

Introducción al Análisis Modal Operacional



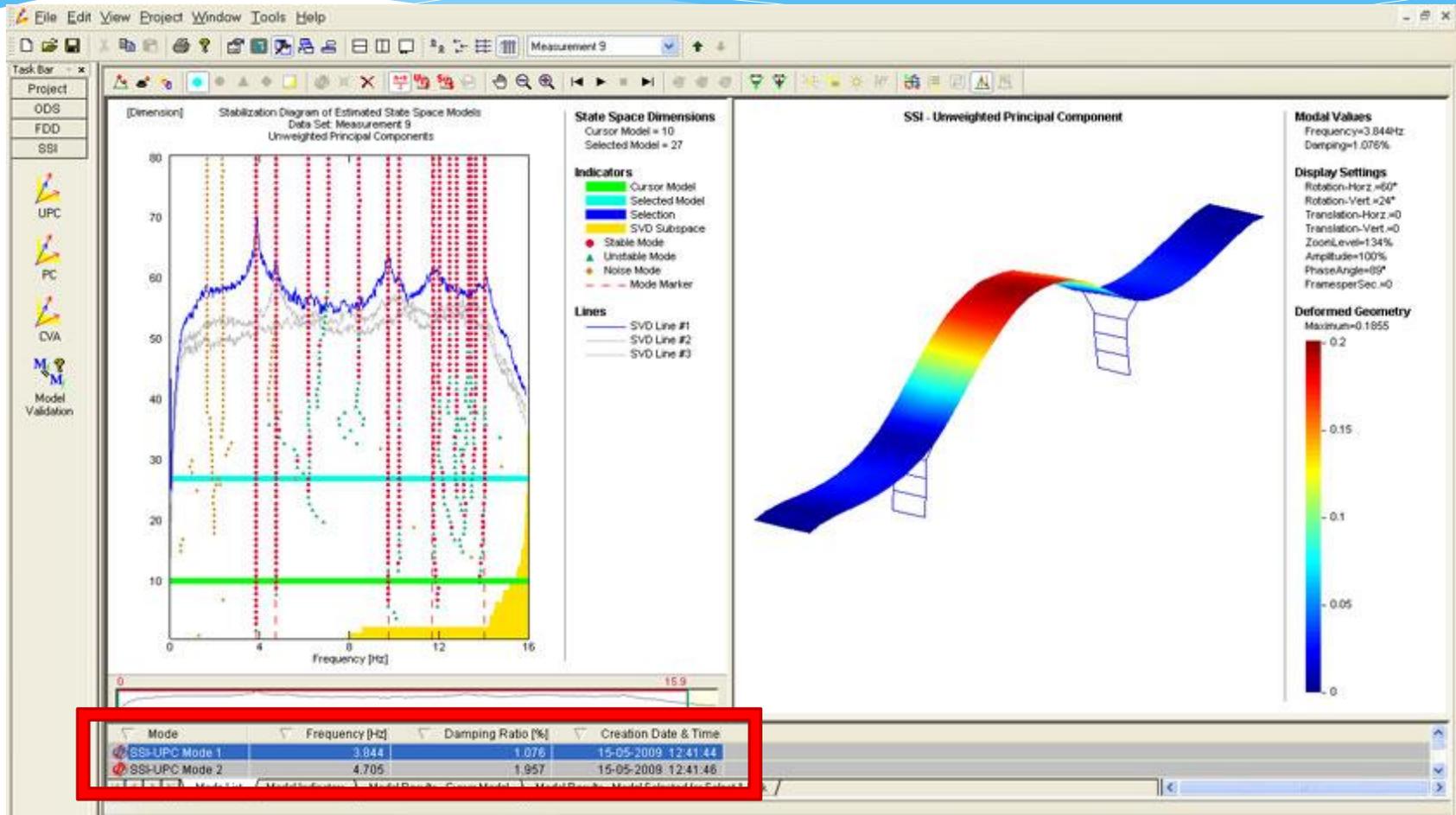
Jornada sobre Comportamiento Estructural y Monitorización de Estructuras
Viernes 20 Mayo 2016, Universidad de Málaga

Dr. Rafael Castro Triguero
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Contratado Dr. Universidad de Córdoba
Grupo Investigación Mecánica de Sólidos y Estructuras

INDICE

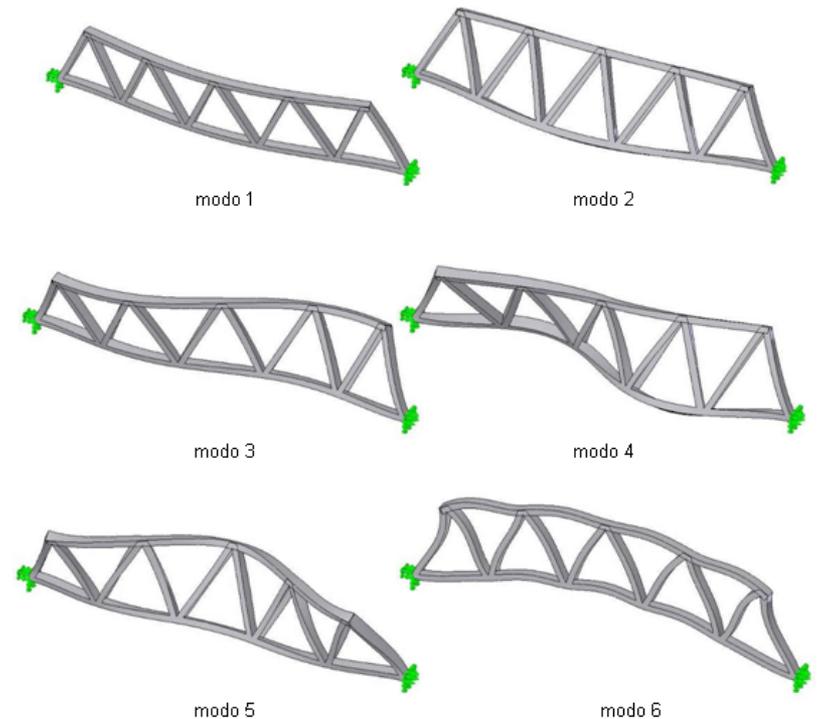
1. Definición Análisis Modal Operacional
2. Modelos Experimentales
3. Métodos de Identificación de Sistemas
4. Actualización de Modelos
5. Detección de Daño Estructural

ANÁLISIS MODAL



ANÁLISIS MODAL

- * Finalidad  Obtener:
 - * Frecuencias naturales.
 - * Formas modales.
 - * Factores de amortiguamiento.



ANÁLISIS MODAL

- * ¿Para qué sirve?  Conocer:
- * Comportamiento dinámico



ANÁLISIS MODAL

- * ¿Para qué sirve? → Conocer:
- * Comportamiento dinámico → Y evitar...



ANÁLISIS MODAL

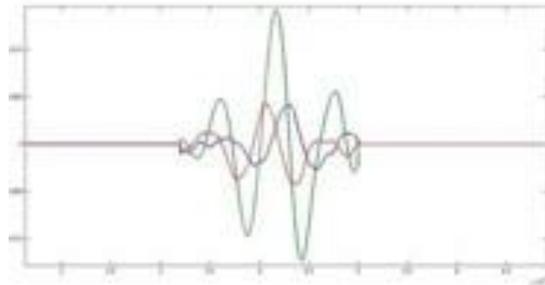
- * ¿Para qué sirve?  Conocer:
 - * Comportamiento dinámico  Detección de daño



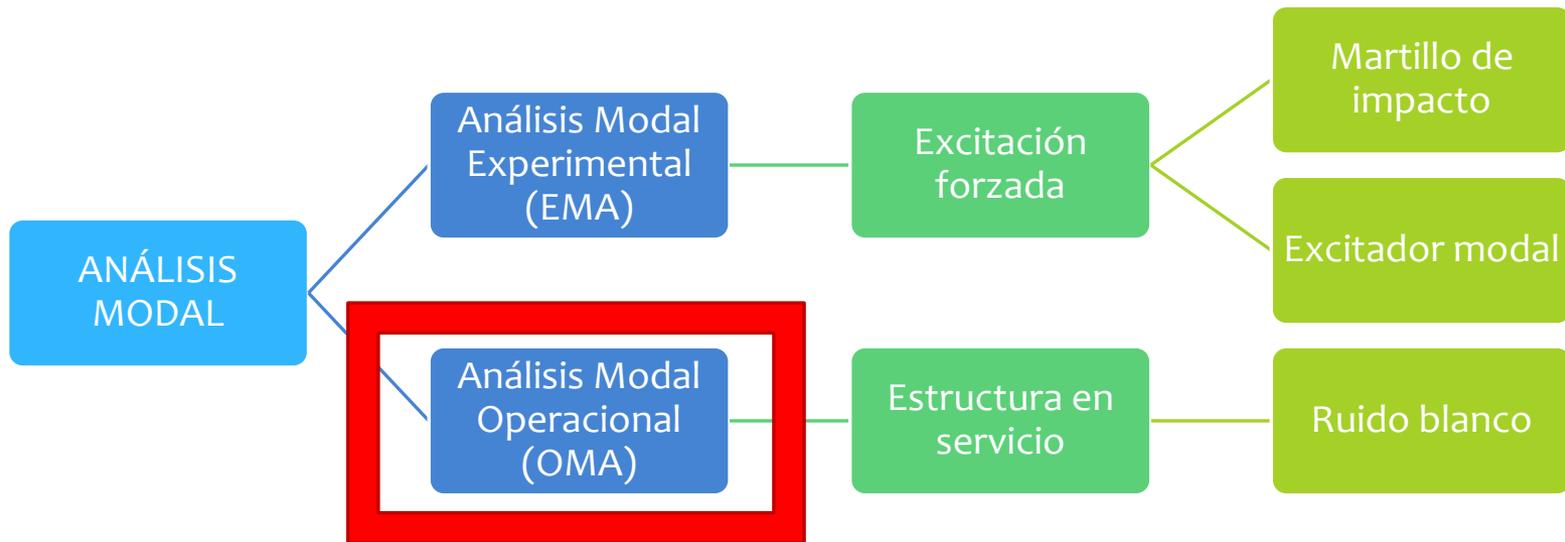
ANÁLISIS MODAL

* ¿Para qué sirve?  Conocer:

