



XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



Joaquín Lozano Mercado

# Introducción al estudio no lineal de mamposterías sin refuerzo

17 de mayo de 2024



XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



## Contenido

- Introducción
- Antecedentes históricos
- Trabajos en la Línea de Investigación: Mamposterías antiguas, Ciudad de Puebla
- Intervención en un templo dañado por el sismo de Tehuacán
- Avance en el estudio de comportamiento no lineal
- Conclusiones parciales
- Avances futuros
- Bibliografía

La ciudad de Puebla se funda el 16 de abril de 1531 con una traza de acuerdo a las normas vigentes en el virreinato y con el objetivo de tener un sitio de descanso entre el puerto de Veracruz y la ciudad de México, ubicación que le permitirá después ser parte de la ruta comercial entre España y Filipinas tanto en la ida como al regreso, incorporándose el puerto de Acapulco en dicha ruta entre continentes (Plano de la ciudad de Puebla, 1650, Antonio Pedro Molero, 2022).

“La reina Isabel, en su cédula fechada en Ocaña el 18 de enero de 1531, encargó al presidente de la Audiencia Real de la Nueva España, como representante del gobierno español en este país, que fundara un pueblo de cristianos españoles en la provincia de Tlaxcala, para que sirviera de residencia al prelado de la diócesis, porque éste, el obispo Fray Julián Garcés (1526-42) se había quejado ante la reina de que no podía residir entre los indios ni hacer su iglesia.” (Las Calles de Puebla, Hugo Leicht, séptima reimpresión, 2006)



XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



- Plano de la ciudad de Puebla, 1650, Antonio Pedro Molero, 2022

Esta ubicación geográfica también le ha tocado sufrir la acometida de ondas sísmicas de fuentes tan diversas como el océano Pacífico o del estado de Veracruz al oriente, o por el sur de fuentes en los estados de Oaxaca, Morelos y el mismo estado de Puebla; en el siglo XX se recuerda el sismo que colapso el Ángel de la Independencia en la ciudad de México, el de agosto de 1973, que generó el colapso del templo del Perpetuo Socorro, los sismos de 1999 de Tehuacán y de 2017 entre Morelos y Puebla, en donde se presentaron daños en muchos templos no solo de la ciudad de Puebla, sino en diferentes lugares del territorio estatal (Ver figura 2, templos dañados de la ciudad de Puebla, 1999).

Tabla 5.- Índices de Daño y Vulnerabilidad.

Inmueble	índice de daño	índice de vulnerabilidad
1 Capilla del Calvario	0.12	0.23
2 Capilla de los Plateros	0.15	0.38
3 Capilla La Verónica	0.10	0.25
4 Templo el Señor de Los Trabajos	0.12	0.35
5 Templo De San Ramón	0.18	0.42
6 Templo Santa Rosa	0.19	0.46
7 Capilla la Mansión	0.13	0.46
8 Iglesia de Balvanera	0.07	0.19
9 Templo De la Santísima Trinidad	0.26	0.46
10 Templo De las Capuchinas	0.28	0.57
11 Capilla de los Gozos	0.10	0.31
12 Catedral	0.09	0.21
13 Templo de Santa Inés Xanenetla	0.12	0.19
14 Templo de San José	0.10	0.54
15 Templo de San Agustín	0.14	0.19
16 Templo del Refugio	0.21	0.43
17 Templo de la Compañía de Jesús	0.36	0.55
18 Templo de San Sebastián	0.17	0.42
19 Templo de Santa Mónica	0.14	0.31
20 Templo de Santa Catalina de Siena	0.19	0.52
21 Templo de San Antonio	0.28	0.52

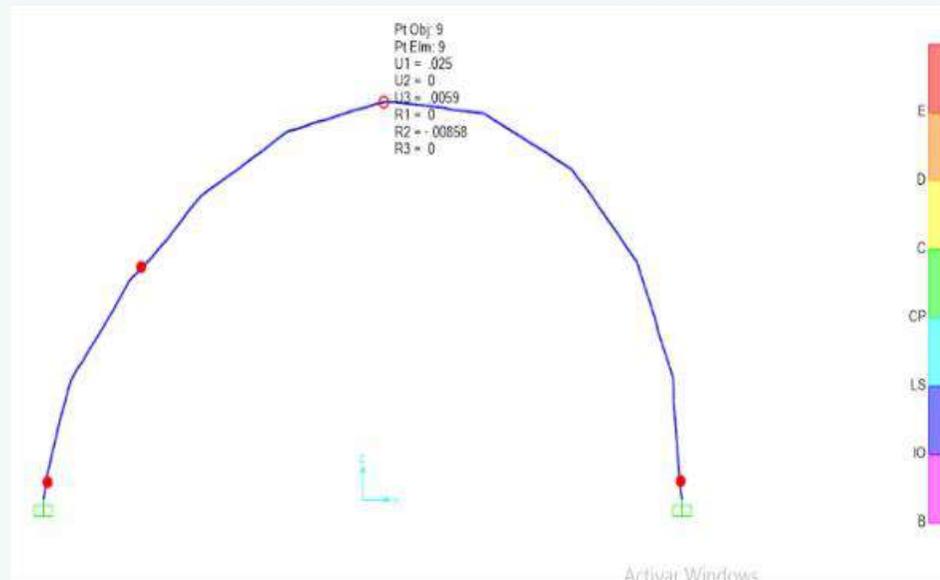
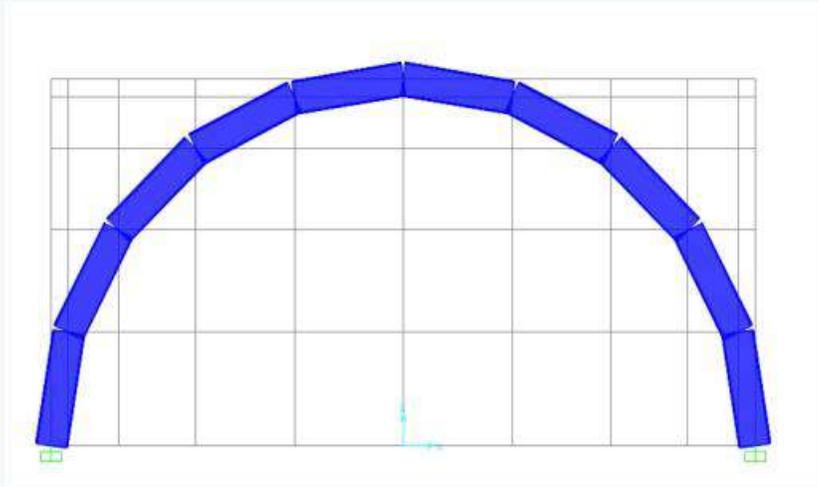


XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



Trabajos presentados en la Línea de Investigación: Mamposterías antiguas, ciudad de Puebla.

