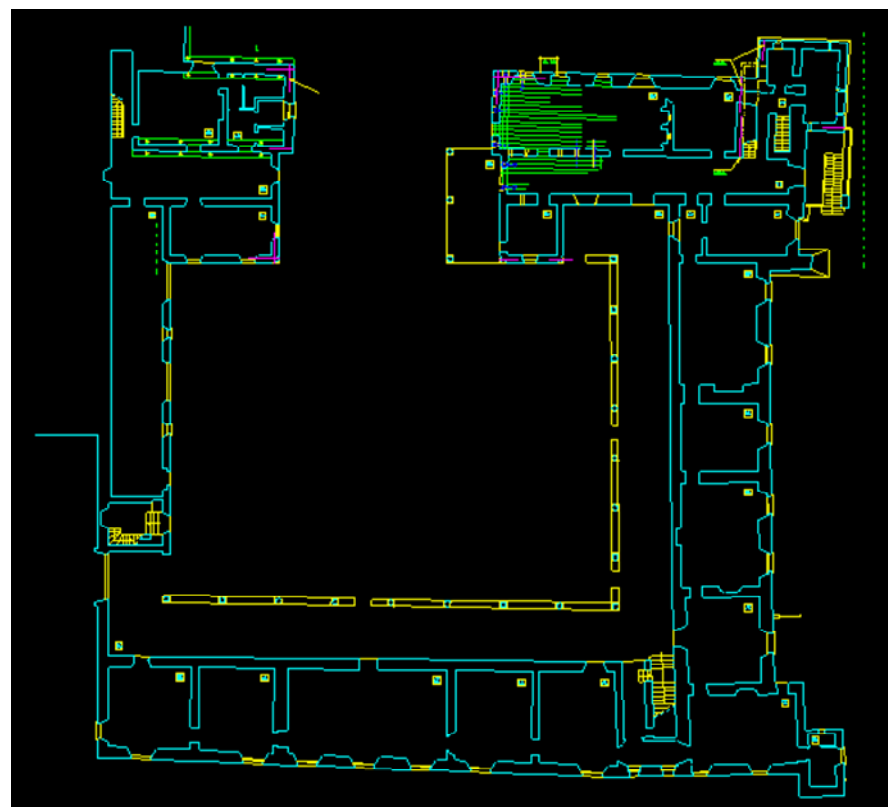
Análisis Elástico Lineal

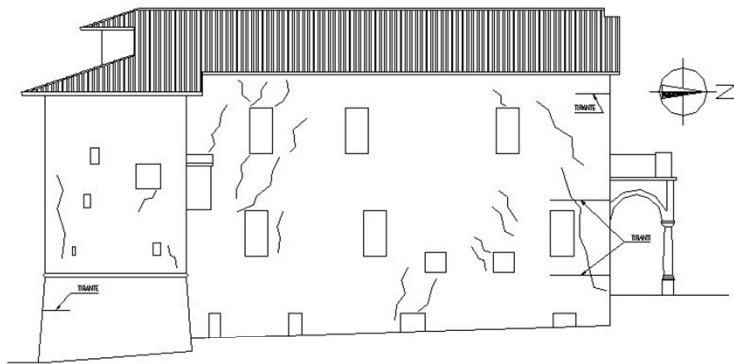




