procesamiento de ingeniería estructural, s. c.

caminos y puentes

CMI
Consultora Mexicana de Ingeniería

III Simposio Internacional sobre Diseño y Construcción de Puentes
Bucaramanga, Colombia. Diciembre 2009

Evaluación de estructura mediante pruebas de carga

Alberto PATRON

Consultora Mexicana de Ingeniería S.A. de C.V.

CMI
Consultora Mexicana de Ingeniería

Evaluación mediante pruebas de carga

- Contexto
- Ejemplo de aplicación :
  - ✓Puente Atirantado
  - ✓Otras estructuras

✓ Contexto

Evaluación del estado de la estructura

☞ Parámetros indicando la salud

- Revisión general
- Medición de la presión
- Medición de pulso
- Etc.

- Inspección Detallada
- Medición de deformaciones
- Caracteristicas vibratorias
- Etc.

Conclusión :

☞ Emisión de un dictamen sobre el estado de salud

Diseño de estructuras

Gran cantidad de hipótesis !!

- Dimensiones de la estructura
- Comportamiento de los materiales
  - Módulo Elastico
  - Resistencia del concreto
  - Flujo plastico
  - Respuesta del suelo,
  - Etc.
- Cargas sobre la estructura

Solución = Factores de Seguridad + *Arte* del ingeniero

¿ Comportamiento real de la estructura ?

Comportamiento real de la estructura

- Necesidad de pruebas sobre estructura real
- Caracterización del comportamiento **real**
- Obtención de puntos de calibración
- Corrección de modelo matemático

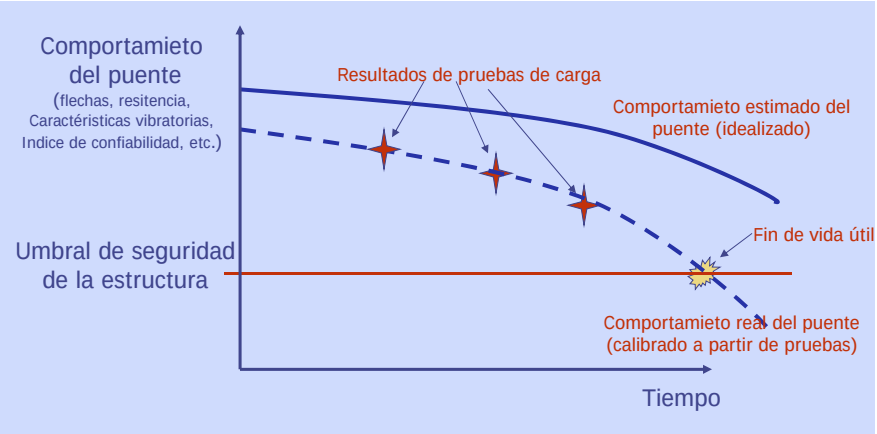
↓

Modelo representativo de la estructura

↓

Mejor dictamen sobre estado de la estructura

Comportamiento real de la estructura



Pruebas de carga Dinámicas

- Primeras aplicaciones -> 1950 (aeronáutica)
- Primeras aplicaciones a puentes -> 1970
- Objetivos :
  - Identificación de caracteristicas vibratorias (Períodos, Formas Modales, Amortiguamiento)
  - Evaluación de “patologías” vibratorias
  - Reducción de incertidumbres
  - Detección de daños
- Fuente de excitación -> Tipo de medición
  - Ubicación de captores,
  - Precisión y duración de la medición

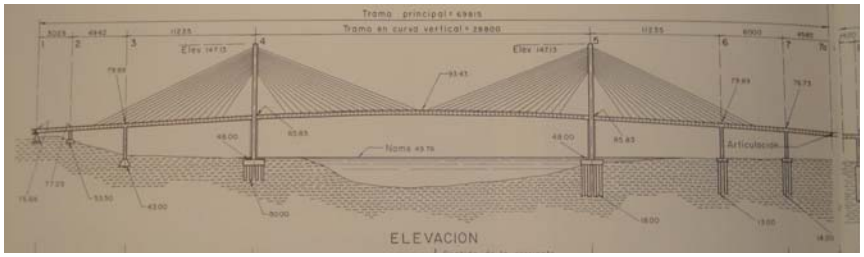
✓ El puente “Antonio Dovalí Jaime”

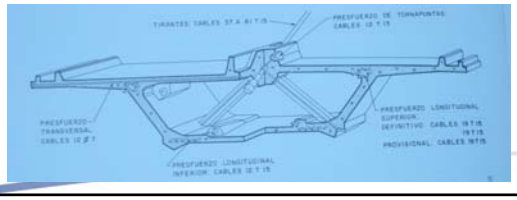
El puente “Antonio Dovalí Jaime”

- Primer puente atirantado de México
- Inagurado en 1984
- Estructura excepcional !!

El puente “Antonio Dovalí Jaime”

- Longitud total del puente = 1170 m
- Tablero en concreto presforzado
- Claro principal = 288 m

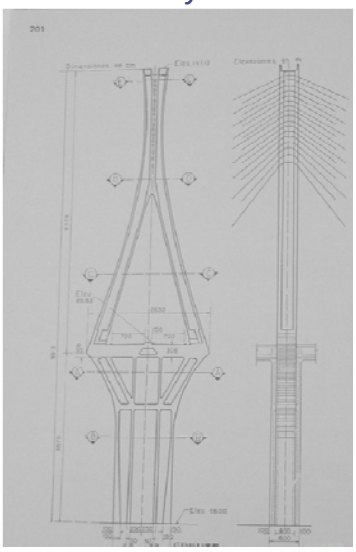


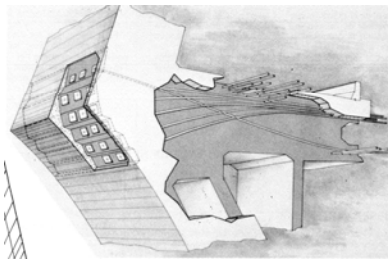


El puente “Antonio Dovalí Jaime”

caminos y puentes

- Pilas y Pilones de concreto reforzado y presforzado

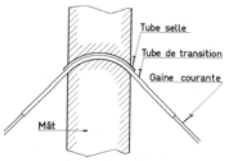




Anclaje de tirantes en pilón

Solución tradicional

Solución empleada



Problemática

- Estructura con 23 años de edad
- Medio ambiente agresivo (marino + industrial)
- Estado del puente ?