* Comportamiento dinámico  Monitorización preventiva



Diferencias entre Análisis Modal EXPERIMENTAL y OPERACIONAL



Estructura en servicio. Fuentes de excitación



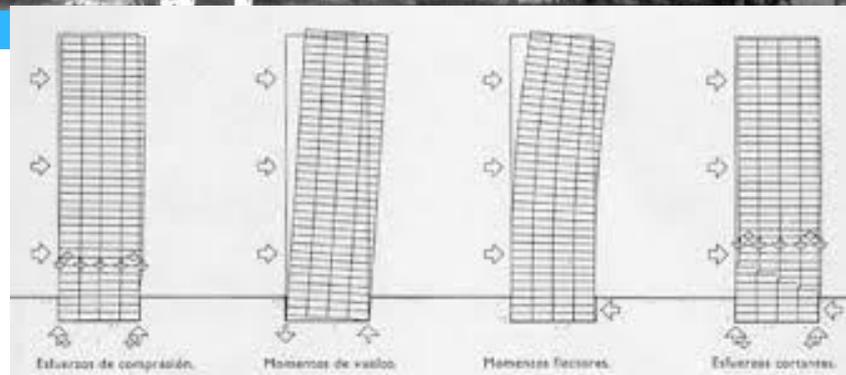
Estructura en servicio. Fuentes de excitación



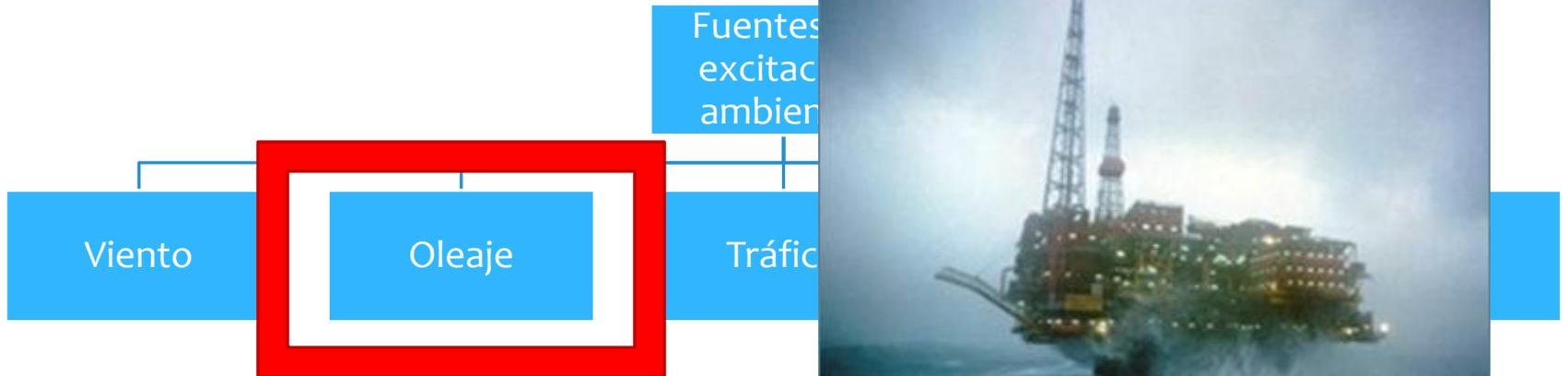
Viento

Ole

Etc.



Estructura en servicio. Fuentes de excitación



Estructura en servicio. Fuentes de excitación



Estructura en servicio. Fuentes de excitación



La propia
maquinaria

Etc.

EMPLEO

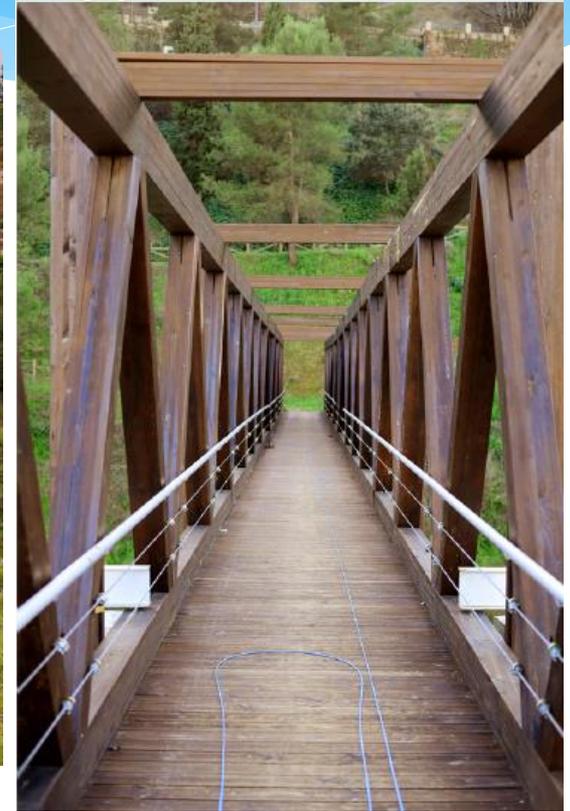
- * Estructuras no convenientes de excitar artificialmente:
 - * Tamaño.
 - * Forma.
 - * Localización.
- * Aparición de no linealidades por un nivel de respuesta elevado al aplicar excitación artificial.

Cubierta polideportiva, C.A.R. de Cartuja, Sevilla

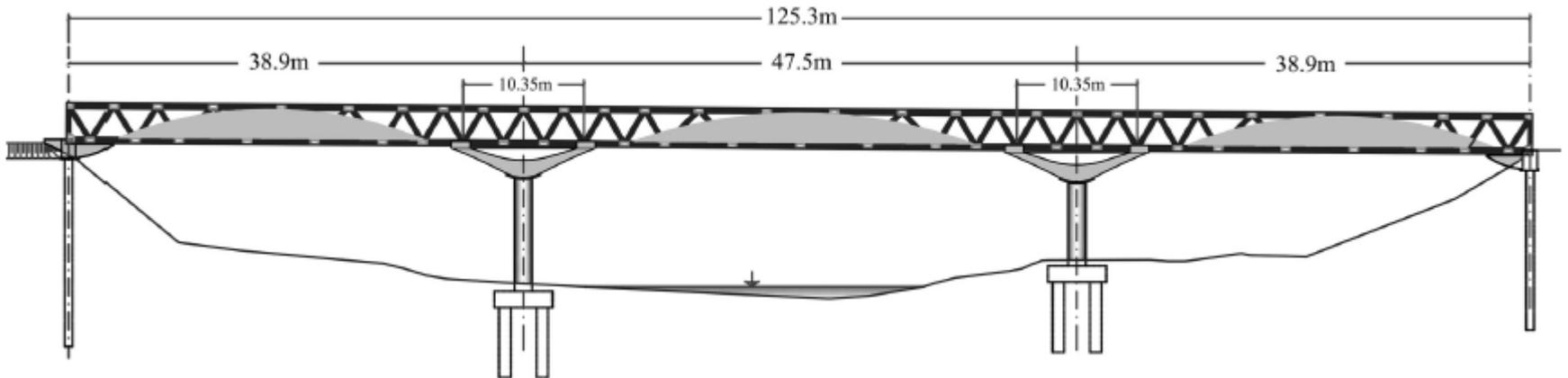
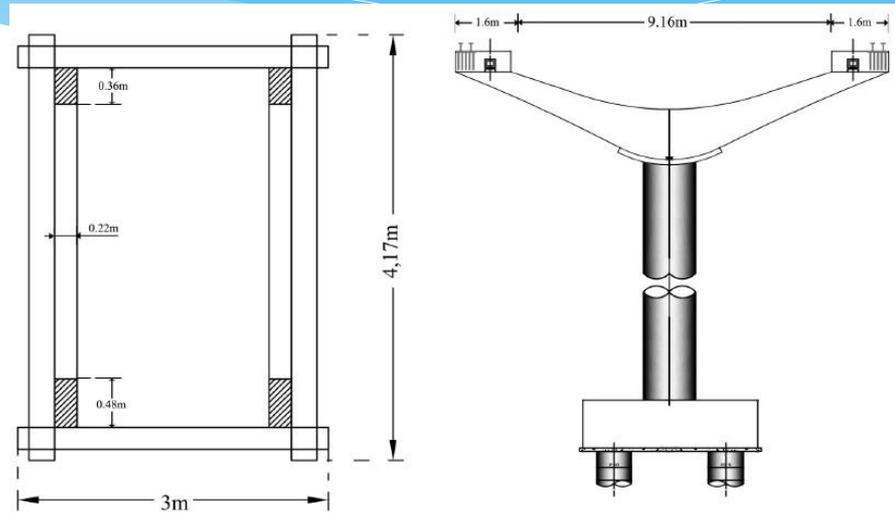
- * Estructura metálica.
- * Forma de paraboloides hiperbólicos.
- * Dimensiones 46x24x12 m.



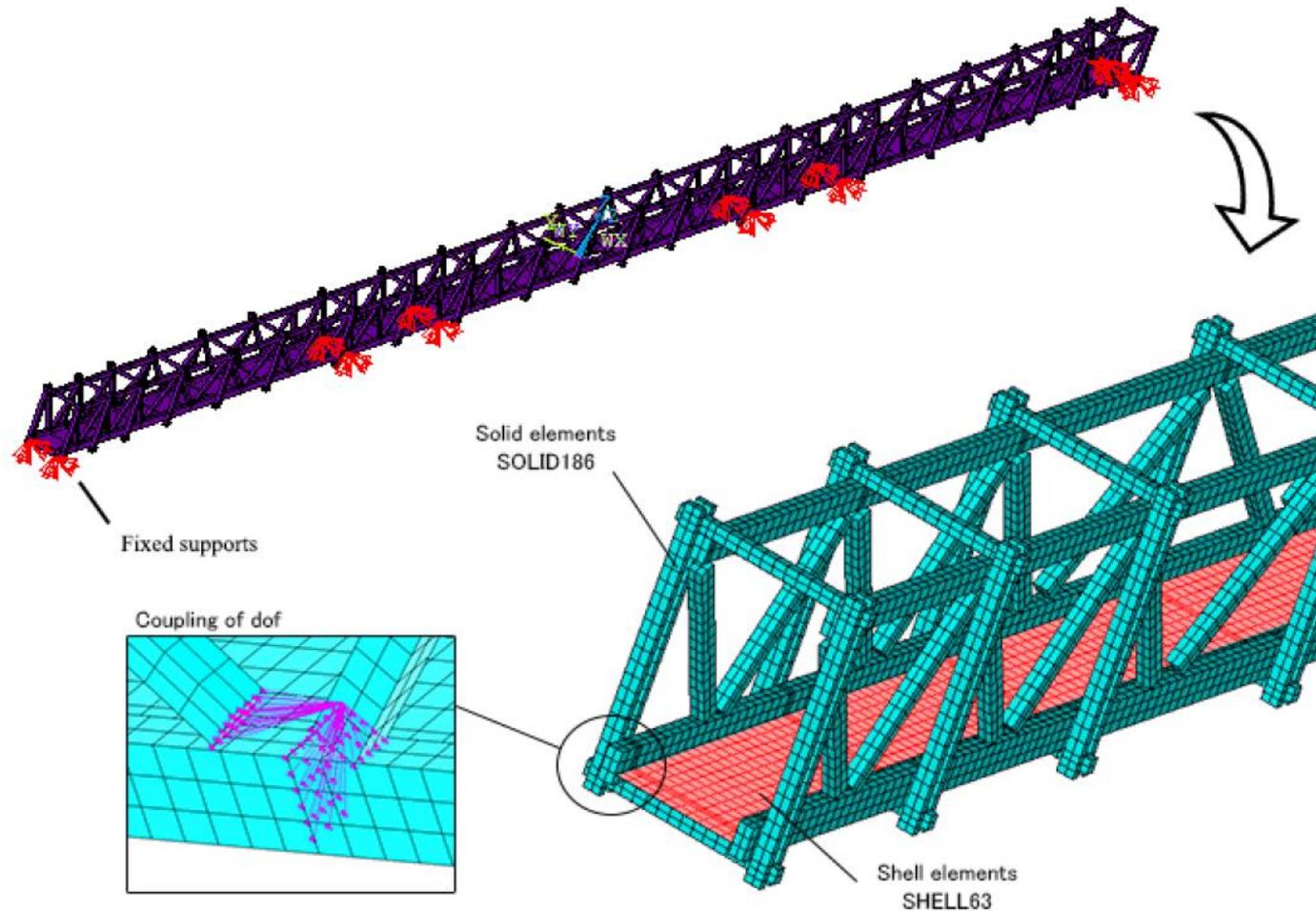
Pasarela peatonal, Montoro (Córdoba)