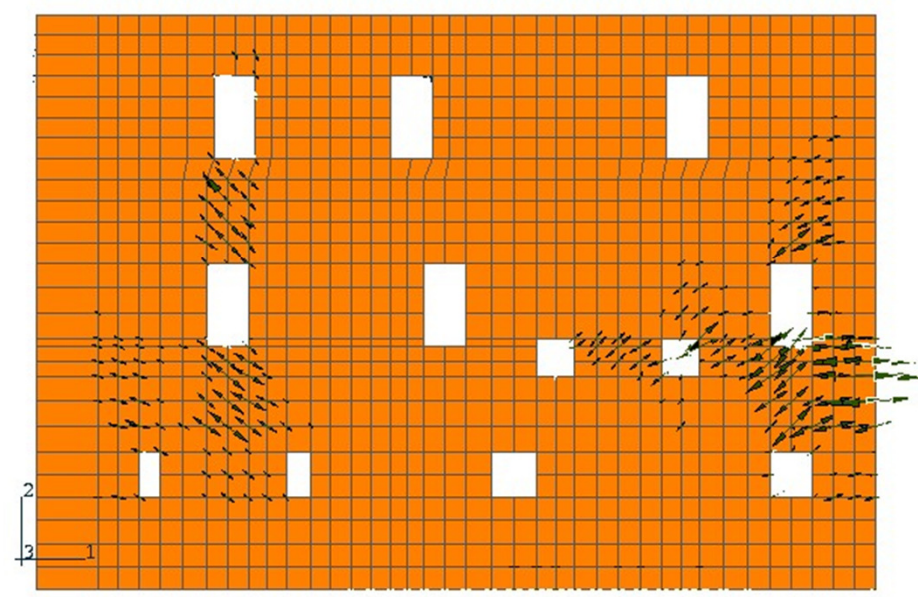
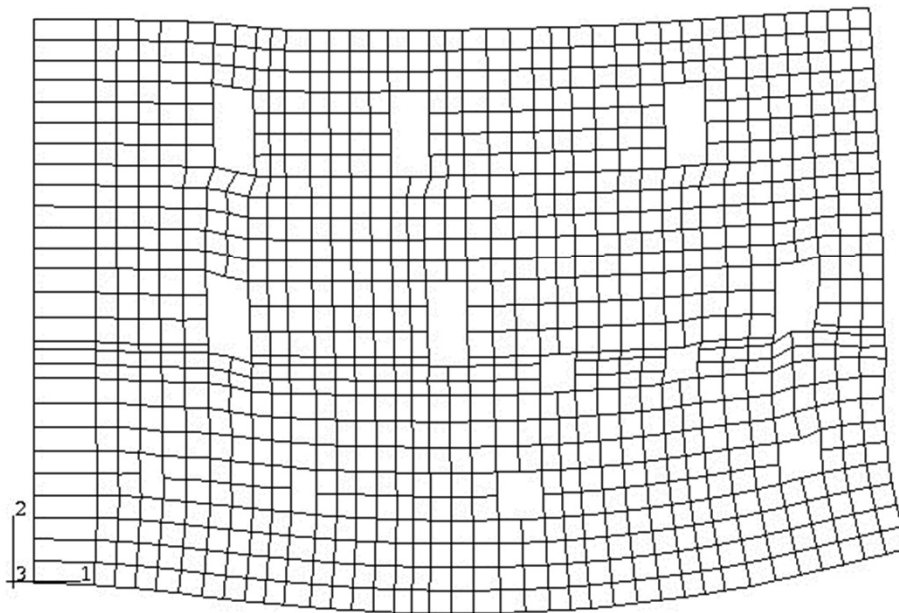
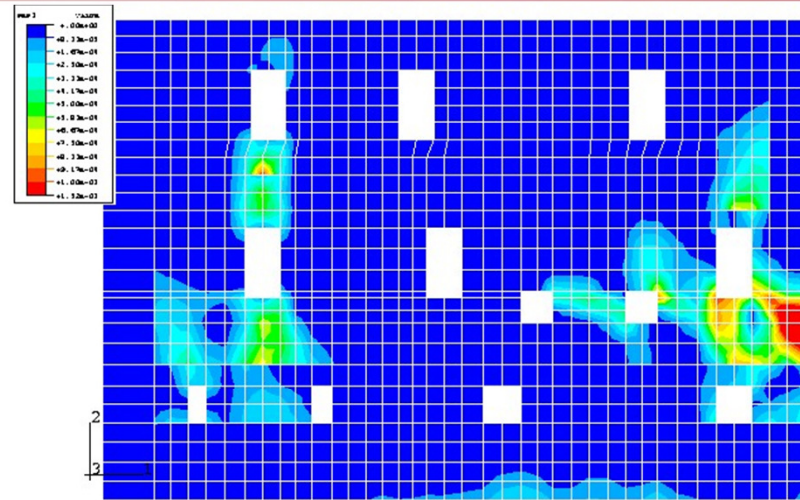
Análisis No Lineal