- Operador (CAPUFE)
- Inspección detallada (2006)
- Verificación de la estructura (2007)
  - Pruebas de carga
  - Modelo matemático calibrado

Dictamen sobre la estructura

✓ Instrumentación y pruebas de carga

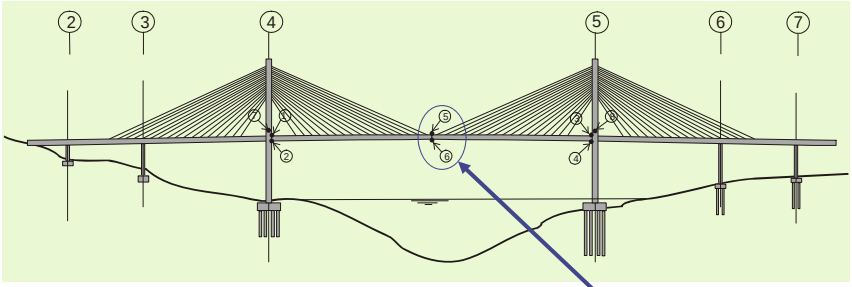
Pruebas de carga

Dos tipos de pruebas de carga :

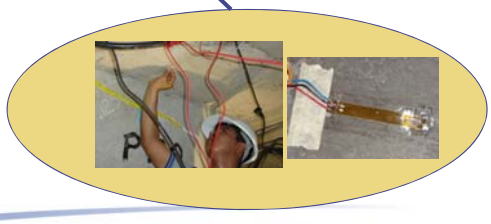
- Estaticas
  - Obtención de relaciones fuerza/deformación
  - 3 pruebas diferentes
- Dinámicas
  - Obtención de caracteristicas vibratorias
    (Período, Formas modales, Amortiguamiento)
  - 3 pruebas diferentes (ambiental, Circulación controlada, Impacto)

Puntos de medición de esfuerzos

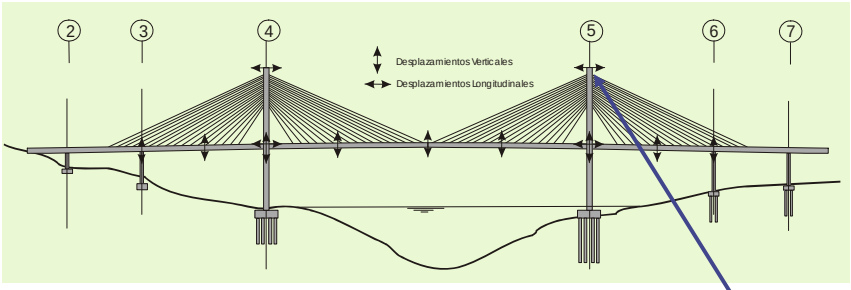
- 8 puntos de medición de esfuerzos



- Medición con “strain gages”,
- Deformaciones muy pequeñas,
- Deformaciones -> Esfuerzos



Puntos de medición de flechas



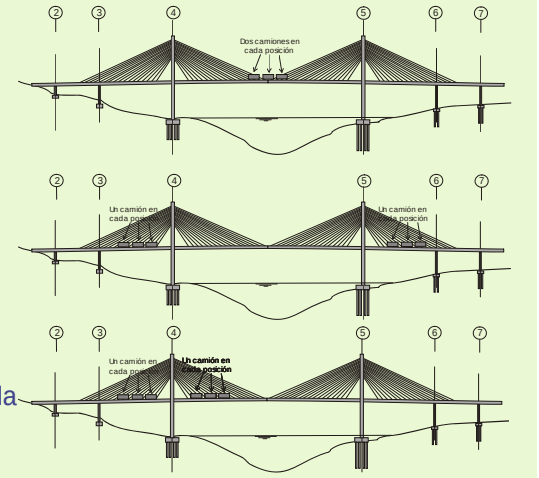
☞ 13 puntos de medición de flechas

3 Pruebas de carga estática

Momento (+) al centro

Momento (-) al centro

Momento (-) sobre pila

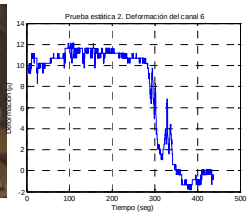


Pruebas de carga estática

Pesaje de camiones

Ubicación en el puente

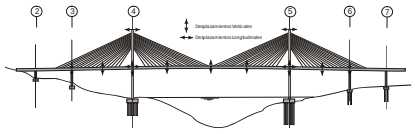
Medición de esfuerzos

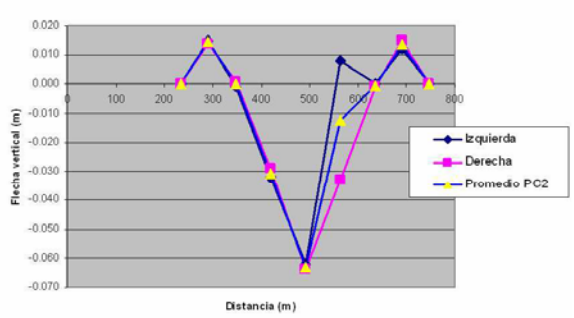


Medición de flechas

Pruebas de carga estática

Resultados (flechas)





☞ Flecha máxima = 6.5 cm

Pruebas de carga dinámicas

- Todas las estructuras vibran
- Medición de vibraciones

↓

Obtencion de caracteristcas vibratorias

(periodo, modos de vibrar, amortiguamiento)

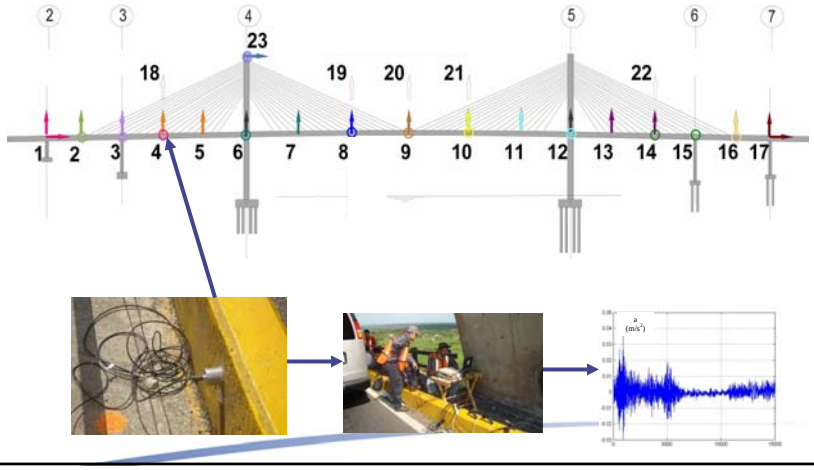
↓

- Parámetros muy útiles sobre la estructura

Pruebas de carga dinámica

Puntos de medición de aceleraciones (excitación ambiental)