- **Estudio dinámico de los elementos de un templo antiguo de la ciudad de Puebla**, trabajo presentado para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Estructural por José Rafael Meza Pérez, en donde se presenta el análisis modal de diferentes macro elementos en el plano, las formas modales y periodos del cuerpo del coro con torres, del cuerpo del crucero, del Camerín, de la torre norte, y del templo completo, 2008.
- **Análisis de un arco de mampostería sin refuerzo, estudio comparativo**, Tesis de licenciatura, Sánchez, 2006.
- **Comportamiento dinámico de la catedral de la ciudad de Puebla**, presentado en Lisboa en 2012 en el 15 WCEE, Ramírez Cisneros, Lozano, Ferrer, Rojas-Palacios, Vázquez-Rosas y Mijares Arellano.
- Análisis de Estructuras de mampostería sin refuerzo, Tesina para obtener el grado de Maestra en Ingeniería Estructural de María Dolores Cuellar Juárez, 2014; el trabajo tuvo como objetivo presentar una metodología alternativa al análisis de estructuras de mampostería sin refuerzo, con especial énfasis en arcos. Con el programa SAP2000 se realizó un análisis pushover considerando el comportamiento no lineal del material.



### Nonlinear Material Data

Edit

Material Name: Concrete100      Material Type: Concrete

Hysteresis Type: Takeda

Drucker-Prager Parameters: Friction Angle: 0, Dilatational Angle: 0

Units: Kgf, cm, C

Stress-Strain Curve Definition Options:  
 Parametric  
 User Defined      Convert To User Defined

User Stress-Strain Curve Data

Number of Points in Stress-Strain Curve: 10

	Strain	Stress	Point ID
1	-0.01	-7.0307	E
2	-7.500E-03	-7.0307	
3	-5.450E-03	-7.0307	
4	-5.000E-03	-52.7302	-C
5	4.620E-04	-52.7302	
6	-3.080E-04	-35.1535	
7	-1.540E-04	-17.5767	
8	0	0	A
9	3.750E-05	0.3515	B
10	5.250E-05	0.0352	E

Order Rows



XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



- **Comportamiento de un edificio de acero mediante Pushover**, Tesis presentada por Francisco Javier Priego Prieto, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería en Estructuras, 2014; en el segundo capítulo se presentan aspectos del análisis no lineal, el método del Pushover se desarrolla en el cuarto capítulo y en el quinto se presenta el modelo del edificio en estudio.
- **Estudio del comportamiento estructural del ex Convento franciscano de Tecamachalco**, Trabajo presentado por Carlos Ramos para obtener el grado de Maestro en Ingeniería Estructural, 2015.



A continuación se presenta el templo del Refugio, construido a mediados del siglo XVIII en la parte norte de la traza original de la ciudad donde se iniciaba el camino a Tlaxcala, y que había presentado daños en sismos anteriores al del 16 de junio de 1999, probablemente en el siglo XIX, el colapso de la cúpula principal y en agosto de 1973 daños en torres y tambor de la cúpula principal.



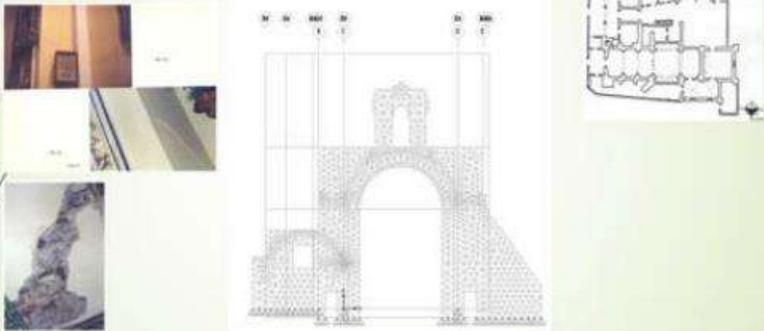
Figura 6 Traza inicial de la ciudad y fotografía del templo a principios del siglo XX

El templo había sufrido modificaciones importantes como la demolición de un muro que separaba la nave del templo de la zona del camerín y que servía de soporte a una parte de la cúpula del camerín. La cúpula del crucero principal es de estilo diferente a la cúpula del camerín, existe una referencia que señala que la cúpula original colapsó en un temblor ocurrido en 1864, además dicho crucero sólo tenía tres contrafuertes con trazo y dimensiones diferentes, lo que indica que se construyeron en etapas posteriores a la nave (Lozano, 2007).





Daños relacionados con el macro elemento 04



Daños en ventanas del tambor al interior y exterior (73 y 99); posible colapso cúpula principal siglo XIX





XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO

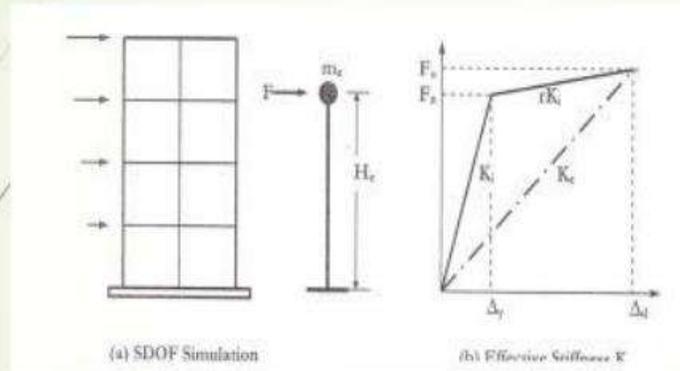




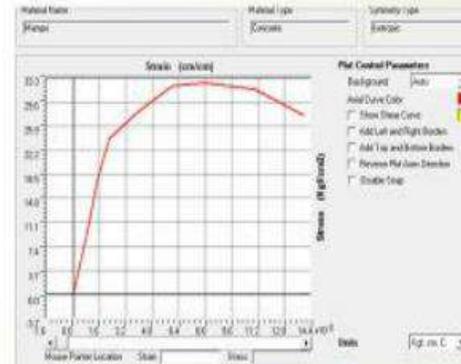
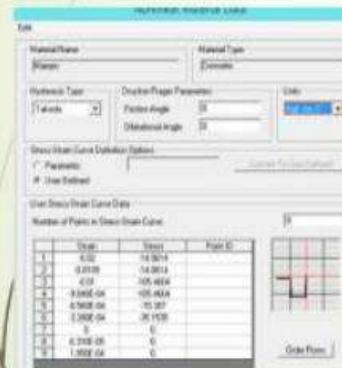
XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