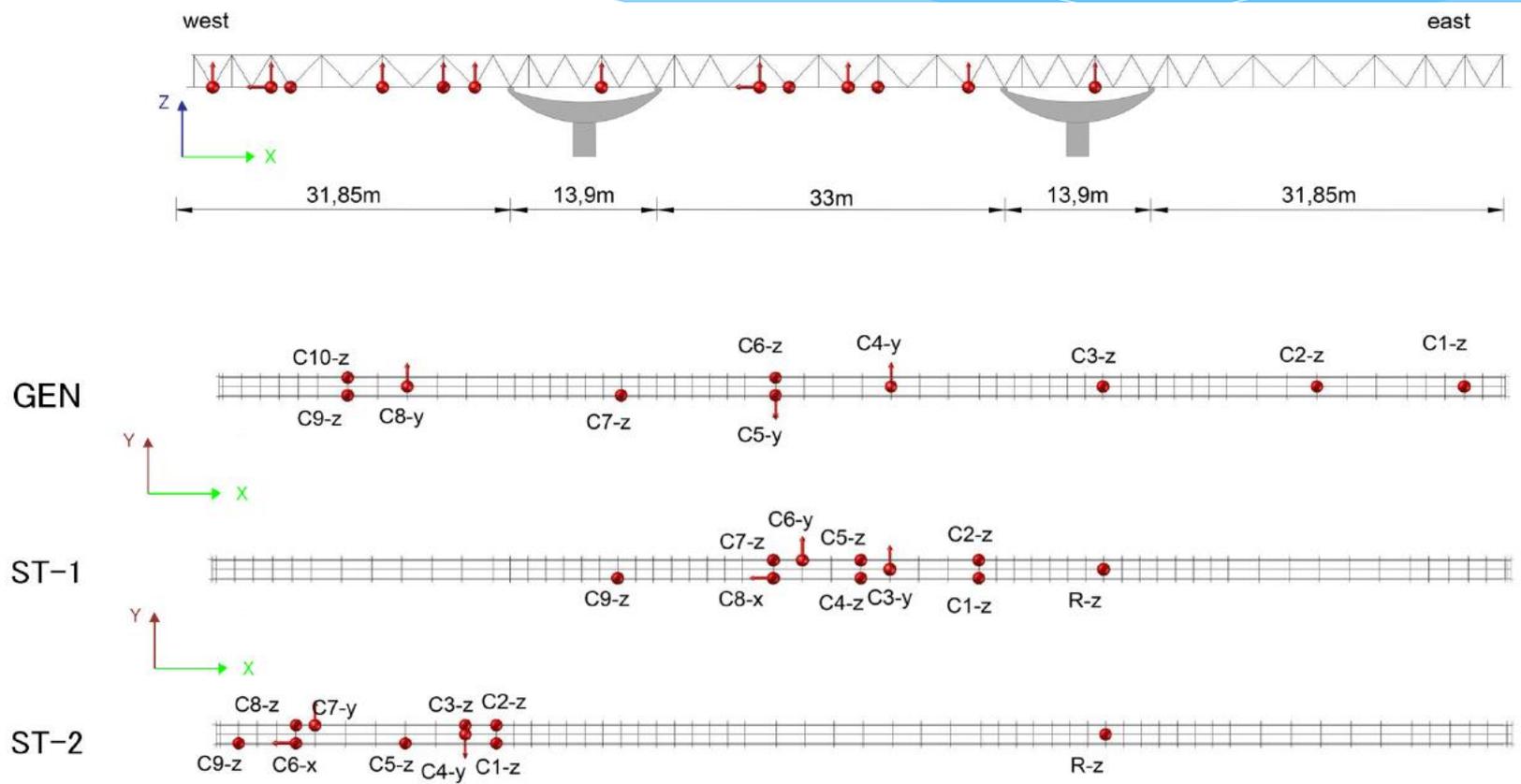
Pasarela peatonal, Montoro (Córdoba)



Pasarela peatonal, Montoro (Córdoba)



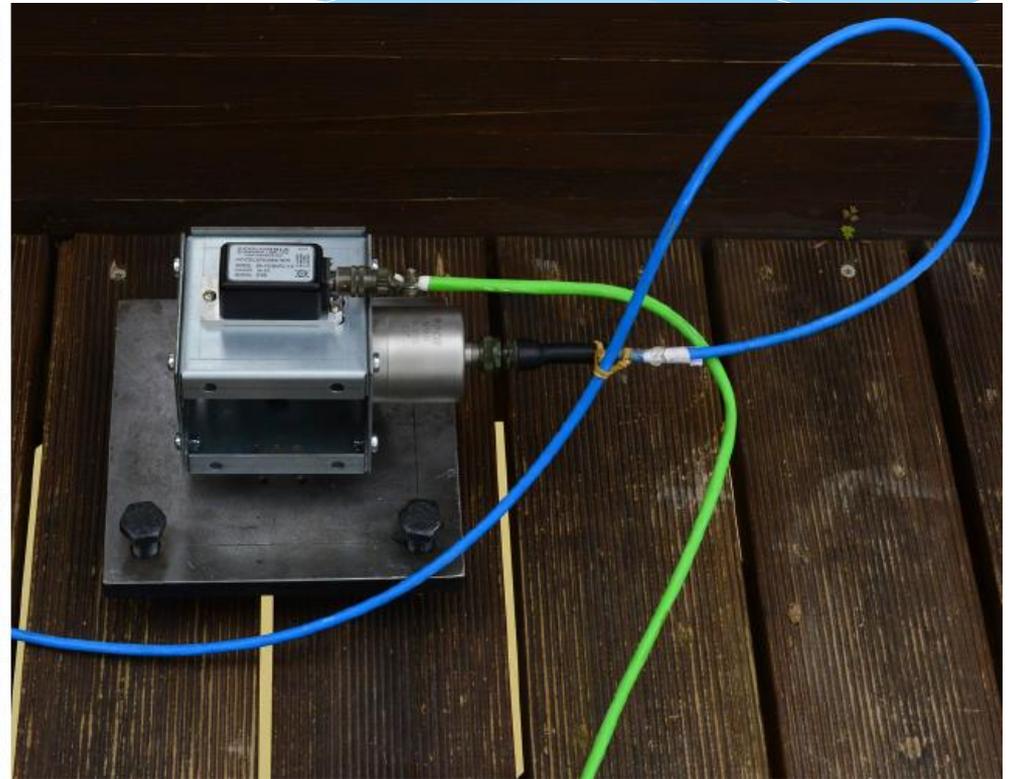
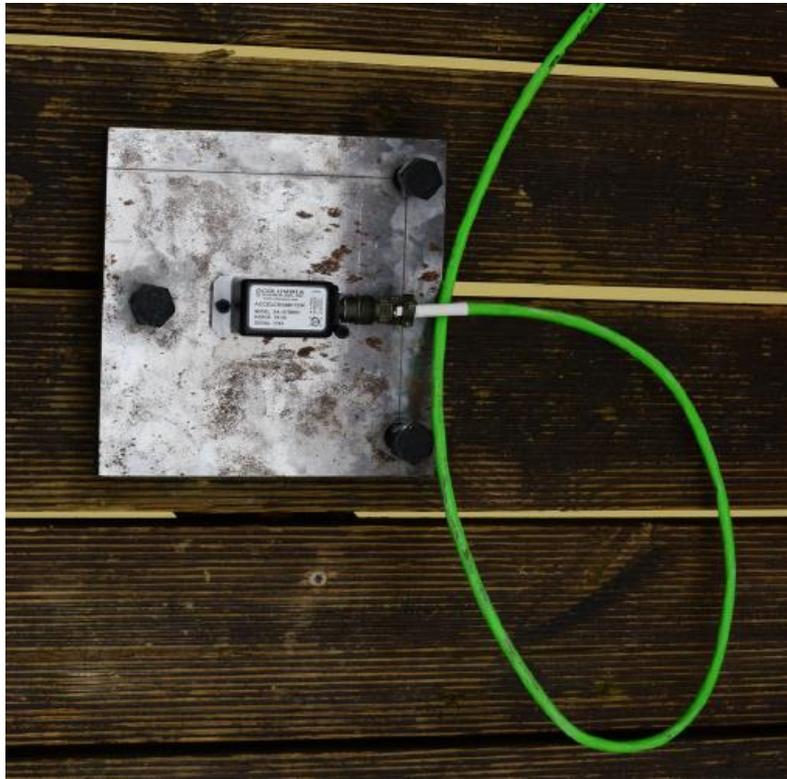
Pasarela peatonal, Montoro (Córdoba)



Pasarela peatonal, Montoro (Córdoba)

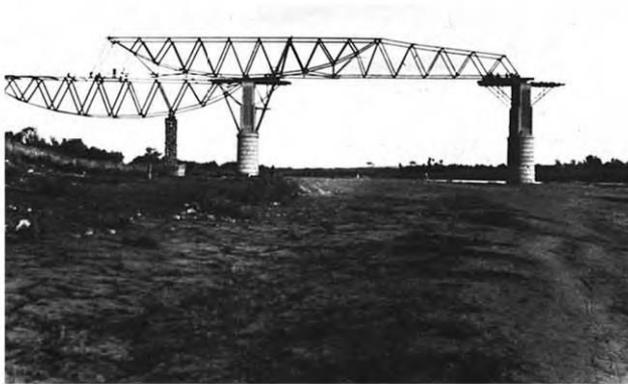


Pasarela peatonal, Montoro (Córdoba)