Análisis No Lineal Modificado



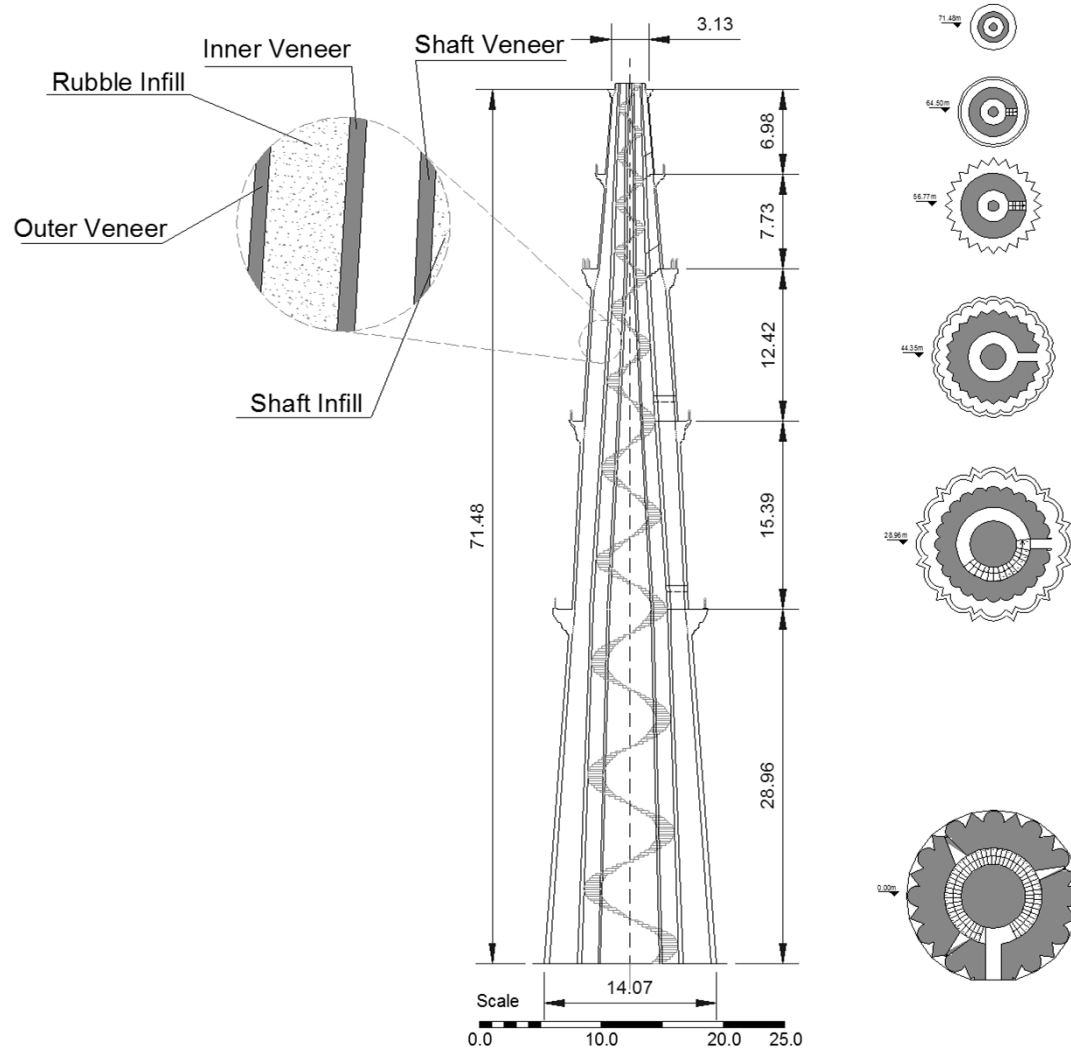


Minarete Qutb, Delhi, India.