## Comportamiento no lineal

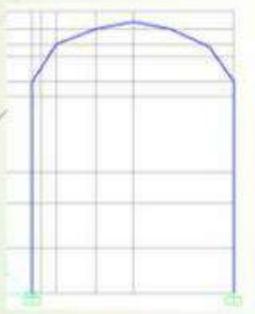


## Ley esfuerzo-deformación para la mampostería

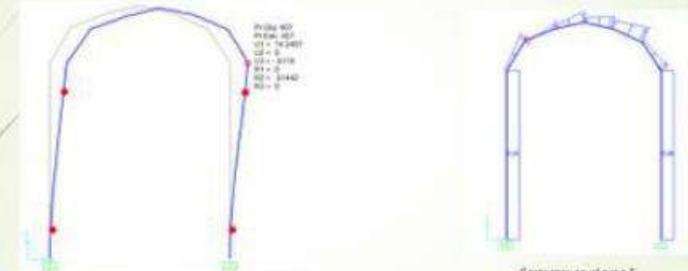


Segunda opción máximo de 32.5 kg/cm<sup>2</sup>

Modelo de 8 barras para el análisis estático no lineal del macro elemento 03

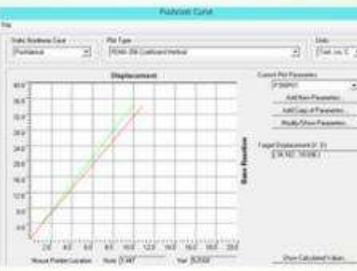


Mod. Elementos lineales	
Pushgrav+Pushlateral	CM+sobrepeso+factor(S)Lateral sobrepeso distribuido



Paso 5 mecanismo de colapso push lateral, desplazamiento en cm

Certeras en el paso 5  
 $v/W = 31/122 = 0.256$



FEMA 356	Método del Coeficiente			
V	15.00	T	D	4.85 cm



$$\frac{F}{W_{tot}} = \frac{B}{2 \cdot h} \left( 1 + \frac{W_{viga}}{W_{tot}} \right) \left( 0,50 + \frac{B}{D} \right)$$

where the symbols are given in figure 20:

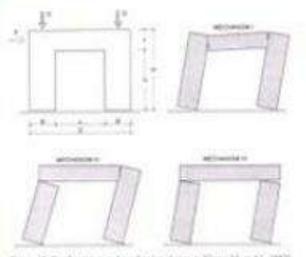
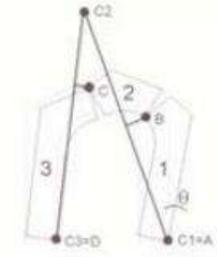


Figure 20. Effects considered in the approximated formula.

It's easy to understand the meaning of the three multipliers:

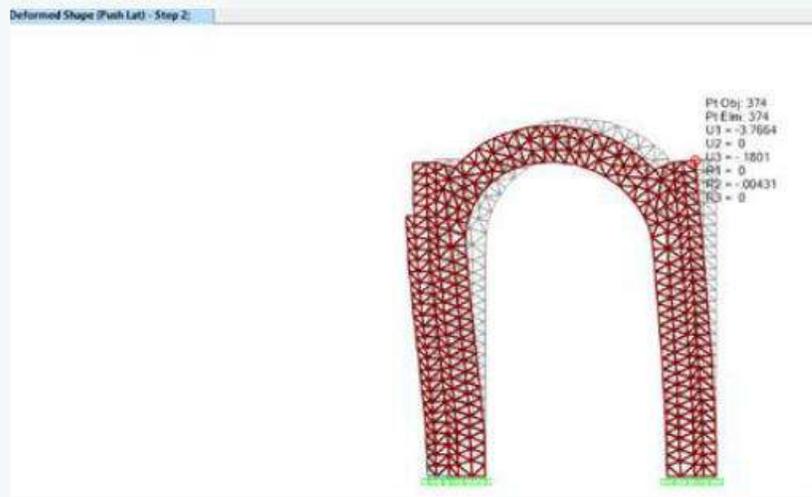
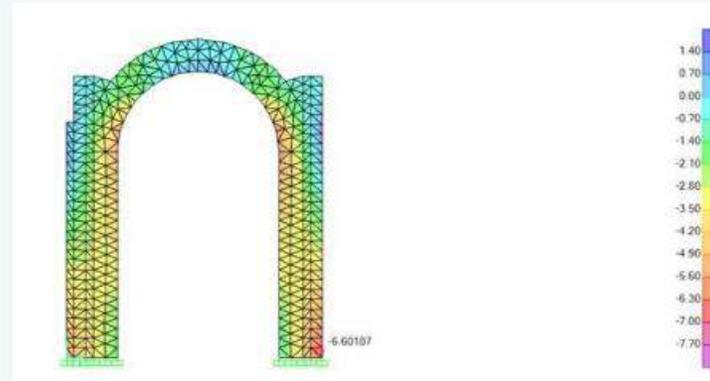
$\frac{B}{2 \cdot h}$	Column behavior as single point element
$\left( 1 + \frac{W_{viga}}{W_{tot}} \right)$	Stabilizing effect of beam
$\left( 0,50 + \frac{B}{D} \right)$	Effect of openings

- De la tabla anterior se obtiene la relación cortante basal entre peso:  $V/W = 5/113 = 0,05$ .
- Esta relación es menor al 50% del valor obtenido con la fórmula de Romano
  - El mecanismo en el modelo de barras con la presencia de articulaciones en los extremos de las columnas (mecanismo IV), es diferente al señalado en el arco (mecanismo I)



Alessandra Romano

B	h	Wviga	Wtotal	D			
1,9	9,45	60,135	75	10,55	B/2h	0,1005	Comportamiento col como panel solo
					1 + Wv/Wt	1,8018	Efecto estabilizador de la viga
					0,5 + B/D	0,68	Efecto de vanos
					V/Wt	0,12	
					V	9,24	bien