- 23 puntos de medición de aceleración

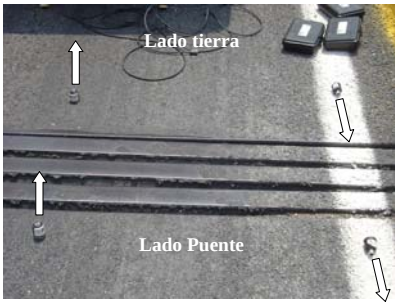


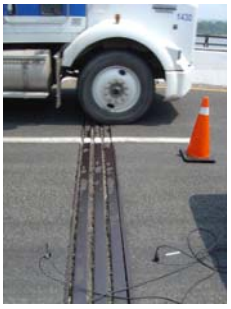
Pruebas de carga dinámica

Prueba de Impacto

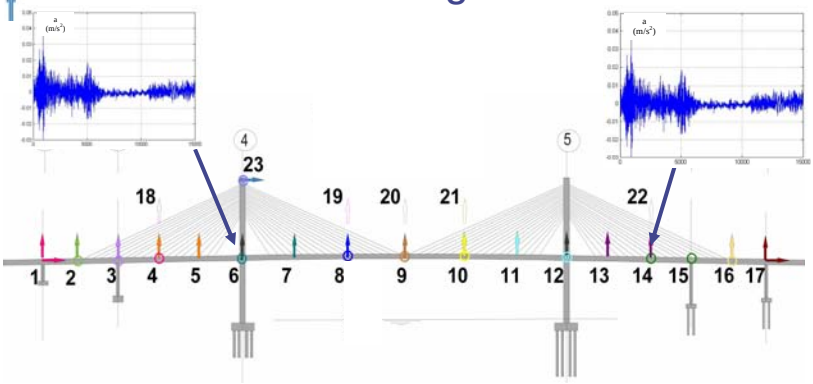
Pruebas de carga dinámica

Instrumentación de la articulacíon





Pruebas de carga dinámica



Identificación Modal

- Estudio de la relación de las aceleraciones en varios puntos
- Obtención de caracteristicas vibratoiras del puente,
- Metodos muy complejos !

Pruebas de carga dinámica

Algunos resultados

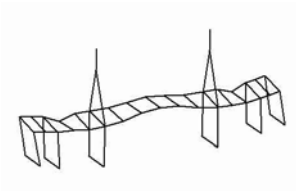
- Especto de potencia

Pruebas de carga dinámica

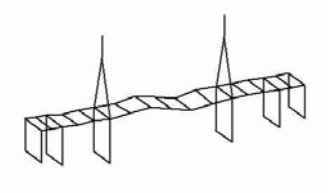
Identificación modal

☞ **12 modos identificados**

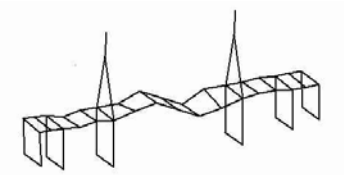
Modo	Frecuencia (exp.) [Hz]	Amortiguamiento (exp.) [%]
1	0.465	0.20%
2	0.490	0.40%
3	0.763	0.32%
4	0.793	0.77%
5	0.919	0.63%
6	0.938	0.28%
7	0.962	0.33%
8	0.994	3.93%
9	1.040	0.97%
10	1.209	1.37%
11	1.429	3.50%
12	1.596	1.33%



Modo 2



Modo 3



Modo 4

Pruebas de carga

Conclusiones preliminares :

Pruebas Estáticas

☞ Retorno al estado inicial (esfuerzos y flechas)

☞ Identificación de relaciones carga-deformación

Pruebas Dinámicas

☞ Identificación de 12 modos de vibrar

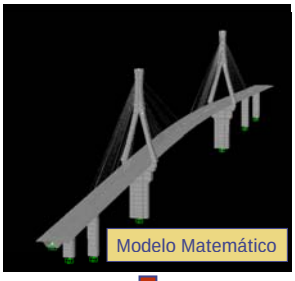
☞ Formas modales “normales”

☞ Verificación de funcionamiento de la articulación

✓ Evaluación de la resistencia

Evaluación de la aptitud al servicio del puente

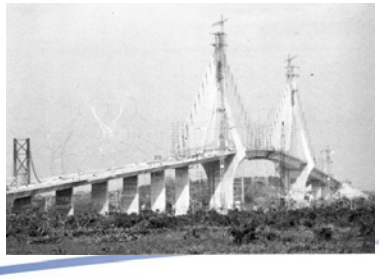
Pruebas de carga



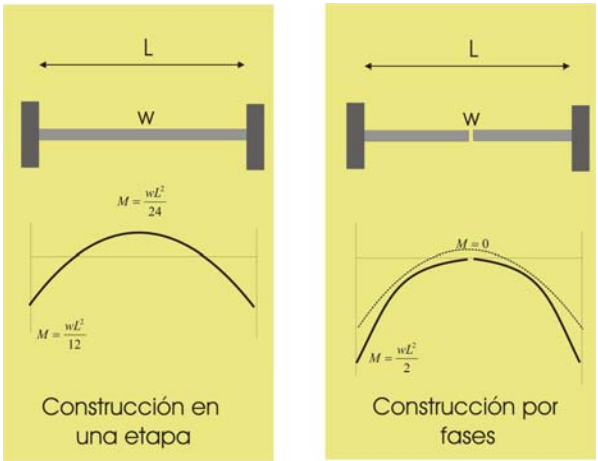
Dictamen sobre la estructura

Modelo matemático de la estructura

☞ Estructura construida por fases (voladizo)



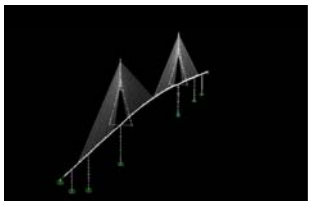
Importancia del procedimiento constructivo

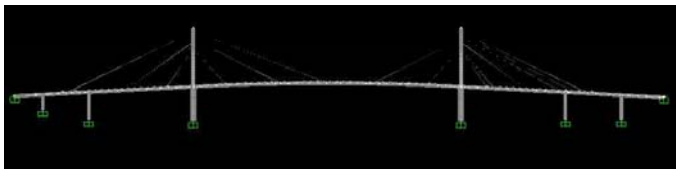


☞ Necesidad de modelar las fases de construcción

Modelo matemático de la estructura

- Modelo de análisis tridimensional
- Estudio de : Sismo, Viento, Carga Viva, Fases de Construcción