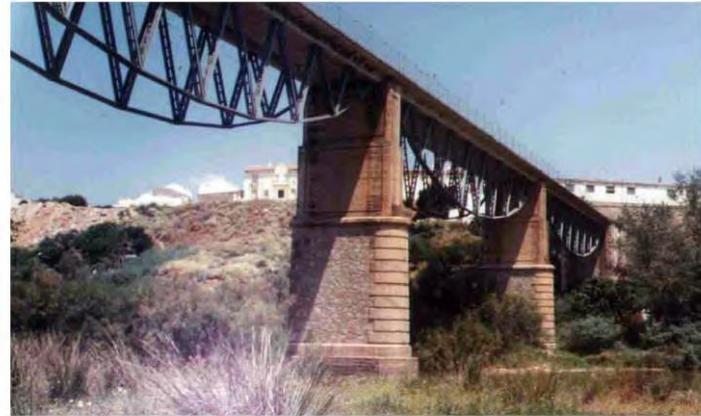


Puente Eduardo Torroja, Posadas (Córdoba)

(a)



(b)



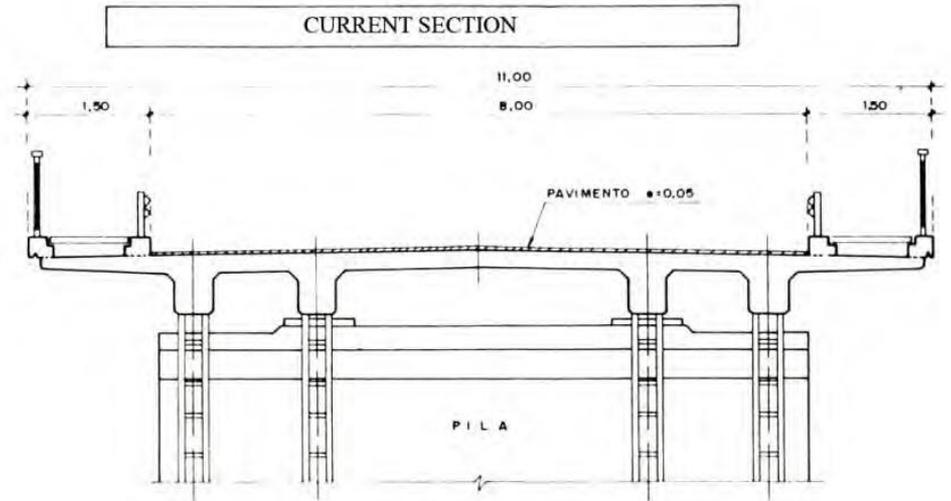
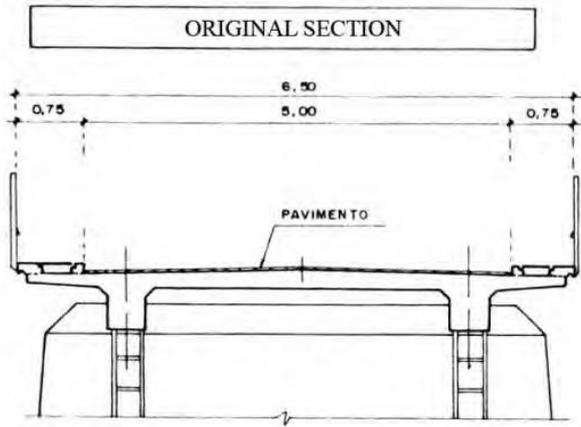
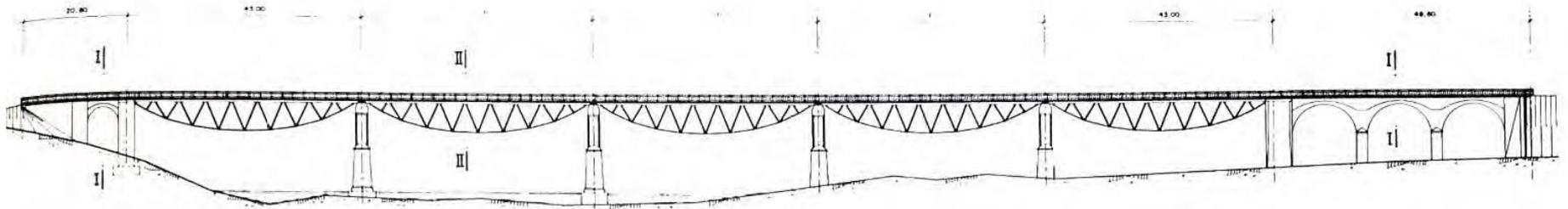
(c)



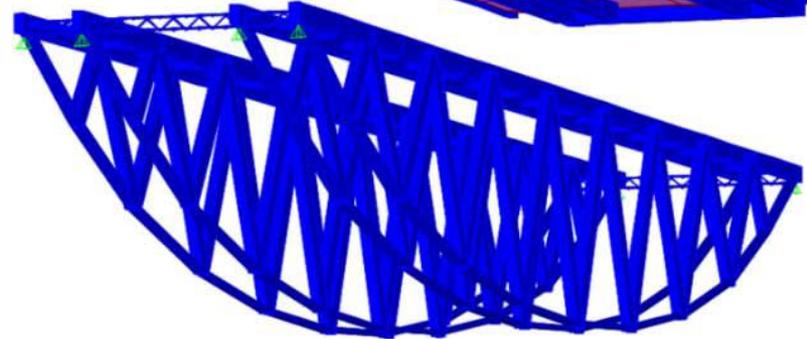
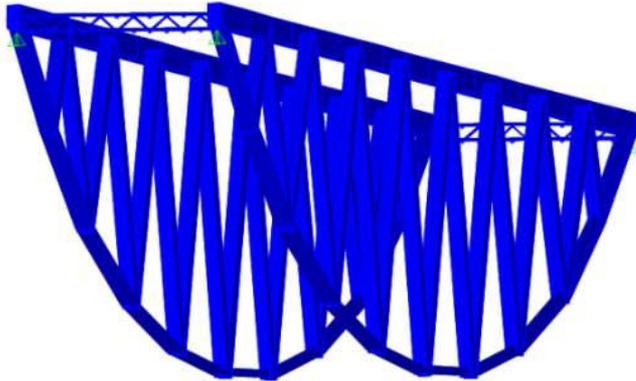
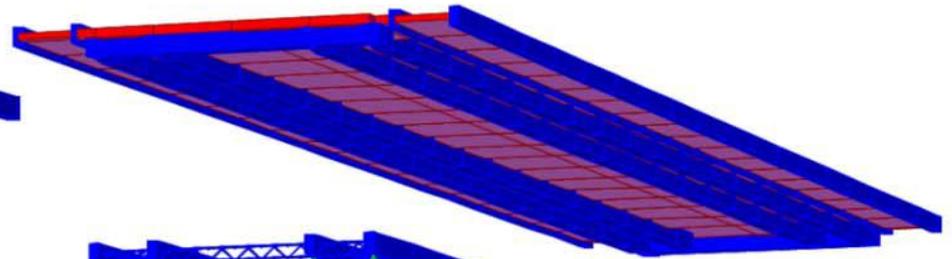
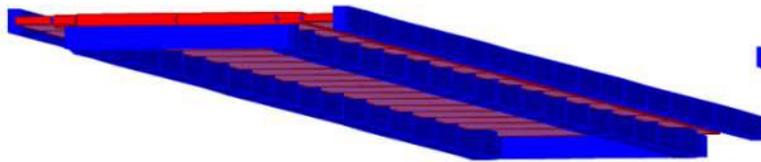
(d)



Puente Eduardo Torroja, Posadas (Córdoba)

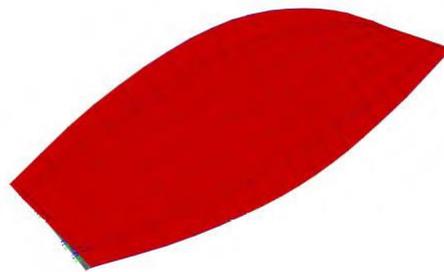


Puente Eduardo Torroja, Posadas (Córdoba)

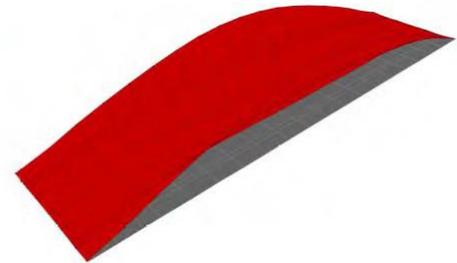


Puente Eduardo Torroja, Posadas (Córdoba)

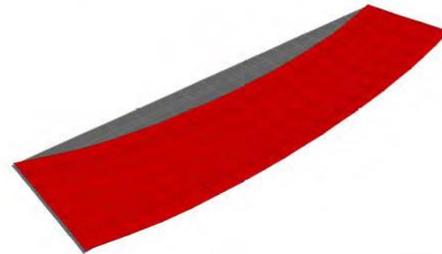
Modos obtenidos
mediante FEM



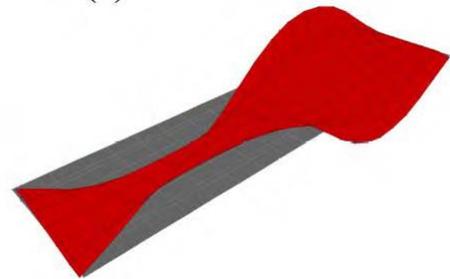
(a)



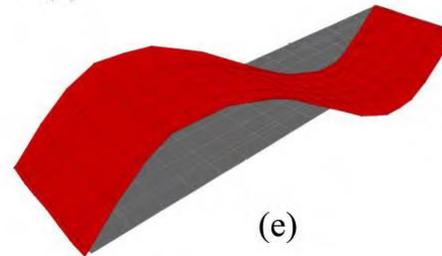
(b)



(c)