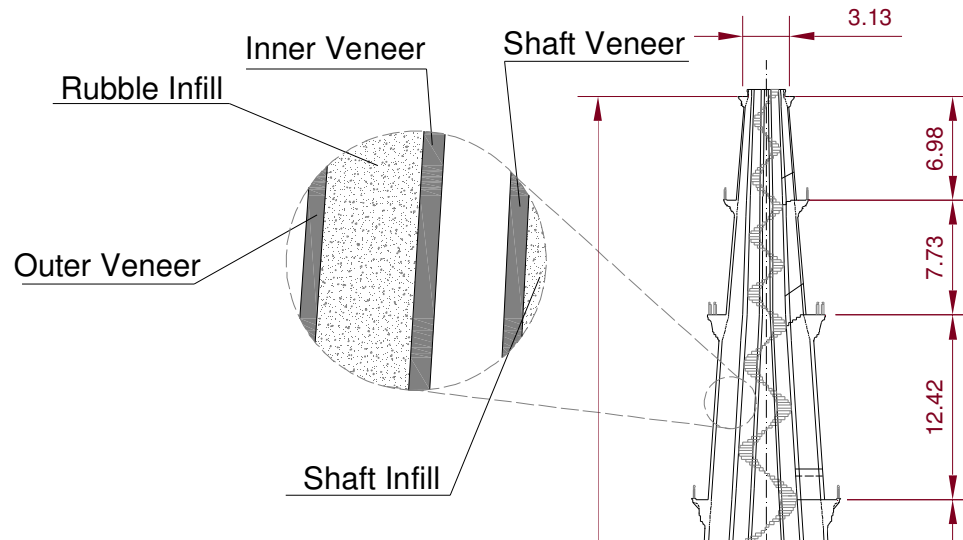


Levantamientos



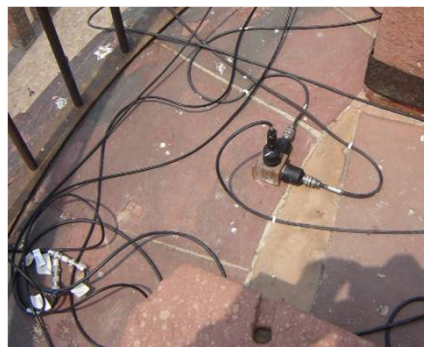
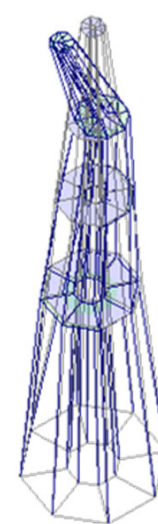
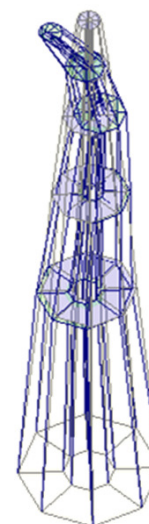
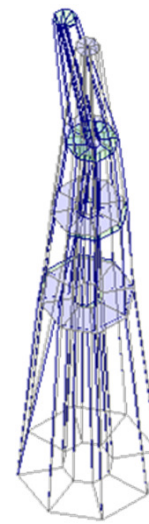
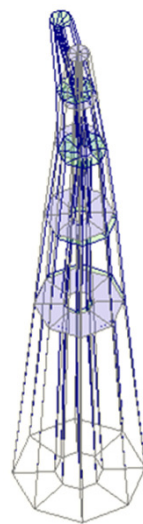
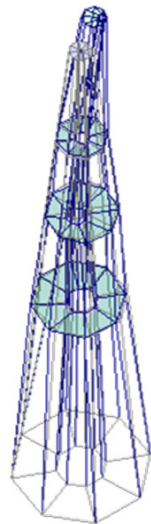