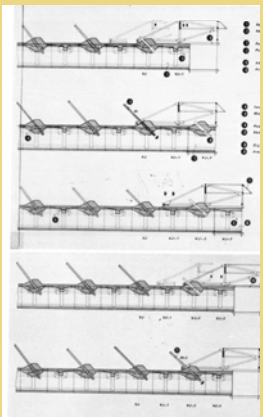




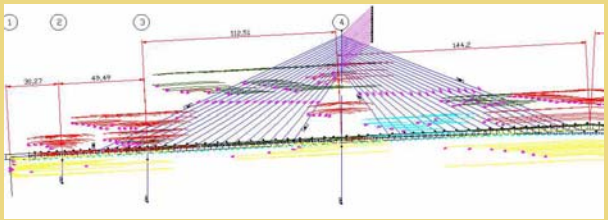
Modelo matemático de la estructura

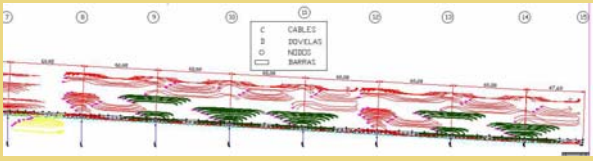
- Representación del proceso constructivo (71 etapas, 420 cables de presfuerzo !!)

Construcción tablero



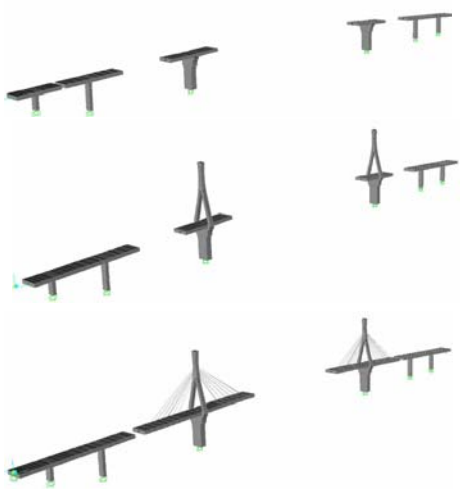
Cables de presfuerzo





Modelo matemático de la estructura

☞ Representación del proceso constructivo

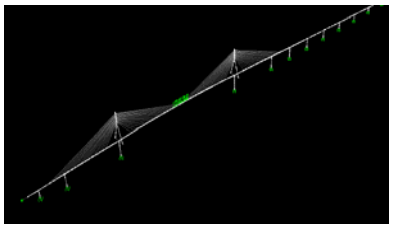


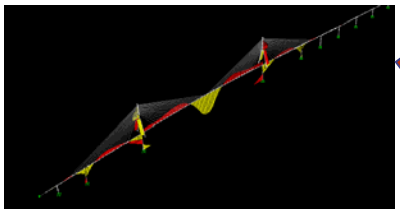
Evaluación de la resistencia

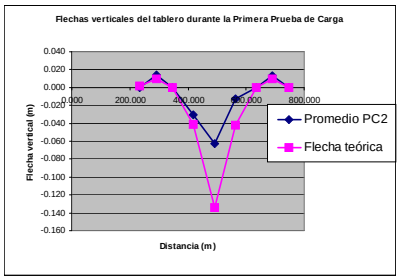
Modelo matemático de la estructura

Calibración del modelo (1/4)

Flechas pruebas de carga estáticas:







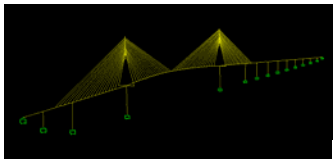
☞ Flechas teóricas > Flechas Reales

Modelo matemático de la estructura

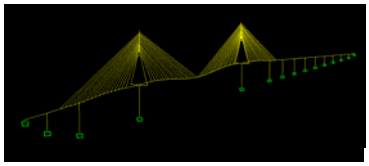
Calibración del modelo (2/4)

Modos de vibrar teóricos

Modo	Tipo	Periodo Num.(s)	Periodo Exp.(s)
1	Flexión Longitudinal Tramo Principal	2.55	2.151
2	Desplazamiento Lateral Tramo Principal	2.07	2.041
3	Flexión Longitudinal Tramo Principal	1.41	1.311
4	Torsión Tramo Principal	1.04	1.261
5	Torsión Tramo Principal	0.99	1.088



Modo 1



Modo 2

☞ La estructura "real" es mas rígida que lo supuesto teóricamente

Evaluación de la resistencia

Modelo matemático de la estructura

Calibración del modelo (3/4)

Hipótesis:

☞ Mayor módulo elástico del concreto (envejecimiento = incremento de "E")

☞ Mayores secciones resistentes en el tablero

☞ Menor masa de la estructura

☞ **Mayor sección de los tirantes**

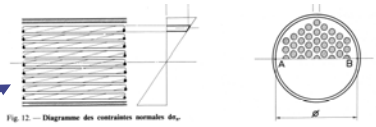


Fig. 12. — Diagramme des contraintes normales de σ_x.

150

☞ Funda de protección en acero

☞ Inyección con lechada

☞ Lechada+Funda en compresión

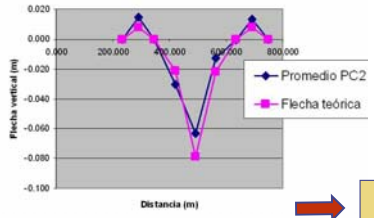
☞ Incremento de la sección del tirante

Modelo matemático de la estructura

Calibración del modelo (4/4)

- Incremento de la sección de tirantes
- Incremento del módulo elástico del concreto (15 %)

Flechas



Modelo representativo de la estructura real

Modos de vibrar

Modo	Periodo (exp) [s]	Periodo (num) [s]
1	2.151	2.353
2	2.041	2.017
3	1.311	1.353
4	1.261	0.960
5	1.088	0.908
6	1.066	0.907
7	1.040	0.860
8	1.006	0.866
9	0.962	0.737
10	0.827	0.733

Revisión estructural

- Revisión de : Tablero, Pilas y Tirantes
- Estados límite de Servicio y Resistencia última
- Empleo de norma AASHTO 2002

Tablero :

Verificación de Esfuerzos

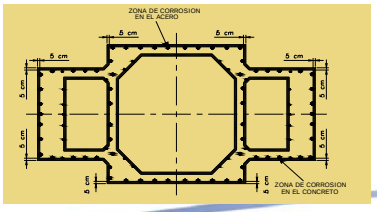
Resistencia última

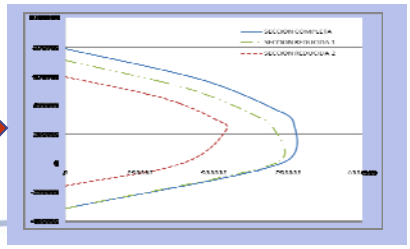
Revisión estructural

Pilas :