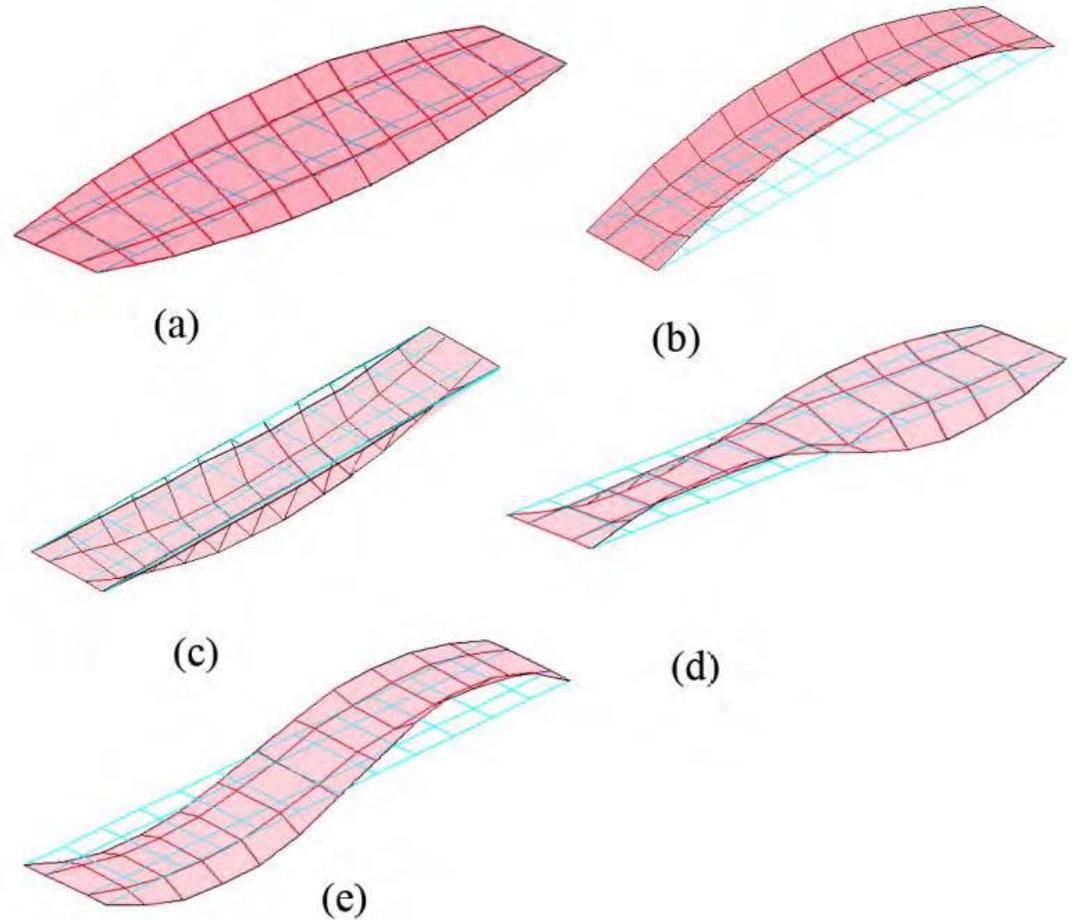
(d)



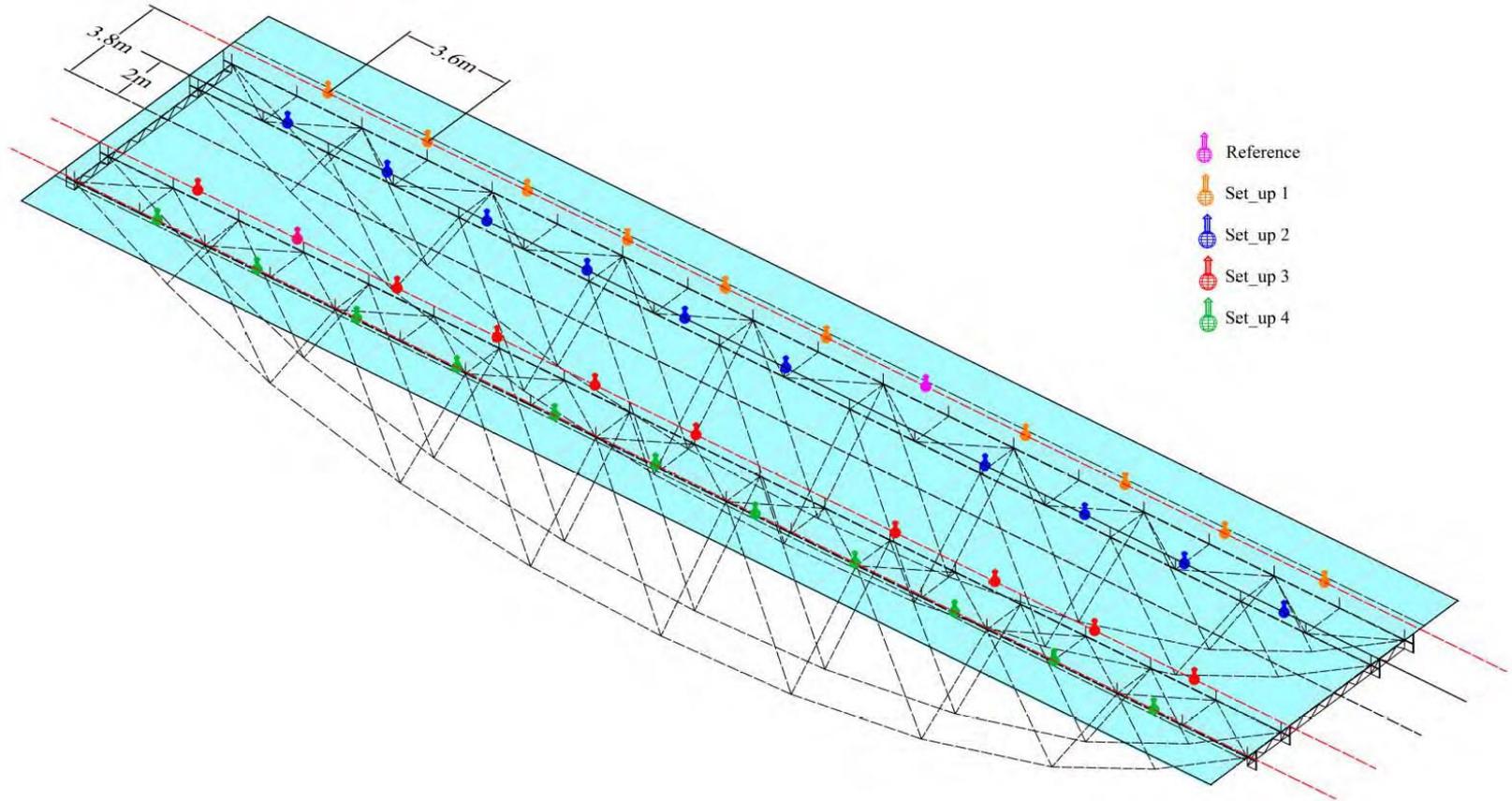
(e)

Puente Eduardo Torroja, Posadas (Córdoba)

Modos obtenidos
experimentalmente



Puente Eduardo Torroja, Posadas (Córdoba)



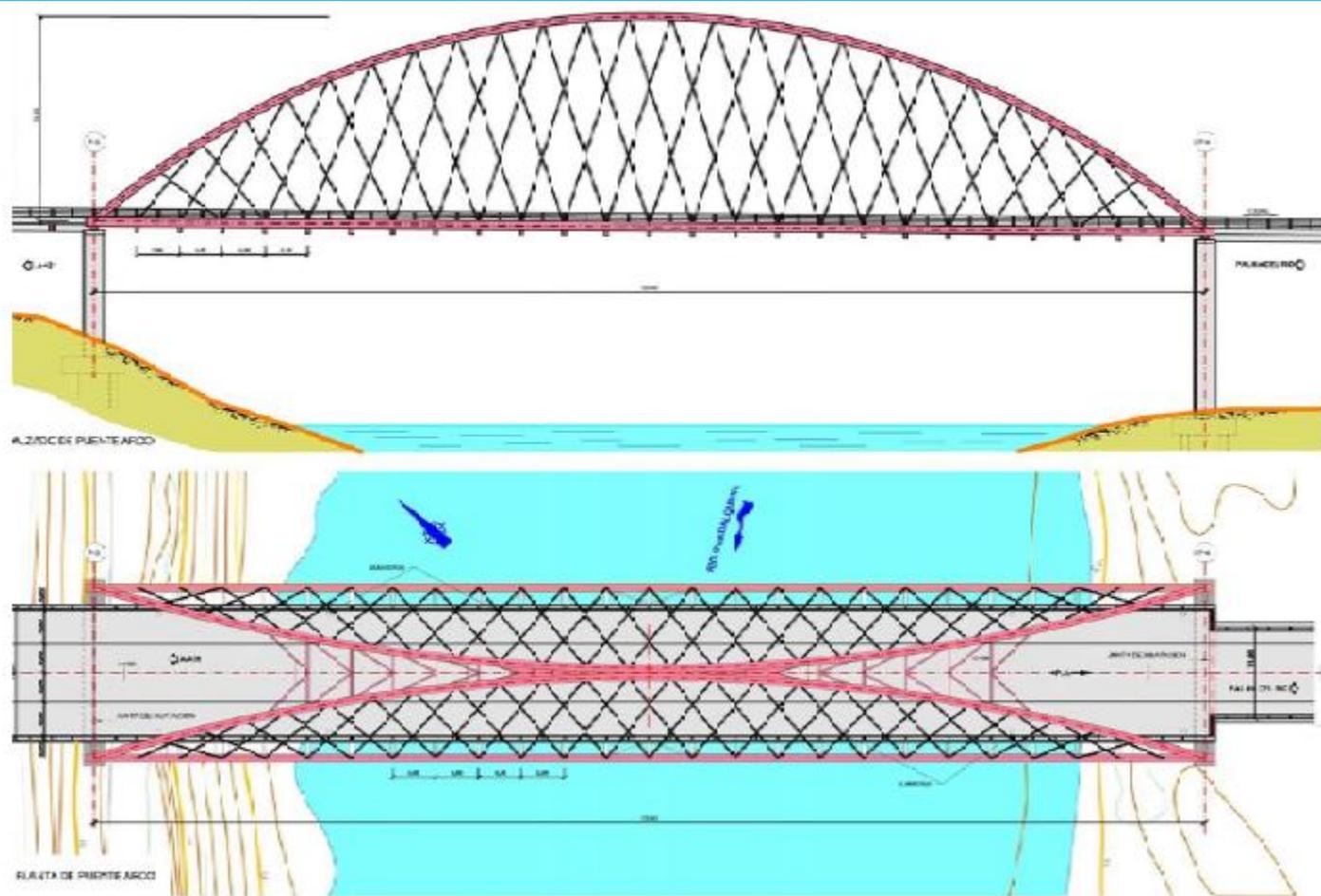
Puente Eduardo Torroja, Posadas (Córdoba)

-	FEM	Experimental
Mode number	frequencies (Hz)	(Hz)
a	3.440	3.273
b	4.110	3.677
c	4.353	3.876
d	5.883	5.753
e	8.951	7.700