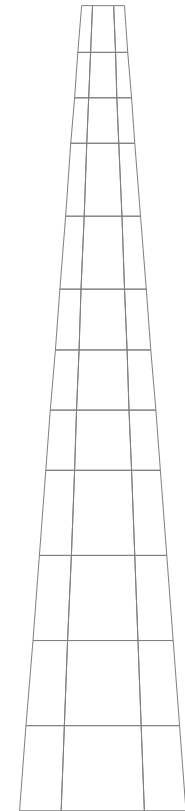
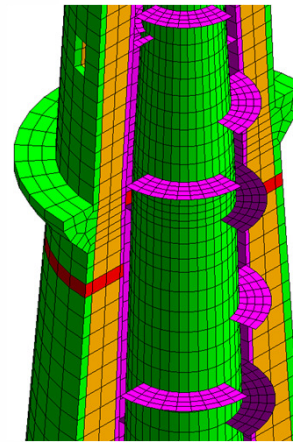
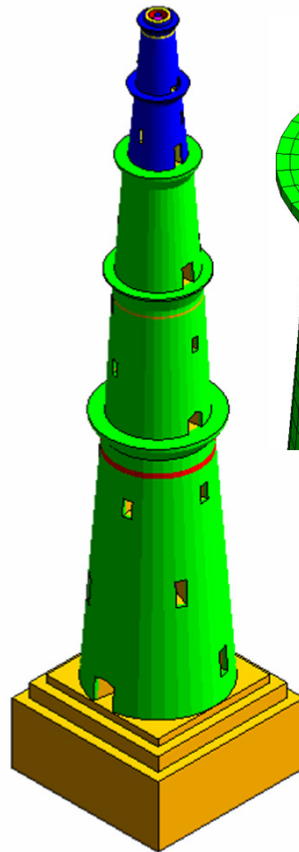
Levantamientos





Estudios preliminares





65,912 elementos
57,350 nodos
172,000 grados de libertad

20 elem
41 nodos
120 gdl

39 elem
52 nodos
117 gdl 53



Método Douglas – Reid, para estimar las frecuencias mediante:

$$f_i^D (X_1, X_2, \dots, X_N) = C_i + \sum_{k=1}^N [A_{ik} X_k + B_{ik} X_k^N]$$

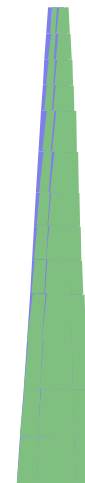
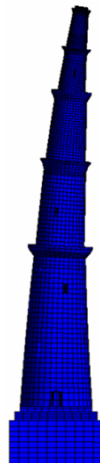
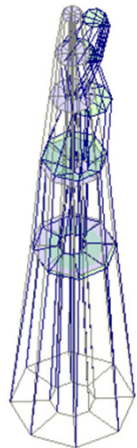
$$J = \sum_{i=1}^m w_i \varepsilon_i^2$$