- Revisión en flexocompresión Biaxial
  - Elementos que presentan corrosión

- Hipótesis–>grado de corrosión





Conclusiones

- Estructura en buen estado
- Puente apto para prestar servicio
- Necesidad de mantenimiento correctivo (reparación de fisuras)
- Necesidad de estudios complementarios (nivel de corrosión)
- Pruebas de carga = herramienta muy util

Calculos con modelo Calibrado :

- Solicitaciones por sismo en pilas 20 % mayores
- Solicitaciones por Carga Vica en tablero 15 % menores

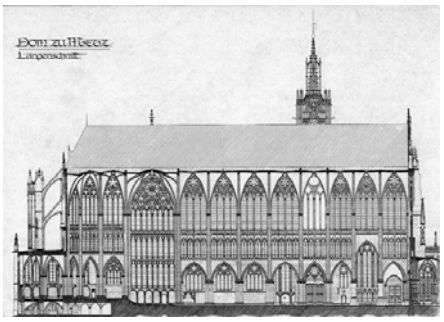
GRACIAS POR SU ATENCIÓN

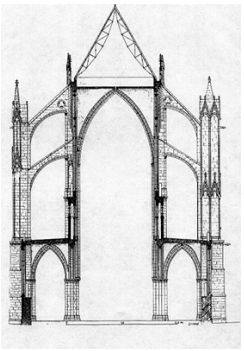
✓ La Catedral Gótica de Metz (Francia)

Catedral of Metz

☞ Algunas cifras

- Longitud total 136.0 m
- Altura de la nave 41.4 m
- Ancho de la nave 15.6 m
- Altura del campanario 88.0 m
- Area de ventanas 4960.0 m²
  (record para catedrales gòticas)



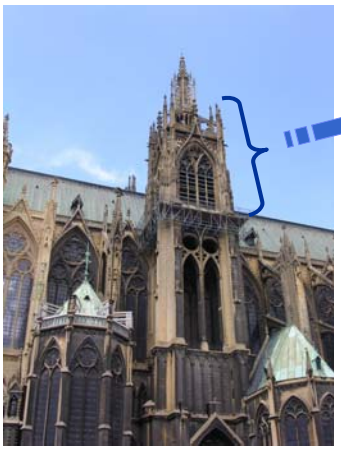


Catedral de Metz

Catedral de Metz

Torre de La Mutte

- Altura= 88,0 m



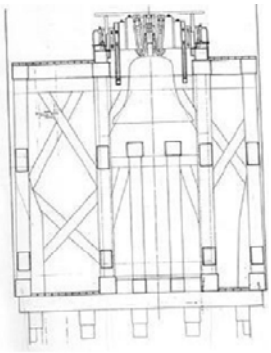
- Campana *La Mutte* :

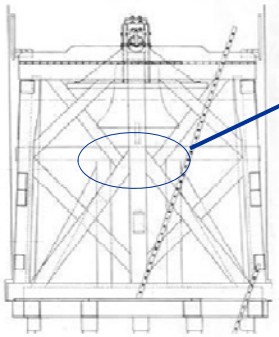
Peso= 11.8 ton

Catedral de Metz

Torre de La Mutte :

- Estructura de soporte de la campana

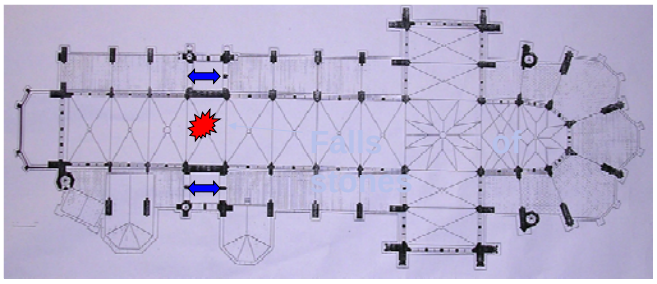




Patologìa

Efectos dinàmicos orginados por las campanas

- 1810 Daño estructural originado por el balanceo de las campanas (dos campanas).
- 1844 Oscilaciones importantes de la torre del campanario
- 1919 Liberaciòn de Metz (WW I) : Oscilaciones importantes + Daño estructural=> **Ultima utilizaciòn de la campana principal**



Evaluaciòn Dinàmica

Evaluaciòn numèrica de la respuesta (FEM)

Catedral gòtica= Estructura muy compleja

- Muchas incertidumbres
- Necesidad de valores reales de Prop. Dinàmicas
- Paràmetros para calibrar (validar) modelo numèrico

Evaluaciòn dinàmica ⟷ Modelo numèrico

Se puede usar nuevamente la campana?

Campañas de pruebas

- Primera campaña=> Caracterizaciòn de la respuesta dinàmica de la torre principal

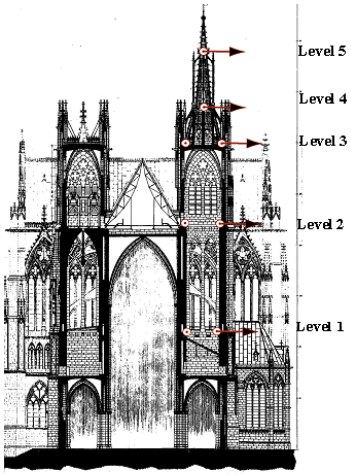
- Segunda campaña=> Caracterizaciòn de la respuesta dinàmica del soporte de la campana

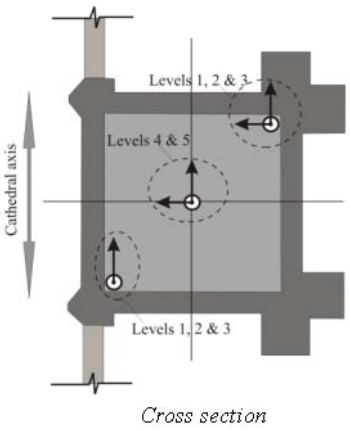
Fuentes de excitaciòn:

- Viento
- “Ruido” ambiental (trafico, manifestaciòn!!)
- Balanceo de la campana (pequeñas amplitudes)

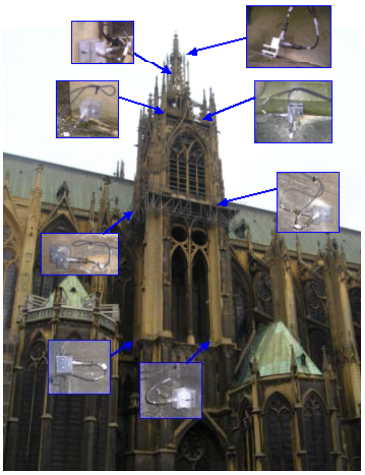
Puntos de mediciòn (Campaña 1)