Columna izquierda:

42 T Columna derecha: 38.5 T

Sobrepeso: 38.75 T

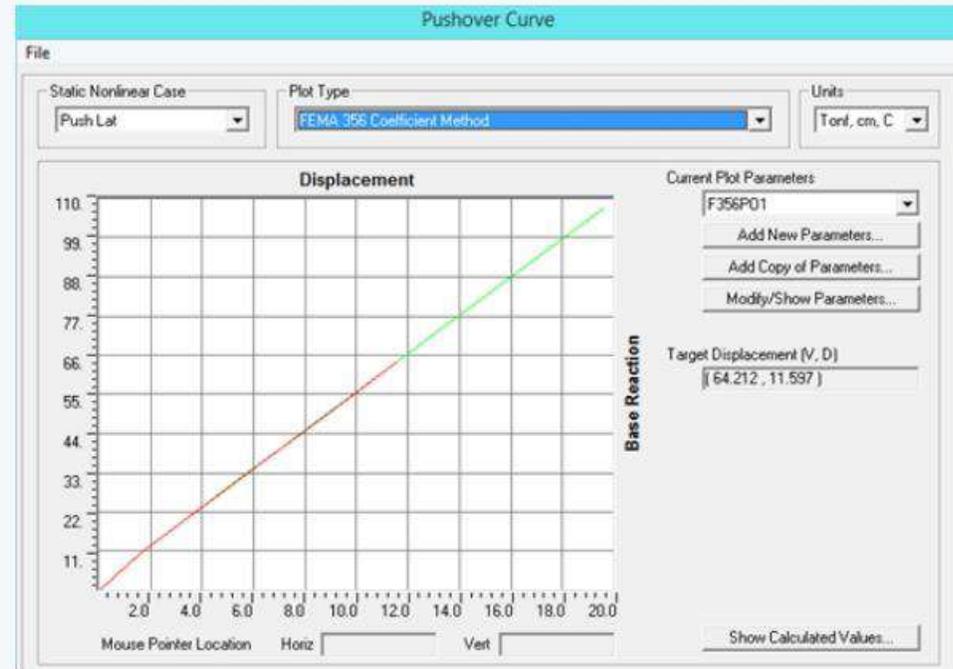
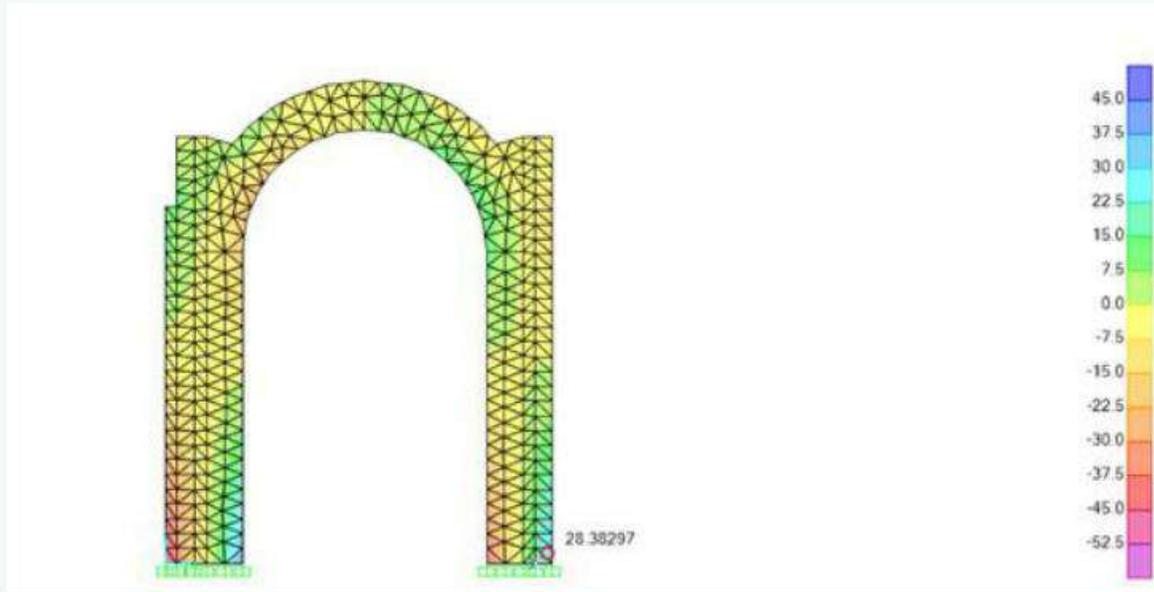
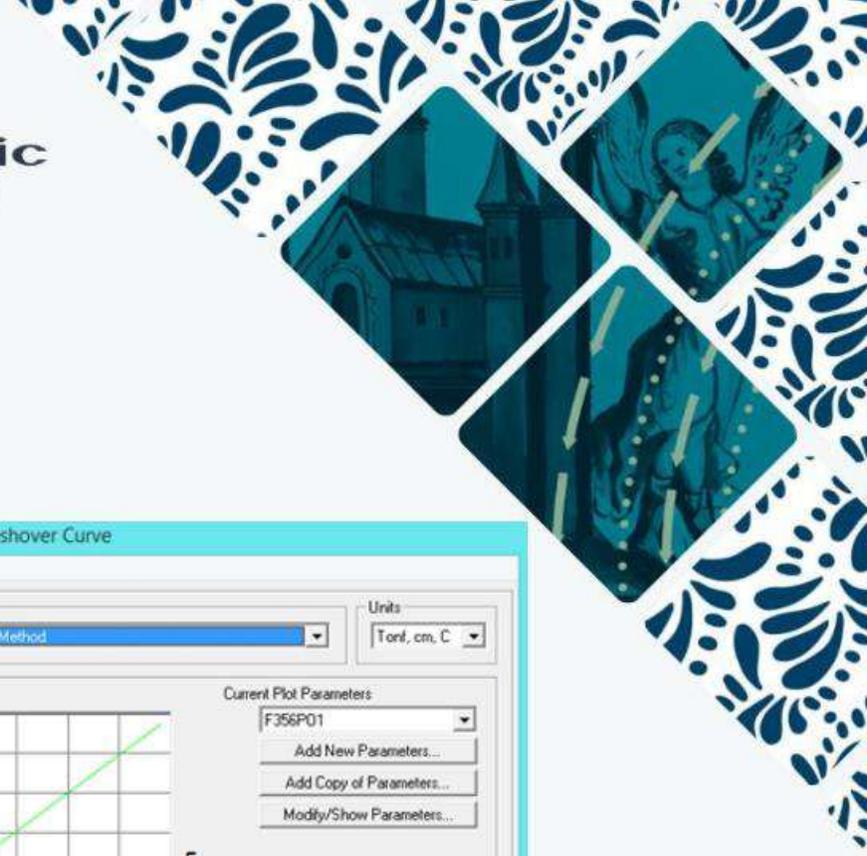
$V = 27.5 T + 10.4 T = 38 T$