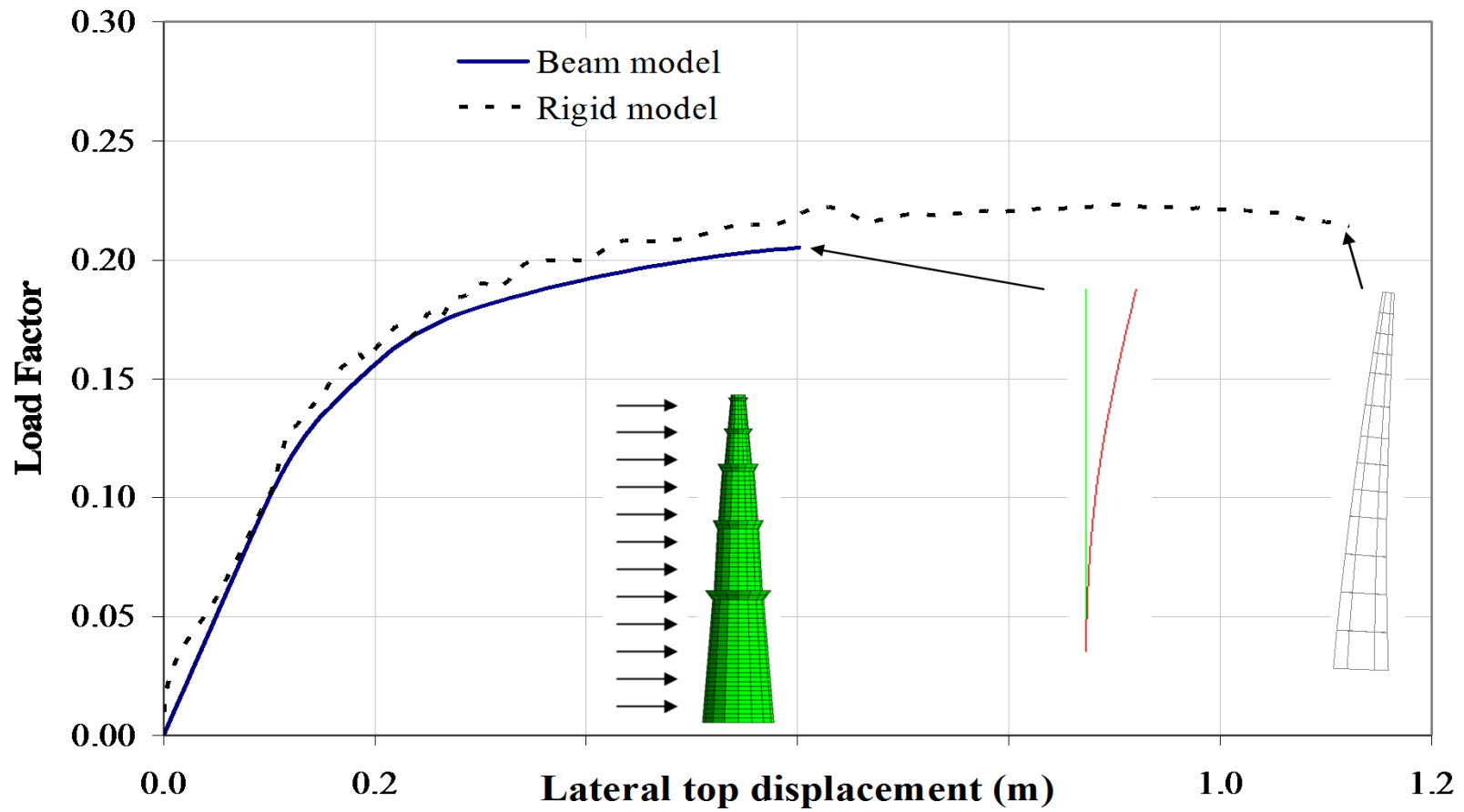
$$\varepsilon_i = f_i^{EMA} - f_i^D (X_1, X_2, \dots, X_N)$$

Material	Elastic Modulus (GPa)	Specific mass Kg/m ³	Poisson's coefficient	f_c kPa	f_t kPa	f_s kPa	φ (°)
Masonry 1 – 3	3.18	1900	0.2	3000	35	45	15
Masonry 4 – 5	0.57	1900	0.2	1500	35	45	15