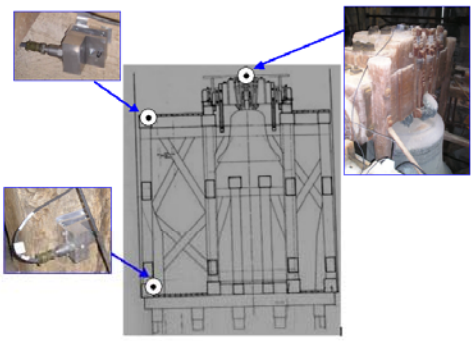
- 16 Aceleròghrafos (13 torre+ 2 soporte campana+ 1 campana)





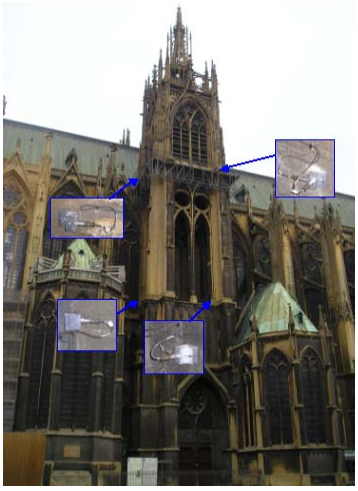
Puntos de mediciòn (Campaña 1)

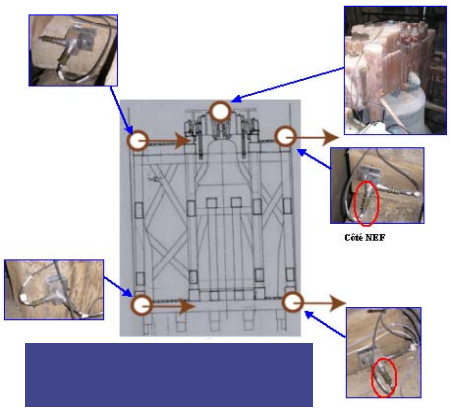




Puntos de mediciòn (Campaña 2)

☞ 16 Aeleròghrafos (7 torre+ 8 soporte campana+ 1 campana)



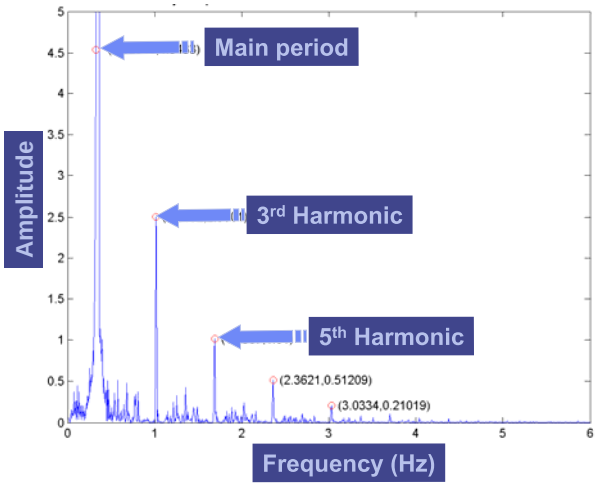


Resultados

Periodo de Vibraciòn de la campana:

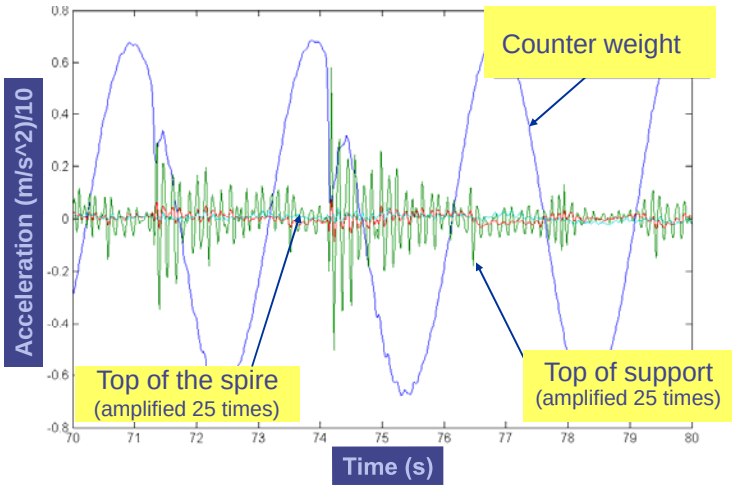
Fourier analysis:

☞ Deteciòn armònicas superiores



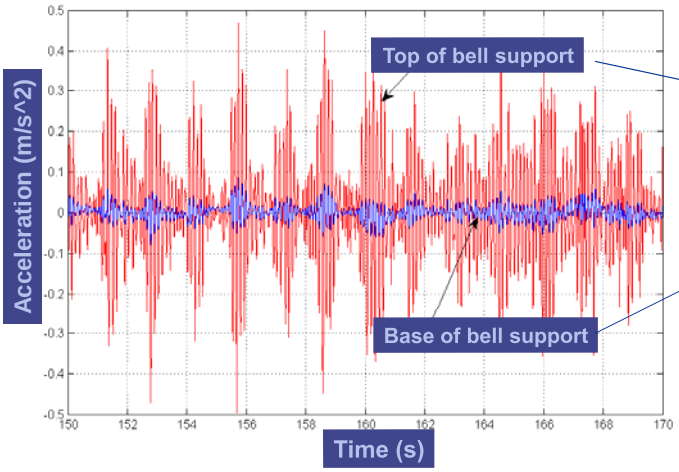
Resultados

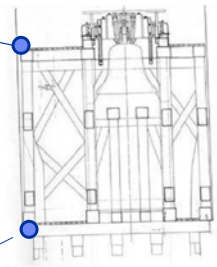
☞ Aceleraciones longitudinales (Oscilaciòn de la campana)



Resultados

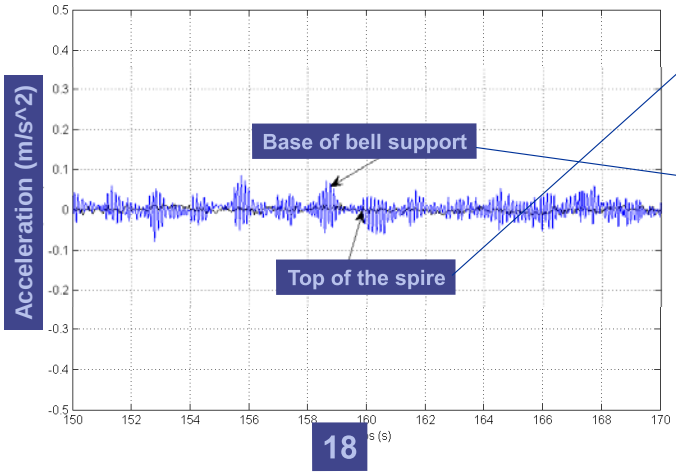
☞ Aceleraciones longitudinales (Oscilaciòn de la campana)