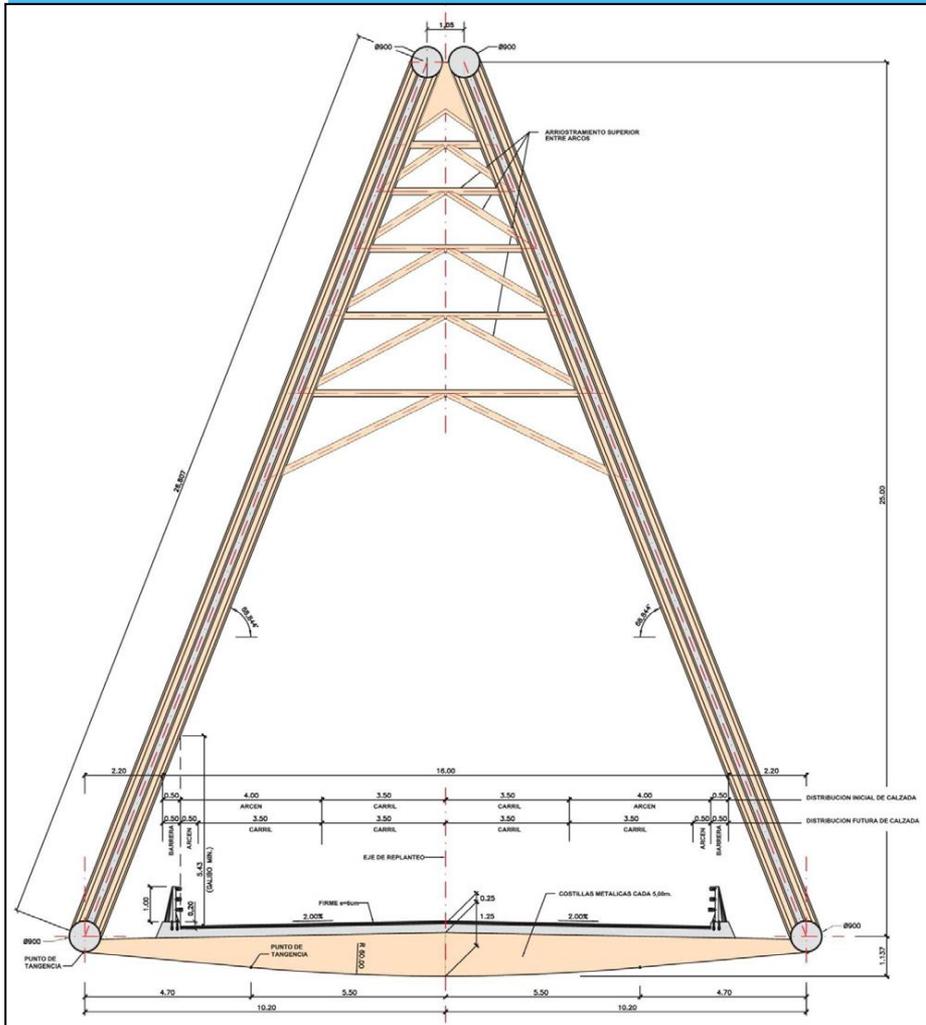
Puente sobre río Guadalquivir Palma del Río (Córdoba)



Puente sobre río Guadalquivir Palma del Río (Córdoba)

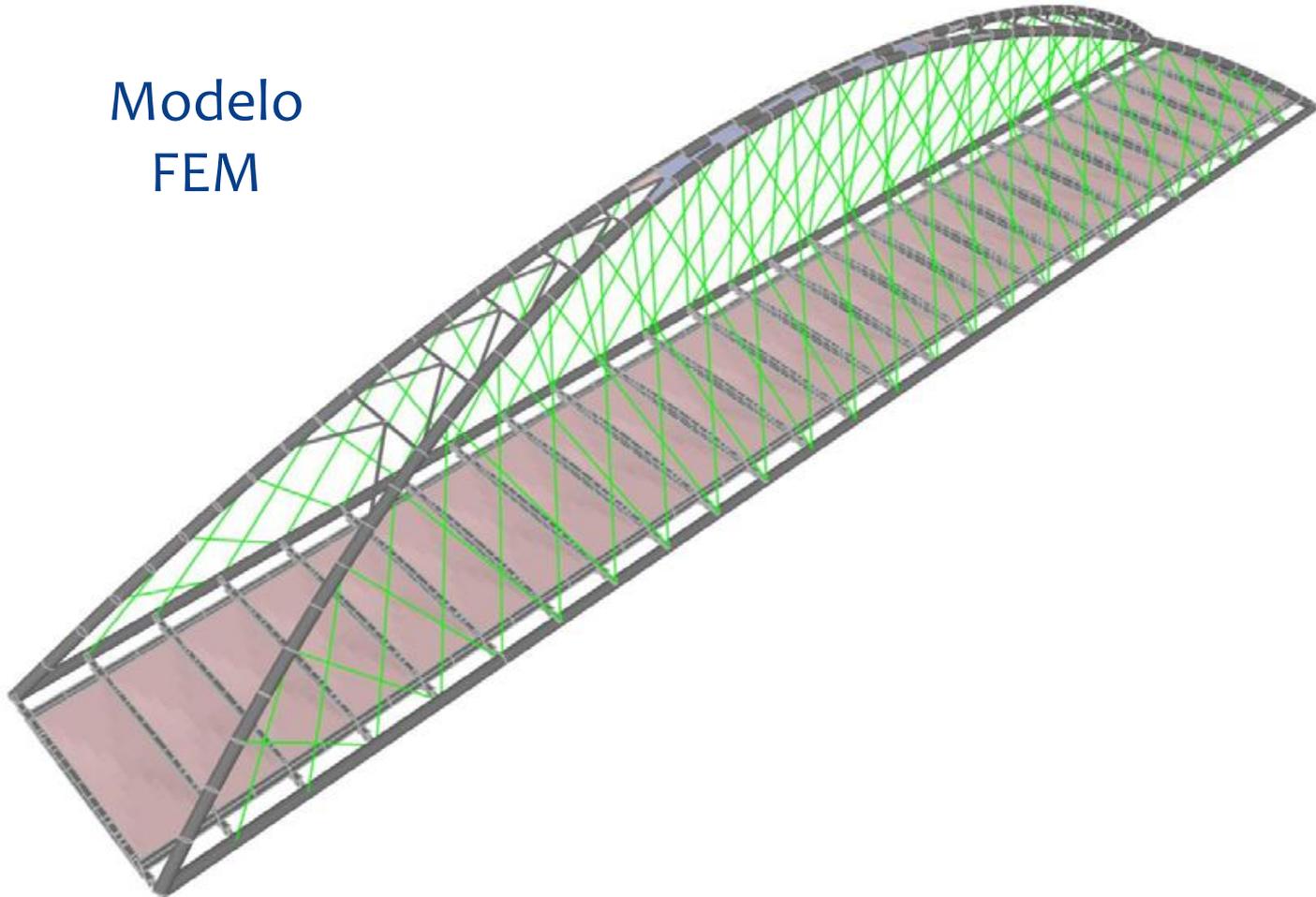


Puente sobre río Guadalquivir Palma del Río (Córdoba)

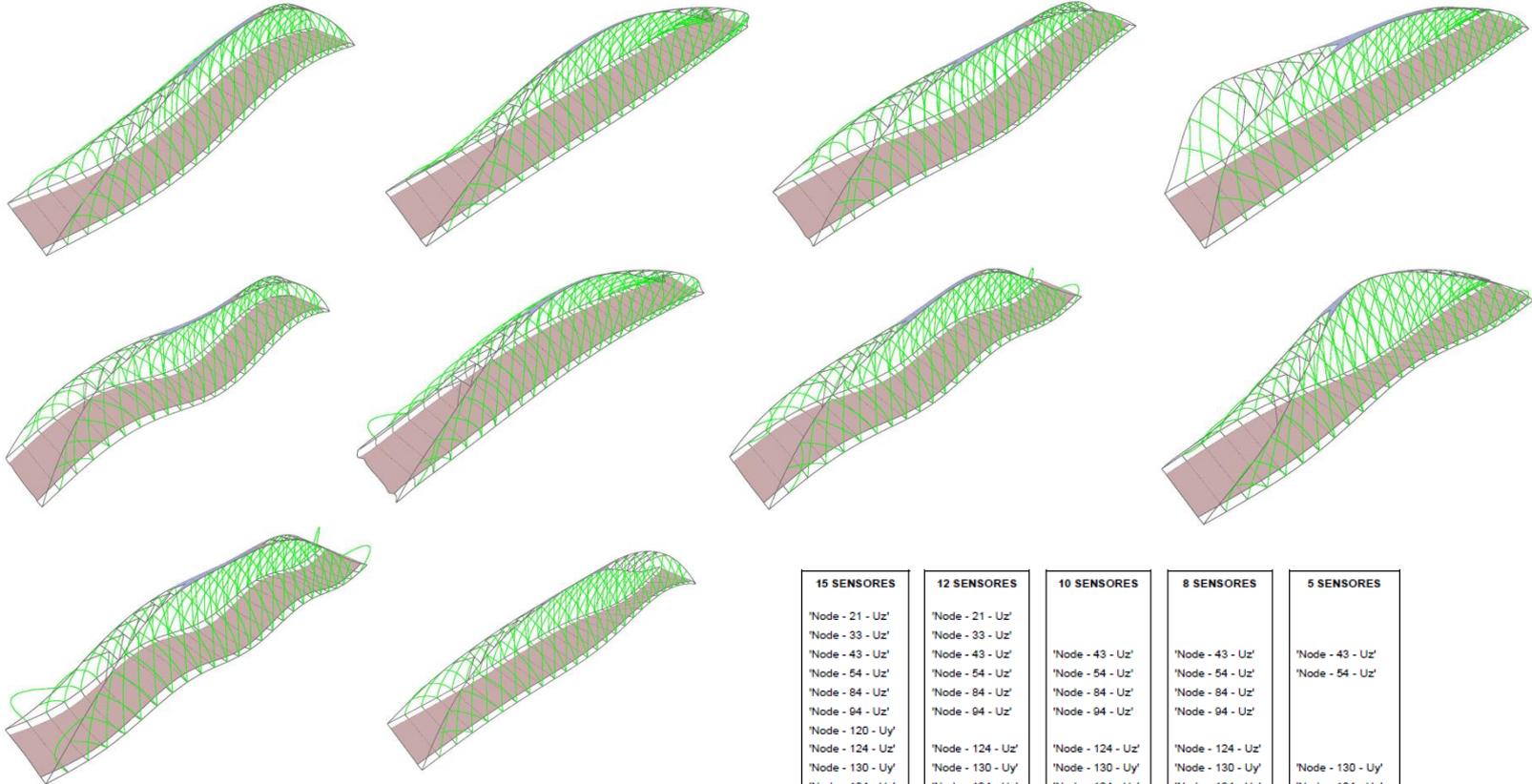


Puente sobre río Guadalquivir Palma del Río (Córdoba)