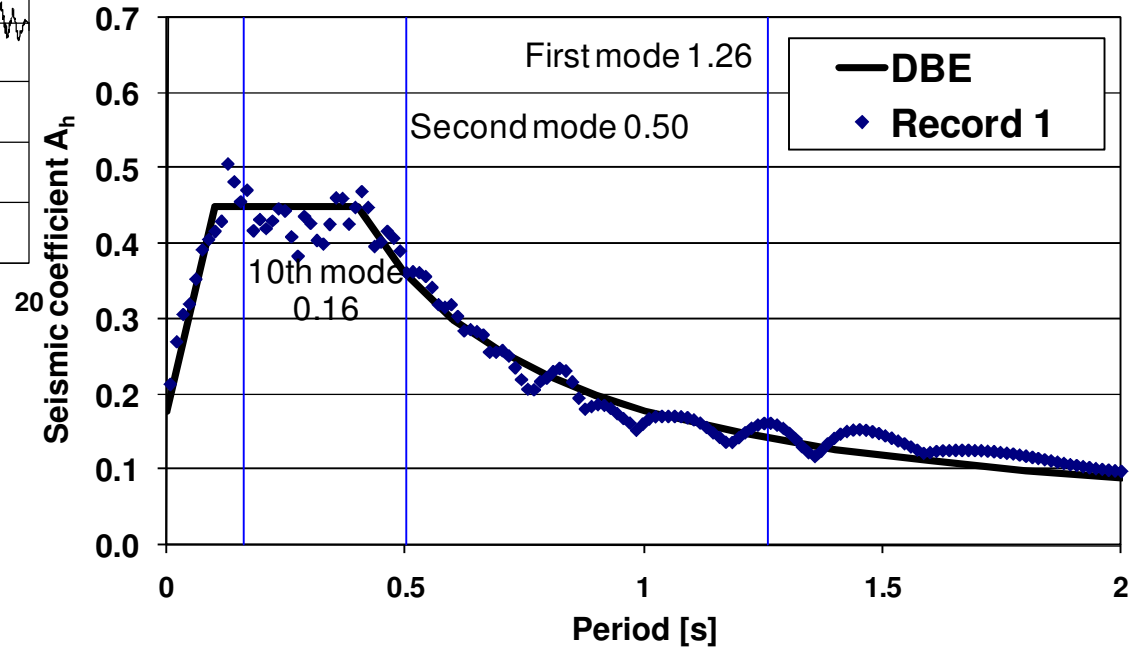
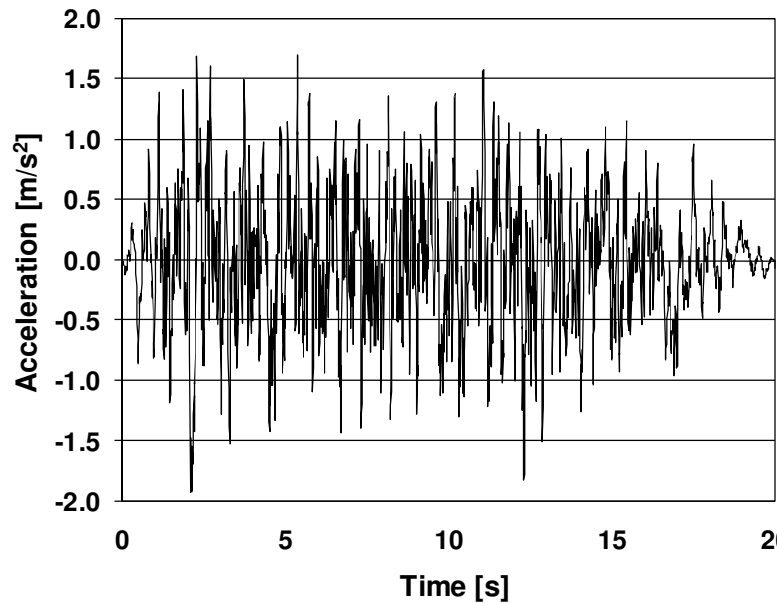
Mode shape	Comment	Frequencies [Hz]						
		Experimental	Solid	Error (%)	Beam	Error (%)	Rigid	Error (%)
1	1 st Bending, z	0.789	0.71	-10.01				
2	1 st Bending, x	0.814	0.71	-12.77	0.734	-8.42	0.778	-3.17
3	2 nd Bending, x	1.954	2.07	5.93				
4	2 nd Bending, z	2.010	2.09	3.98	2.257	13.87	1.886	-4.84
5	3 rd Bending, x	3.741	3.55	-5.10				
6	3 rd Bending, z	3.862	3.59	-7.04	4.129	8.62	3.582	-5.77
7	1 st Torsion	4.442	4.80	8.06	3.656	-17.69	---	---
8	4 th Bending, x	5.986	5.98	-0.10	6.665	10.21	6.419	5.65
9	4 th Bending, y	6.109	6.02	-1.45				
10	1 st Vertical	6.282	5.35	-14.83	6.098	-2.93	7.061	12.41