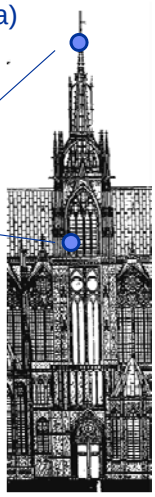




Resultados

☞ Aceleraciones longitudinales (Oscilaciòn de la campana)





Identificaciòn Modal

- Toolbox *Identification* (LCPC)
- Mètodo del decremento aleàtorio

  Fuente de excitaciòn= Ruido ambiental+ viento
- Resultados : 12 modes identificados (Perìodo + Amort.+ Forma)

Mode	Period (s)	Damping (%)
1	1.64	0.122
2	0.64	0.330
3	0.56	0.233
4	0.35	0.140
5	0.29	0.188

Identificaciòn Modal

- Formas Modales:

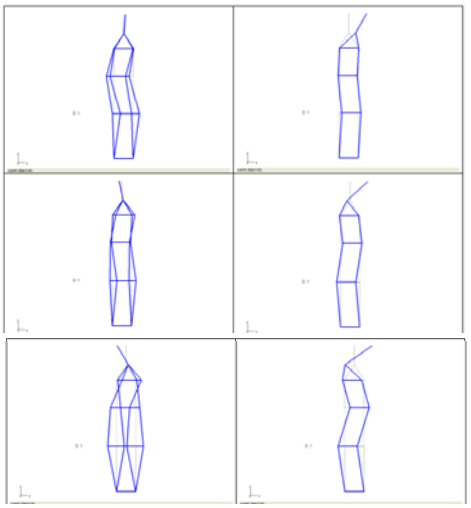
Componentes

Longitudinal | Lateral

Modo 1

Modo 2

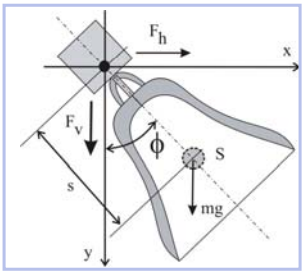
Modo 3



Fuerzas inducidas por la campana

Oscilaciones de gran amplitud

☞ Pèndulo no-linèal



$$\phi(t) = 2 \cdot arcsin[sn(\omega t + K(k))]$$

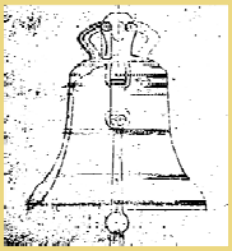
$$T = F(m, g, s, \phi(t))$$

☞ Fuerza Horizontal

$$F_H = -m \cdot s \cdot \omega^2 \left(4\left(k^2 - sin\left(\frac{\phi}{2}\right)\right) + cos(\phi) \right)$$