Modelo
FEM



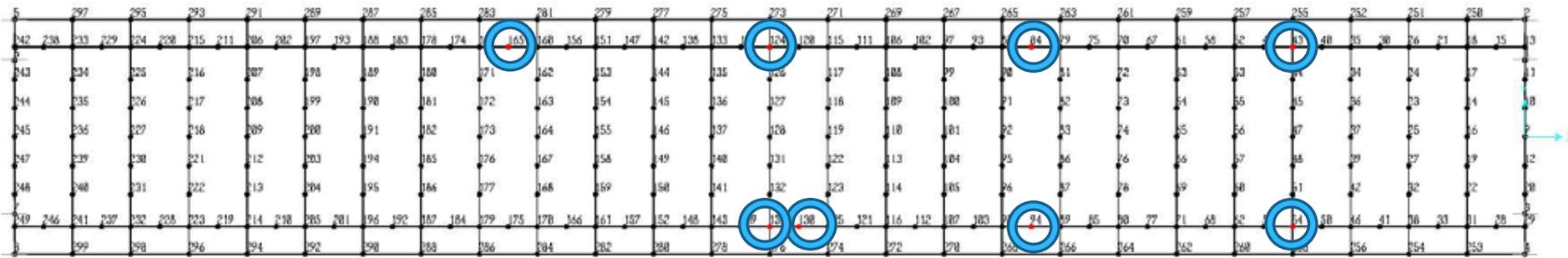
Puente sobre río Guadalquivir Palma del Río (Córdoba)



15 SENSORES	12 SENSORES	10 SENSORES	8 SENSORES	5 SENSORES
'Node - 21 - Uz'	'Node - 21 - Uz'			
'Node - 33 - Uz'	'Node - 33 - Uz'			
'Node - 43 - Uz'				
'Node - 54 - Uz'				
'Node - 84 - Uz'				
'Node - 04 - Uz'				
'Node - 120 - Uy'				
'Node - 124 - Uz'				
'Node - 130 - Uy'				
'Node - 134 - Uz'				
'Node - 165 - Uz'				
'Node - 169 - Uz'				
'Node - 175 - Uz'	'Node - 175 - Uz'	'Node - 175 - Uz'		
'Node - 200 - Uz'	'Node - 200 - Uz'	'Node - 200 - Uz'		
'Node - 212 - Uz'				

Puente sobre río Guadalquivir Palma del Río (Córdoba)

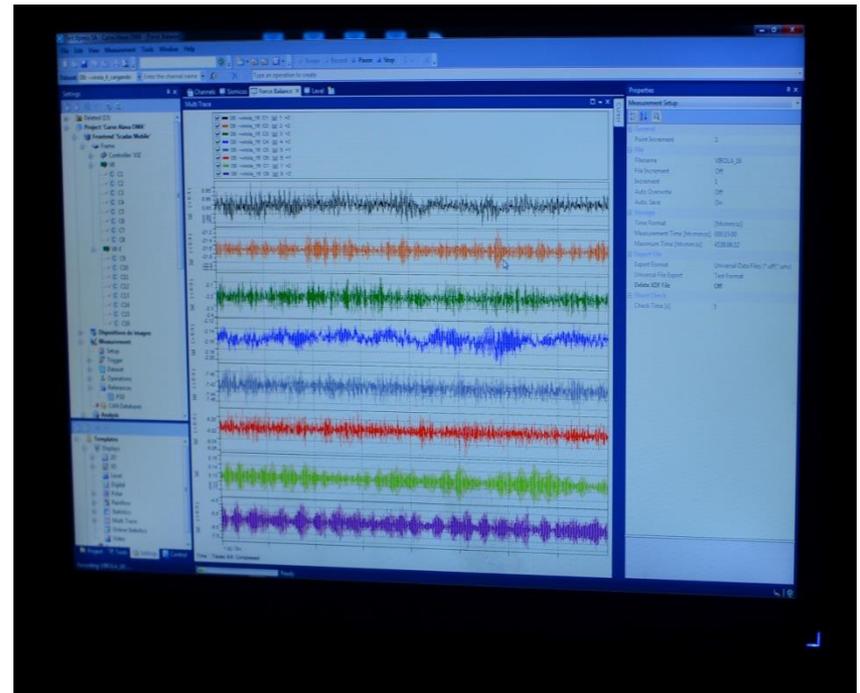
15 SENSORES	12 SENSORES	10 SENSORES	8 SENSORES	5 SENSORES
'Node - 21 - Uz'	'Node - 21 - Uz'			
'Node - 33 - Uz'	'Node - 33 - Uz'			
'Node - 43 - Uz'				
'Node - 54 - Uz'				
'Node - 84 - Uz'				
'Node - 94 - Uz'				
'Node - 120 - Uy'				
'Node - 124 - Uz'				
'Node - 130 - Uy'				
'Node - 134 - Uz'				
'Node - 165 - Uz'				
'Node - 189 - Uz'				
'Node - 175 - Uz'	'Node - 175 - Uz'	'Node - 175 - Uz'		
'Node - 209 - Uz'	'Node - 209 - Uz'	'Node - 209 - Uz'		
'Node - 212 - Uz'				



Silo (almacenaje de grano) Alhama de Murcia, Murcia



Silo (almacenaje de grano) Alhama de Murcia, Murcia



Puente del Jalón

Villanueva del Jalón, Zaragoza



Puente del Jalón

Villanueva del Jalón, Zaragoza



Ventajas OMA

- * Menor tiempo de preparación del ensayo.
- * Más barato (no son necesarios equipos excitadores).
- * No se interrumpe el funcionamiento normal de la estructura.
- * Respuesta representativa de las condiciones reales de utilización de la estructura.
- * No se aplican cargas artificiales, que pudieran afectar a la estructura.

Inconvenientes OMA

- * Respuestas pequeñas, normalmente mezcladas con ruido (Señal/Ruido).
- * Excitación desconocida, complica el análisis.
- * Necesidad de equipos muy sensibles.
- * Necesario un análisis de datos cuidadoso.
- * No cubre toda la banda de frecuencias.
- * Escalado de los modos de vibración (masa).

Modelos Experimentales



Jornada sobre Comportamiento Estructural y Monitorización de Estructuras
Viernes 20 Mayo 2016, Universidad de Málaga

Dr. Rafael Castro Triguero
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Contratado Dr. Universidad de Córdoba
Grupo Investigación Mecánica de Sólidos y Estructuras

Modelos experimentales

- * Los métodos de identificación de parámetros modales, están basados en modelos experimentales:
- * Modelos de los sistemas dinámicos ensayados:
 - se ajustan a los datos registrados.
 - se extraen estimaciones de parámetros modales.

Modelos experimentales

Modelo de Elementos Finitos (FEM)

* Ecuación que representa un sistema dinámico complejo:

$$M\ddot{q}(t) + C_1\dot{q}(t) + Kq(t) = p(t) = B_2u(t)$$

M \longrightarrow Matriz de masas

C \longrightarrow Matriz de amortiguamiento

K \longrightarrow Matriz de rigidez

$\ddot{q}(t)$ \longrightarrow Vector aceleración

$\dot{q}(t)$ \longrightarrow Vector velocidad

$q(t)$ \longrightarrow Vector desplazamiento

$p(t)$ \longrightarrow Vector fuerzas aplicadas

$u(t)$ \longrightarrow Vector de menor dimensión de las fuerzas aplicadas ($n_i < n_2$)

B_2 \longrightarrow Matriz compuesta por unos y ceros ($n_2 \times n_i$)

Modelos experimentales

Modelo de Espacio de Estados

- * MEF \longrightarrow sistema de ecuaciones diferenciales de segundo orden
 - \longleftarrow Puede transformarse en ED de primer orden
 - \longleftarrow Modelo de Espacio de Estado

$$\dot{x}(t) = A_C x(t) + B_C u(t)$$
$$y(t) = C_C x(t) + D_C u(t)$$

Modelo en tiempo continuo

A_C \longrightarrow Matriz de estado

B_C \longrightarrow Matriz de entrada

C_C \longrightarrow Matriz de salida

D_C \longrightarrow Matriz de transmisión directa

$x(t)$ \longrightarrow Vector de estado

$y(t)$ \longrightarrow Vector de salidas

$u(t)$ \longrightarrow Vector de entradas

Modelos experimentales

Modelo de Espacio de Estados

- * Obtención de parámetros modales



Matriz de estado A_C  $A_C = \Psi \Lambda_C \Psi^{-1}$

$$A_C = \begin{bmatrix} \Lambda & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \Lambda^* \end{bmatrix}, \quad \Psi = \begin{bmatrix} \Theta & \Theta^* \\ \Theta \Lambda & \Theta^* \Lambda^* \end{bmatrix}$$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \ddots & & & \\ & \lambda_k & & \\ & & \ddots & \\ & & & \ddots \end{bmatrix}, \quad \Theta = [\cdots \phi_k \cdots], \quad k = 1, \dots, n_2$$

- * Relación entre la frecuencia y la amortiguación modal:

$$\lambda_k = -\xi_k \omega_k + i \sqrt{1 - \xi_k^2} \omega_k$$

Modelos experimentales

Modelo de Espacio de Estados

* Componentes modales observables: $\Phi = C_C \Psi$

* Además: $n_m = n_2$
 $n_m = n/2$

* Señales analógicas \leftrightarrow Señales digitales \rightarrow Convertidor A/D

$$x_{k+1} = Ax_k + w_k$$

$$y_k = Cx_k + v_k$$

Modelo de Espacio de Estado
estocástico en tiempo discreto

$$x_k = x(k\Delta t)$$

Modelos experimentales

Modelo de Espacio de Estados

- * Los vectores w y v se asumen cero en los procesos de realización estocástica, con las siguientes matrices de correlación:

$$E\left(\begin{bmatrix} w_p \\ v_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_p^T & v_p^T \end{bmatrix}\right) = \begin{bmatrix} Q & S \\ S^T & R \end{bmatrix}$$

$$E\left(\begin{bmatrix} w_p \\ v_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_q^T & v_q^T \end{bmatrix}\right) = 0, \quad p \neq q$$

Modelos experimentales

Modelo de Espacio de Estados

- * Obtención de parámetros modales:

Autovectores de A = Autovectores de A_c

Relación entre autovalores A y autovalores A_c :

$$\mu_k = e^{\lambda_k \Delta t} \leftrightarrow \lambda_k = \frac{\ln(\mu_k)}{\Delta t}$$

Matriz $C = C_c$

Componentes modales observables:

$$\Phi = C_c \Psi$$

(igual tiempo continuo)