$W = 119 T$

$V/W = 0.32$



XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



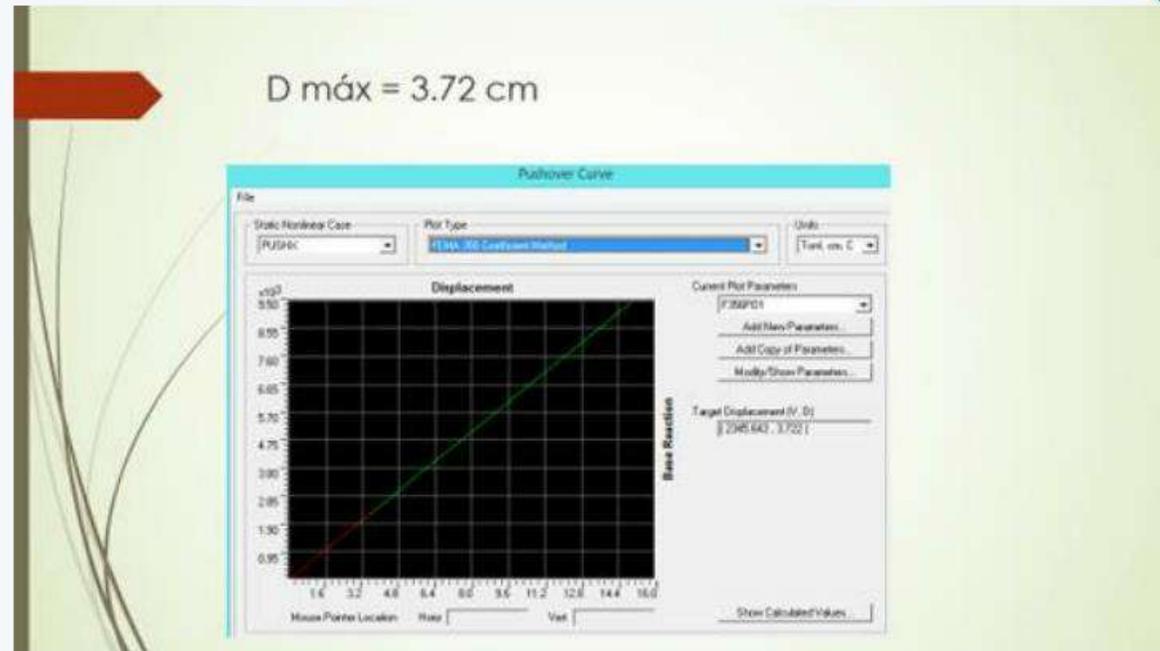
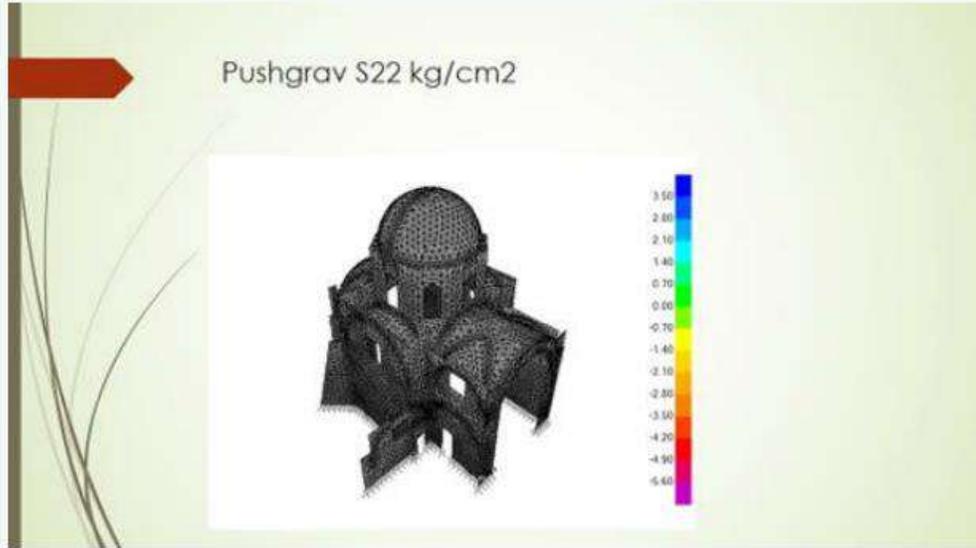
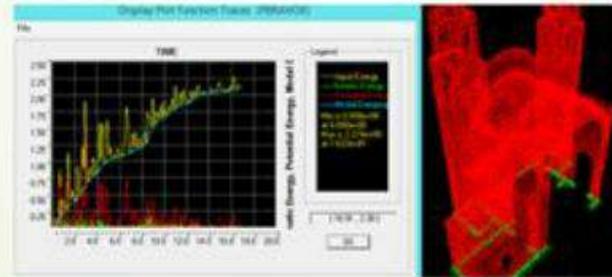


TABLE: Total Energy Components

OutputCase	CaseType	Input	Kinetic	Potential	ModalDamp	LinkDampers	LinkHystre	Error
Text	Text	Tonf-m	Tonf-m	Tonf-m	Tonf-m	Tonf-m	Tonf-m	Tonf-m
MODAL	LinModal	0	0	0	0	0	0	0
GRAVITACIONAL	LinStatic	0	0	0	0	0	0	0
Espectral-X	LinRespSpec	0	0	0	0	0	0	0
PBRAVOX	NonModHist	2.27401	0.27609	1.30369	2.09267	0	0	4.441E-15
BHONDAX	NonModHist	10.8653	1.97694	2.7317	10.72079	0	0	4.796E-14
CHILPANX	NonModHist	21.66071	3.87635	3.34237	21.55754	0	0	8.882E-14
Pushgravi	NonStatic	0	0	0	0	0	0	0
Pushlat	NonStatic	0	0	0	0	0	0	0