Paràmetros de la campana

Dibujos del siglo XIX



Representaciòn CAD

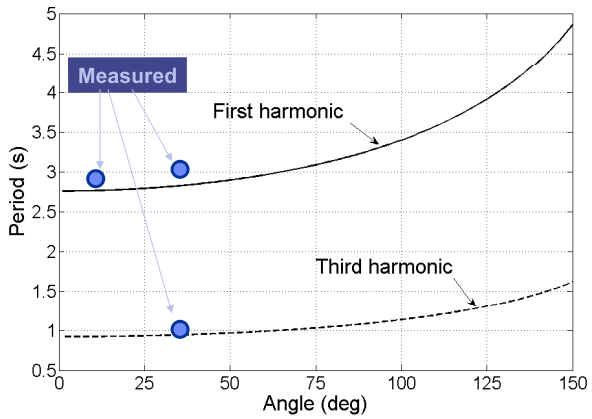
Paràmetros del modelo

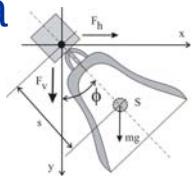
$s = 1{,}46\ m$

$I_0 = 32545\ m^2 kg$

$m = 11802\ kg$

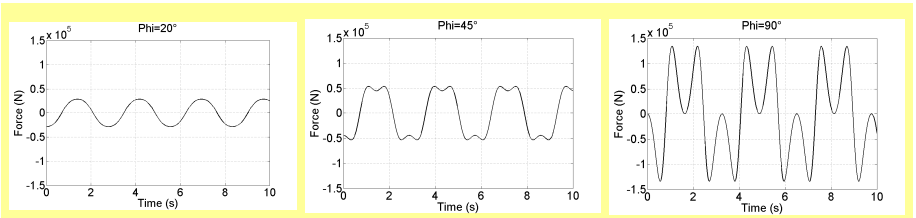
Evoluciòn del pèriodo de la campana



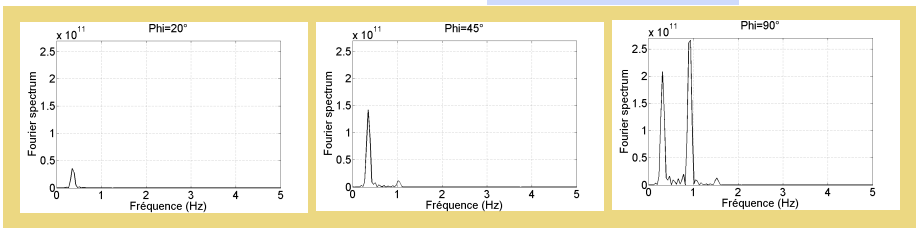


Fuerzas inducidas por la campana

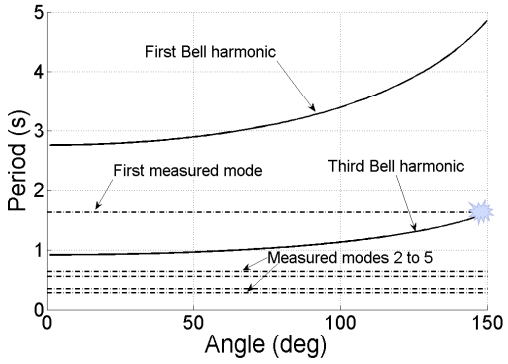
Fuerzas horizontales



Espectro de portencia



Oscilaciòn de la campana: Conclusiones preliminares

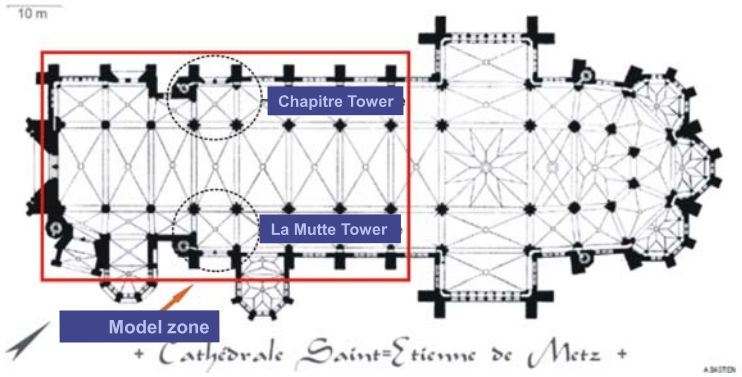


- Resonancia solamente es posible para grandes amplitudes de oscilaciòn (> 150 °)

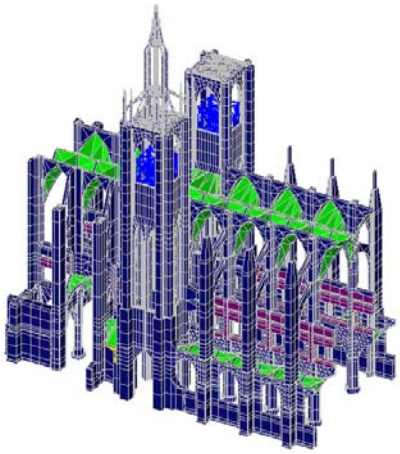
Modelo EF

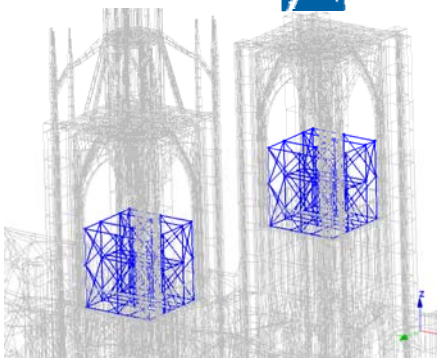
Objectivo :

- Estudio de respuesta para grandes amplitudes des oscilaciòn
- Estudio de interacciòn Nave/torre



Modelo EF





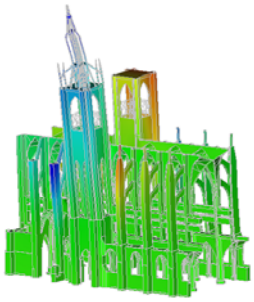
- 57585 nudos
- 61549 elementos volùmicos

Resultados: Modos de vibraciòn

Primeros perìodos y formas moaldes:

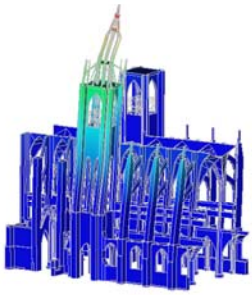
- Valores “medios” para paràmetros de modelo **(E=12.5 GPa rho=2100 Kg/m3)**

Modo 1 (Lateral)



T=0.64 s

Modo 2 (Longitudinal)



T=0.60 s

Modo 3 (Torsiòn)

T=0.56 s

Resultados: Modos de vibraciòn

Comparaciòn de resultados

Mode	Measured		FEM	
	Period (s)	Type	Period (s)	Type
1	1.64	Lateral/Longitudinal	0.64	Lateral
2	0.64	Lateral/Longitudinal	0.60	Longitudinal
3	0.56	Torsion	0.57	Torsion
4	0.35	Longitudinal/Lateral	0.49	Torsion
5	0.29	Longitudinal/Lateral	0.43	Torsion

Resultados: Modos de vibraciòn

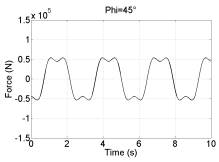
- Buena correlaciòn en formas modales
- Relativamente buena aproximaciòn para los perìodos (modos 2 a 5)
- Diferencia en el pèriodo de modo 1
- Perìodos EF poco sensibles en cambios en “E” y“m”
- Diferencias ? (Condiciones de frontera, homogeneizaciòn , tipo de EF.....)
  - Efectos de resonancia (bell/tower) solamente posibles para oscilaciònes importantes de campana
  - Para oscilaciones pequeñas movimiento **“forzado”** (por la campana) de la torre

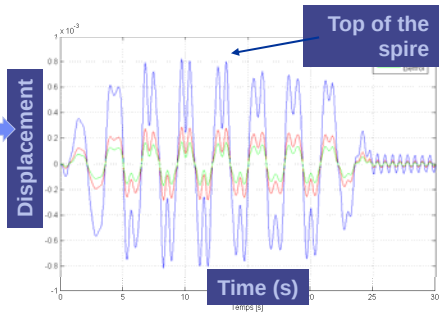
Resultados: respuesta temporal

Fuerza campana

Càlculo EF

Respuesta vibratoria

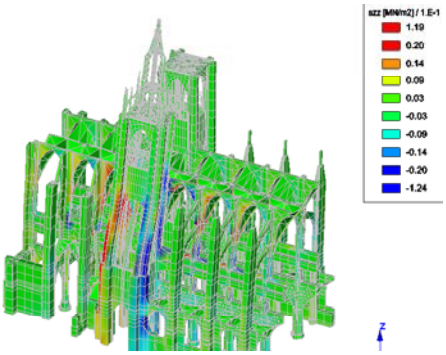


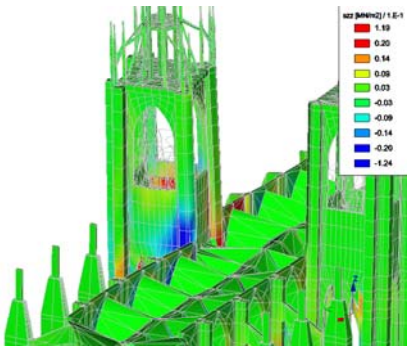


- Desplazamientos muy pequeños < 1 mm (punta de torre)
- Esfuerzos bajos

Resultados: respuesta temporal

Esfuerzos verticales:





- Nivels de esfuerzos bajos: 0.12 MPa (ϕ=90°)

Conclusiones

- Aplicaciòn de mètodos de evaluaciòn dinàmica a una estrutura compleja
- Identificaciòn de paràmetros modales
- “Buena” correspondencia entre valores medidos y calculados
- No existe riesgo de resonancia para amplitudes medias de oscilaciòn de la campana