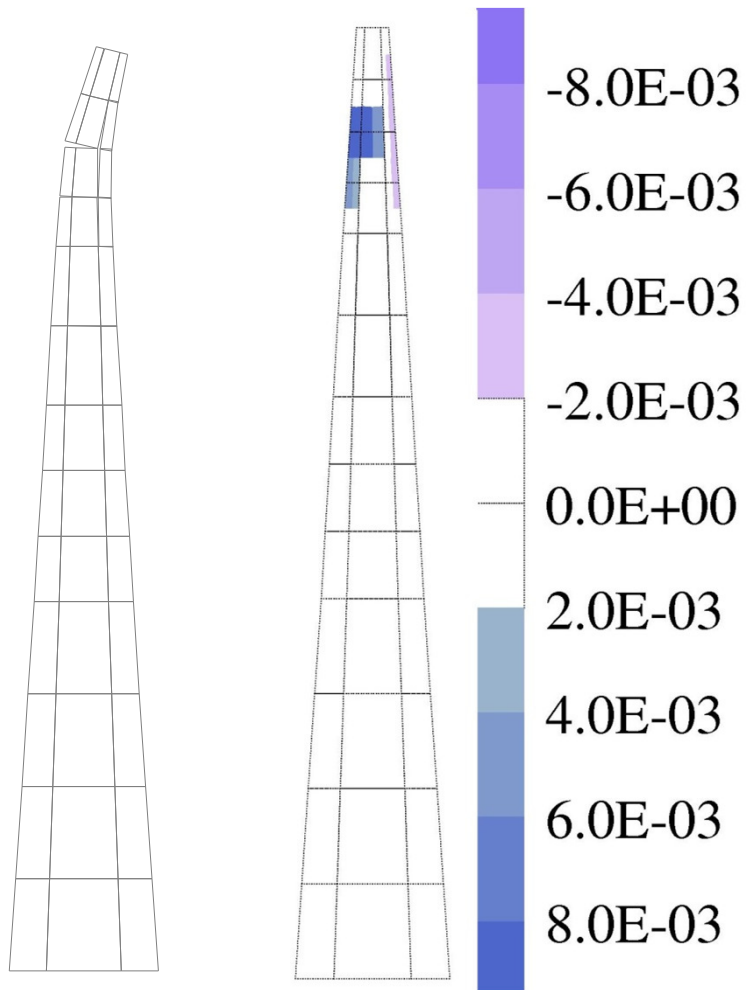




Análisis de las Condiciones Futuras









Con el fin de evitar *mutilar la componente histórica* y *salvaguardar los valores intrínsecos* de una estructura histórica durante una intervención, es necesario que el proyecto estructural esté basado en el “*entendimiento total*” del comportamiento estructural del inmueble.

De este modo, el diagnóstico y evaluación de la seguridad deben estar basados en un *análisis integral de la estructura*.

Este análisis involucra diversos aspectos, además de un análisis numérico, propiamente dicho, como: análisis histórico, análisis de daños e intervenciones, análisis de la geometría y materiales, etc



Así mismo, cabe recordar que, la *evaluación de la seguridad* estructural de un edificio histórico no debe estar *basada* únicamente en *cálculos numéricos*; sino también en las *evidencias sobre el comportamiento* del edificio ante eventos *pasados*, es decir, con base en su propia historia