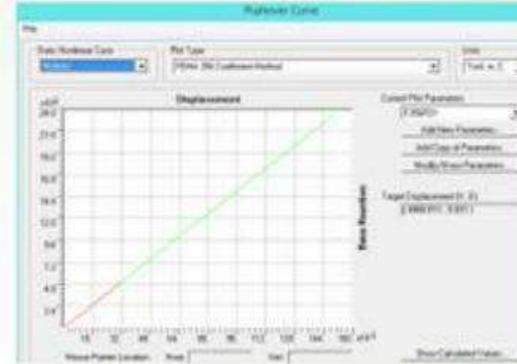




$D_{m\acute{a}x} = 0.03 \text{ cm}$

Tabla 3. Comparación de periodos

Modo	Completo	Entrada-coro	Crucero principal	Presbiterio-camerin
	Periodo	Periodo	Periodo	Periodo
	s	s	s	s
1	0.29	0.3	0.3	0.21
2	0.28	0.29	0.29	0.2
3	0.24	0.21	0.17	0.13



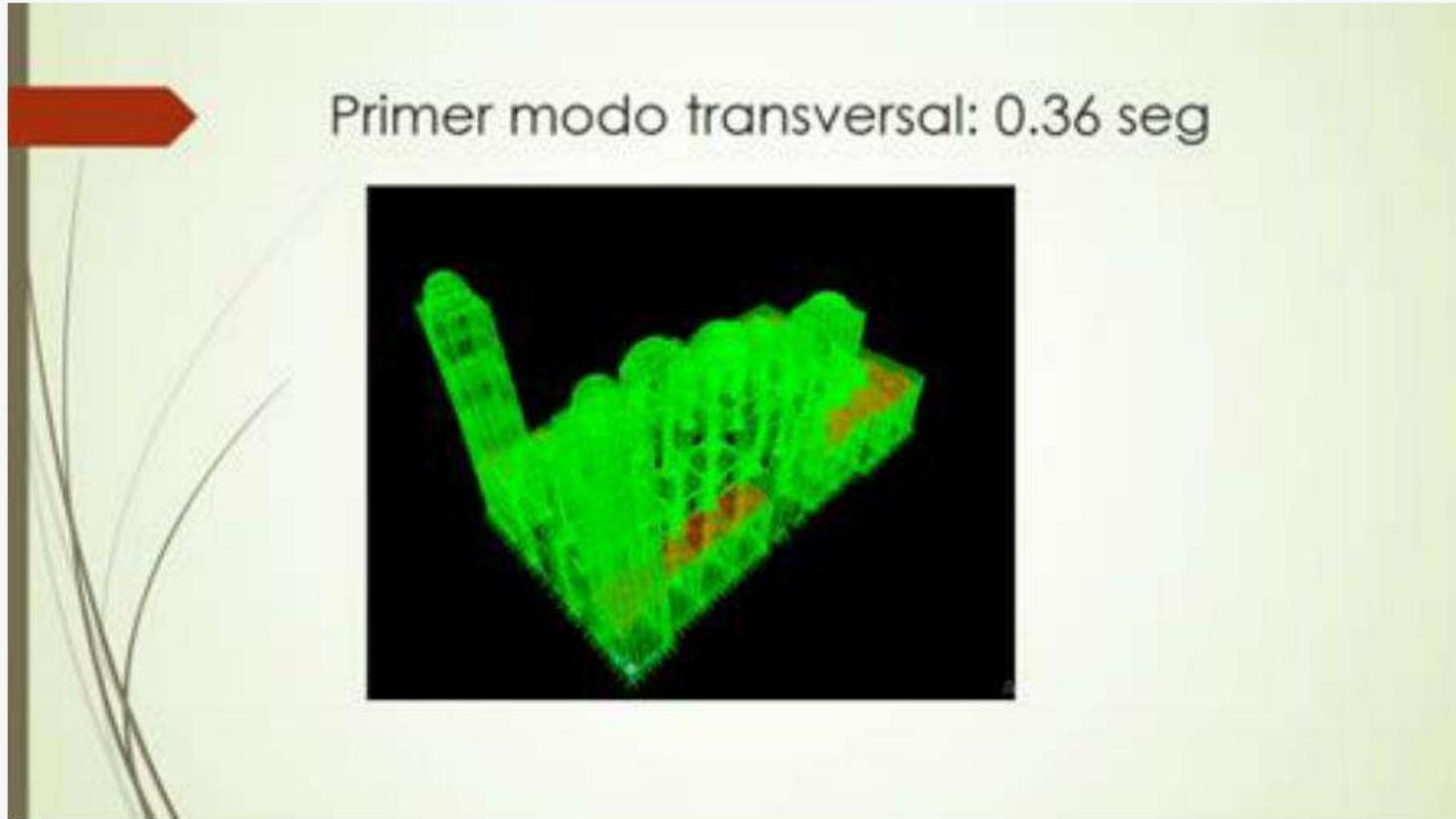


XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO

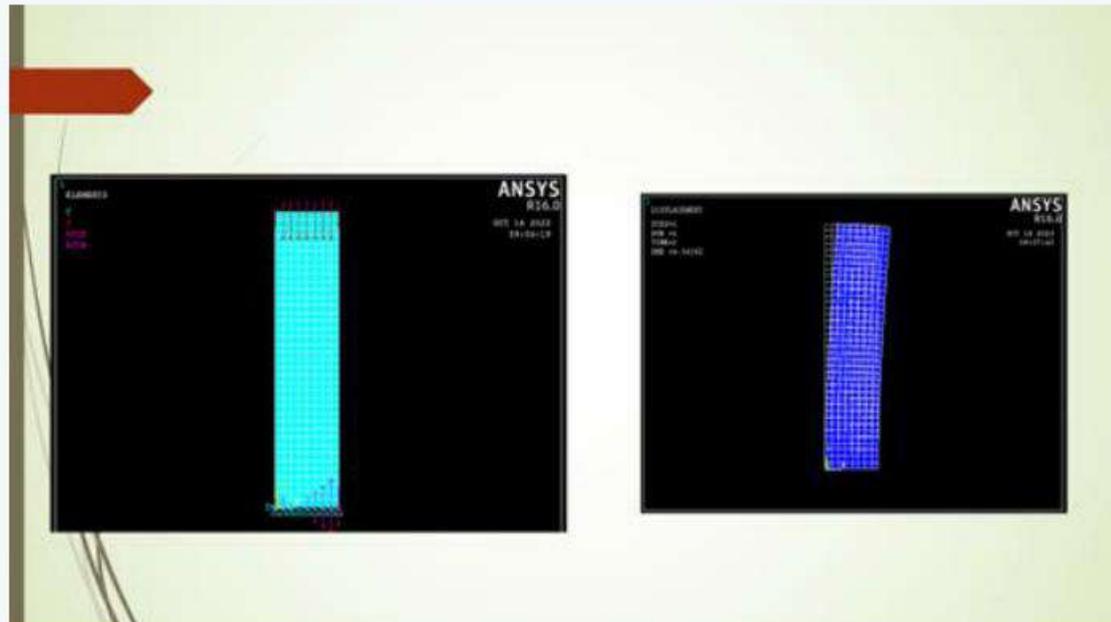


Las conclusiones del método del empujón confirman las conclusiones del Estudio dinámico de los elementos de un templo antiguo de la ciudad de Puebla (Meza, 2008) y se enfatiza que en el estudio de este tipo de estructuras en lugar de trabajar con el modelo completo son preferibles modelos parciales ya sea 3D o 2D, en donde se pueden presentar colapsos locales antes del colapso completo del conjunto.

Elaboración de otros modelos, la Catedral de la ciudad de Puebla con 7 589 elementos Shell y el Ex Convento Franciscano de Tecamachalco con 41 448 elementos sólidos; en ambos casos el modelo se calibró mediante vibración ambiental y ambos trabajos se limitaron al comportamiento elástico lineal.



Se propone incorporar el programa ANSYS a fin de elaborar modelos locales y realizar estudios en la etapa de comportamiento no lineal del material y poder seguir el daño (mecánica de daño continuo y mecánica de fractura, Cervera, 2003), así como aplicar el análisis estático no lineal a muros de mampostería modelando los tres elementos del muro: mochetas, faldones y nudos con el programa SAP o el 3Muri, en el caso de las construcciones del Centro de la ciudad de Puebla.



## 5 Modelos de daño continuo

### 5.1 Introducción: mecánica del daño continuo

La mecánica del medio continuo clásico permite representar mediante variables continuas globales los procesos microscópicos que tienen lugar en un medio heterogéneo. En este sentido, las deformaciones elásticas y plásticas, y los correspondientes efectos de endurecimiento y/o reblandecimiento (*hardening-softening*) se aceptan como variables continuas, a pesar de que los microdefectos que se producen (fisuras, dislocaciones, huecos, etc.) no lo sean.

Modelos de daño continuo

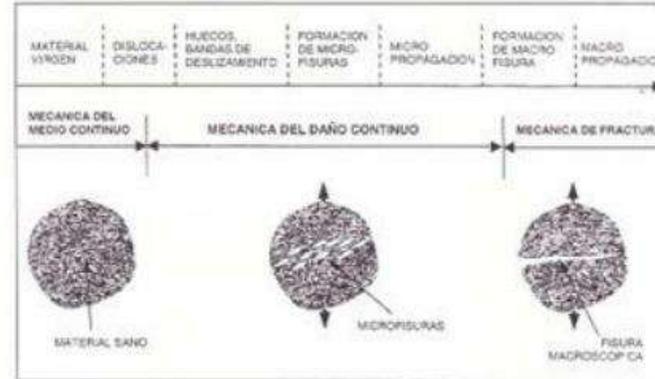


Figura 5-1. Estados de un material y modelos de comportamiento

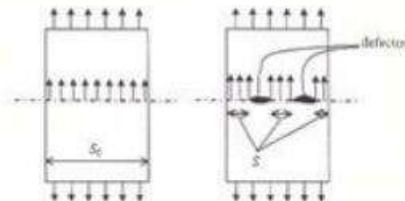


Figura 5-2. Interpretación física del daño

Daño localizado en el análisis de estructuras de obra de fábrica  
Clemente, Cervera y Roca, Rev. Int Mét. Num. Cál. Dis. Ing. Vol 24, 2008.

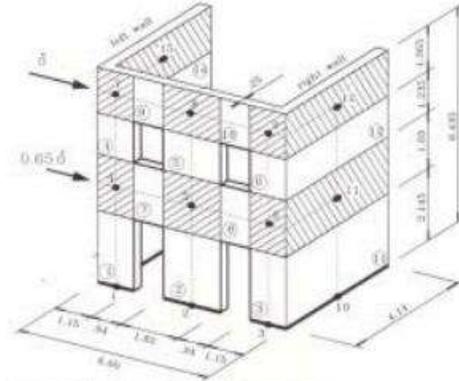


Figure 3. Full 3-D structure with loading conditions

Figura 42 A macroelement approach to the three-dimensional seismic analysis of masonry buildings, Brencich, Gambarotta & Lagomarsino, 1998



XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



# Carta de Atenas y de Venecia





XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO




Valor Curricular  
**120 h**

**PONENTES**

Ing. Joaquín Lozano Mercado  
Ing. Orlando Proserpi y González  
Ing. Rafael Meza  
Ing. José Manuel Cuatlayotl Sarmiento  
Ing. Carlos Ramos Moreno  
Ing. Miriam Sagrario Jiménez Castaños

**HORARIO**

Viernes de 17:00 a 19:00  
Sábados de 9:00 a 12:00

TEMARIO	
<p><b>Primer Módulo 60 horas</b></p> <p>-Conceptos Fundamentales y Herramienta matemática (20 horas) Imparte: Ing. Miriam Sagrario Jiménez Castaños Inicia: Viernes 2 de Febrero 2024 Termina: Sábado 24 de Febrero 2024</p> <p>-Descripción del movimiento y ecuaciones del movimiento Descripción de la deformación Deformación infinitesimal Esfuerzos Tensor de esfuerzos Ecuación de conservación balance Leyes de comportamiento de Materiales Ecuaciones constitutivas Material elástico de Cauchy Ley constitutiva elástica lineal general Ley de Hooke</p> <p>-Planteamiento del Problema Estático y Solución (20 horas) Imparte: Ing. Orlando Proserpi y González Inicia: Viernes 01 de Marzo 2024 Termina: Sábado 23 de Marzo 2024</p> <p>Ecuación de la estática como condición de equilibrio Método de rigideces: ecuaciones de equilibrio caso estático (2D) Estructuras en 3D Ejemplos en SAP 2000</p> <p>-Planteamiento del Problema Dinámico (20 horas) Imparte: Ing. Rafael Meza Inicia: Viernes 5 de Abril 2024 Termina: Sábado 27 de Abril 2024</p> <p>Sistemas de 1GL vibración libre y forzada sin amortiguamiento, y amortiguados Sistemas de varios grados de libertad Análisis modal Normas técnicas complementarias para Diseño por sismo Espectros de diseño Programa NONLIN</p>	<p><b>Segundo Módulo 60 horas</b></p> <p>-Problema del Continuo y Herramienta de Solución (20 horas) Imparte: Ing. Carlos Ramos Moreno Inicia: Viernes 3 de Mayo 2024 Termina: Sábado 1 de Junio 2024</p> <p>Solución mediante métodos numéricos Sistema de ecuaciones a resolver en el caso estático Problemas 2D Estado Plano de esfuerzos y estado plano de deformación Calibración del modelo Patologías del Continuo Problemas del Mallaado</p> <p>-Solución del Modelo con Mampostería Antigua (20 horas) Imparte: Ing. Joaquín Lozano Mercado Inicia: Viernes 7 de Junio 2024 Termina: Sábado 29 de Junio 2024</p> <p>No linealidad geométrica y del material Análisis estático no lineal Análisis no lineal Programa ANSYS</p> <p>-Intervención de Construcciones con Mampostería Antigua (20 horas) Imparte: Ing. José Manuel Cuatlayotl Sarmiento Inicia: Viernes 12 de Julio 2024 Termina: Sábado 3 de Agosto 2024</p> <p>Evaluación y diagnóstico Modelación de las construcciones de mampostería antigua Comportamiento global y local de estructuras de Mampostería Mecanismos de Colapso Identificación de macroelementos</p>



# ICOMOS: niveles de intervención

## Elementos Estructurales de la Obra de Fábrica por Miguel Angel Cobreros

### Capítulo 5

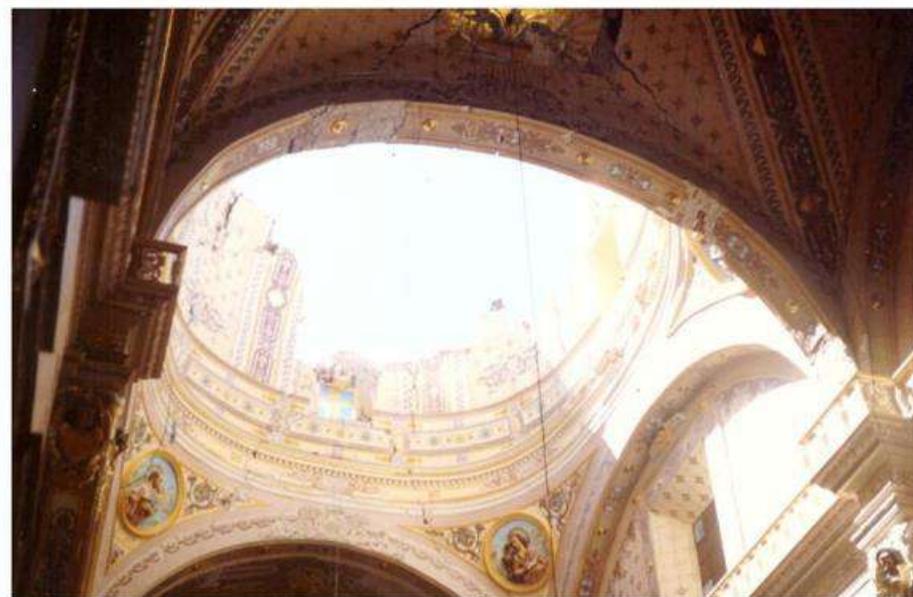
índice publicaciones electrónicas de la  
Escuela de Arquitectura de Sevilla

#### LAS REGLAS EMPÍRICAS

- 5.1 Introducción.
- 5.2 Clases y campo tipológico de las reglas
  - 5.2.1 Reglas para Arcos y Contrafuertes.
  - 5.2.2 Reglas para Bóvedas y Cúpulas.
  - 5.2.3 Reglas para Torres.
  - 5.2.4 Reglas para Puentes.
- 5.3 Fundamentos de las Reglas Empíricas.
  - 5.3.1 Resumen de los Conocimientos teóricos de los Tratados.
  - 5.3.2 Principio de Semejanza. Galileo y Rankine.
- Referencias.

#### 🏠 5.1 Introducción

Las reglas de diseño y dimensionamiento de tipo empírico constituyen un valioso arsenal documental al que podemos acceder para conocer los métodos antiguos de diseño. Estas reglas sirven básicamente para el dimensionamiento de





XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



Brencich, Gambarotta and Lagomarsino, (1998), “A macroelement approach to the three-dimensional analysis of masonry buildings, Italia

Cattari S., Curti E., Galasco A., Resemini S., (2005), “Analisi sismica lineare e non lineare degli edifici in muratura. Teoria ed esempi di applicazione secondo OPCM 3274/2003 e 3431/2005, Grupo Editoriale – Simone, Italia.

Cervera M., (2003), “Viscoelasticity and Rate-Dependent Continuum Damage Models”, CIMNE no. 79.

Leicht H., (2006), “Las Calles de Puebla”, pp. 138-139, séptima reimpresión.

Lozano J., (2007), “Estudio de la respuesta de un templo antiguo ante acciones sísmicas mediante Macroelementos”, Tesis doctoral, UAEM, Toluca, México

Mendoza A., (2006), “Índices de daño y vulnerabilidad sísmica en templos antiguos”, Tesis de Licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Meza R., (2008), “Estudio dinámico de los elementos de un templo antiguo de la ciudad de Puebla”, Tesis de Maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Molero A. P., (2022), “La Catedral de Puebla. Historia de su proceso constructivo”, p. 34, BUAP, Dirección General de Publicaciones.

Priego F. J., (2014), “Comportamiento de un edificio de acero mediante Pushover”, Tesis de Maestría, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Prat P., Gens A., (2000), “Leyes de Comportamiento de Materiales, Apuntes, Curso de Máster, UPC.

Romano A., (2005), “Modeling, Analysis and Testing of Masonry Structures”, Doctoral Thesis, Università degli Studi di Napoli Federico II, Italia.





XXVIII  
CONSEJO DIRECTIVO



# ¡Gracias!

## Joaquín Lozano Mercado

[jjdlozano51@hotmail.com](mailto:jjdlozano51@hotmail.com)

2224260770