Modelos experimentales

Función de transferencia

- * Aplicando la transformada de Laplace a la ED 2° orden (MEF), y condiciones iniciales nulas:

$$Ms^2Q(s) + C_1sQ(s) + KQ(s) = P(s)$$



$$[Ms^2 + C_1s + K]Q(s) = P(s) \quad \leftrightarrow \quad Z(s)Q(s) = P(s)$$

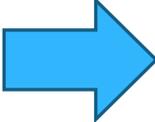
- * Relación las transformadas de Laplace de las entradas y salidas:

$$Q(s) = H(s)P(s)$$

$$H(s) = Z(s)^{-1} = [Ms^2 + C_1s + K]^{-1}$$

Modelos experimentales

Función de transferencia

* Cada elemento de $H(s)$  Función valores complejos

 Puede representarse por dos superficies definidas en plano s o Laplace

- * Partes real e imaginaria
- * Valor absoluto y ángulo de fase

* Polos:

$$\lambda_k = -\xi_k \omega_k + i \sqrt{1 - \xi_k^2} \omega_k$$

Modelos experimentales

Modelo modal

- * La $H(s)$ puede definirse como suma de las contribuciones de los modos del sistema dinámico:

$$H(s) = V(sI - A)^{-1}L^T = \sum_{k=1}^{n_2} \frac{\phi_k \gamma_k^T}{s - \lambda_k} + \frac{\phi_k^* \gamma_k^H}{s - \lambda_k^*}$$

con

$$V = \begin{bmatrix} \phi_1 & \dots & \phi_{n_2} & \phi_1^* & \dots & \phi_{n_2}^* \end{bmatrix}$$
$$L = \begin{bmatrix} \gamma_1 & \dots & \gamma_{n_2} & \gamma_1^* & \dots & \gamma_{n_2}^* \end{bmatrix}$$
$$A = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & & & & \\ & \ddots & & & & & \\ & & \lambda_{n_2} & & & & \\ & & & \lambda_1^* & & & \\ & & & & \ddots & & \\ 0 & & & & & & \lambda_{n_2}^* \end{bmatrix}$$

ϕ_k  Vector columna que contiene las n_2 componentes del modo k

Modelos experimentales

Espectro y espectro medio de salida

- * Proceso estocástico que representa entradas desconocidas, puede ser:
 - * Matriz de correlación.
 - * Matriz con espectro de entrada (transformada de Laplace de las correlaciones de entrada).
- * Relación entre matriz espectro de salida y matriz espectro de entrada:

$$S_{yy}(\omega) = H(\omega)S_{uu}(\omega)H^H(\omega)$$

- * Si entrada = ruido blanco (S_{yy} sólo depende de $H(\omega)$ y una matriz cte. (ruido blanco matriz de entrada)):

$$S_{yy}(\omega) = H(\omega)R_{uu}H^H(\omega)$$

Modelos experimentales

Espectro y espectro medio de salida

- * Teniendo en cuenta la descomposición modal de $H(\omega)$, el espectro de salida quedaría:

$$S_{yy}(\omega) = \sum_{k=1}^{n_2} \frac{\phi_k \mathbf{g}_k^T}{i\omega - \lambda_k} + \frac{\phi_k^* \mathbf{g}_k^H}{i\omega - \lambda_k^*} + \frac{\mathbf{g}_k \phi_k^T}{-i\omega - \lambda_k} + \frac{\mathbf{g}_k^* \phi_k^H}{-i\omega - \lambda_k^*}$$

- * Se obtienen 4 polos con la descomposición modal ($\lambda_k, -\lambda_k, \lambda_k^*$ y $-\lambda_k^*$):

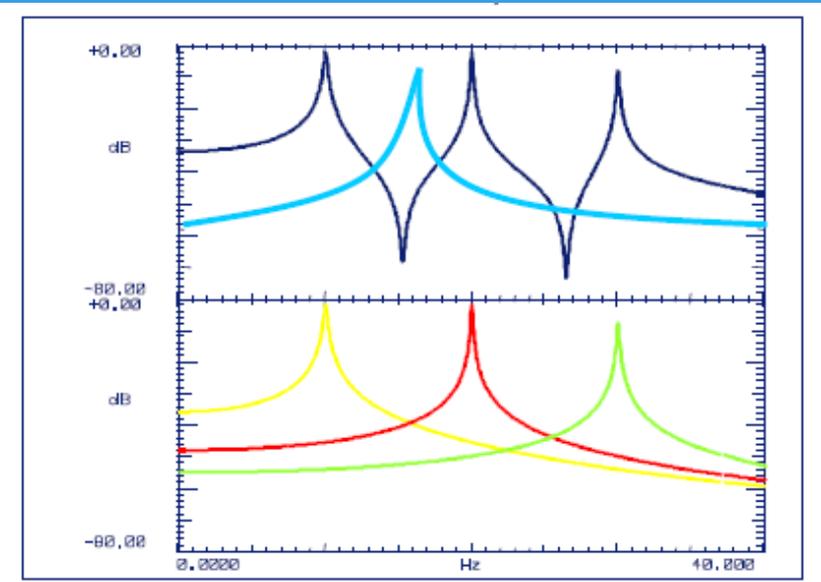
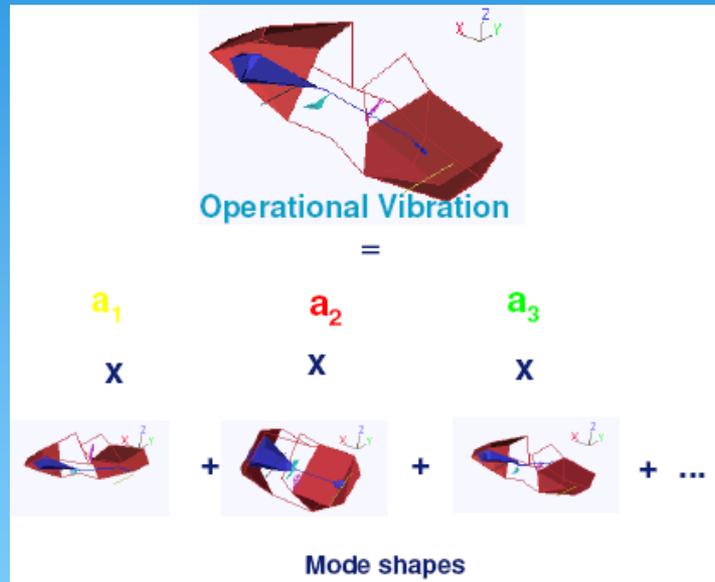


Obliga a utilizar modelos 2 veces el orden del modelo de $H(\omega)$

Se evita usando el espectro medio:

$$S_{yy}^+(\omega) = \sum_{k=1}^{n_2} \frac{\phi_k \mathbf{g}_k^T}{i\omega - \lambda_k} + \frac{\phi_k^* \mathbf{g}_k^H}{i\omega - \lambda_k^*}$$

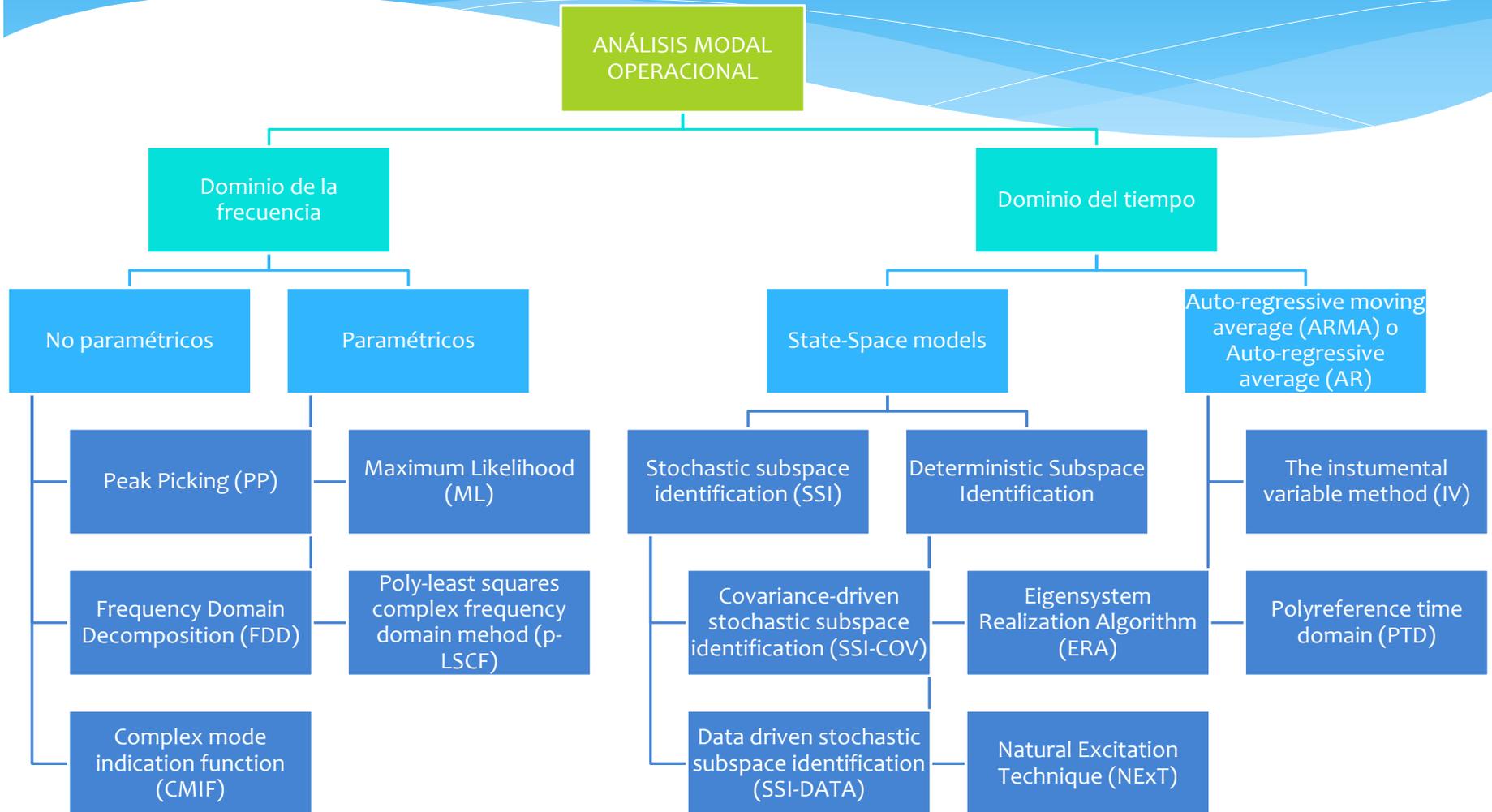
Métodos de Identificación de Sistemas



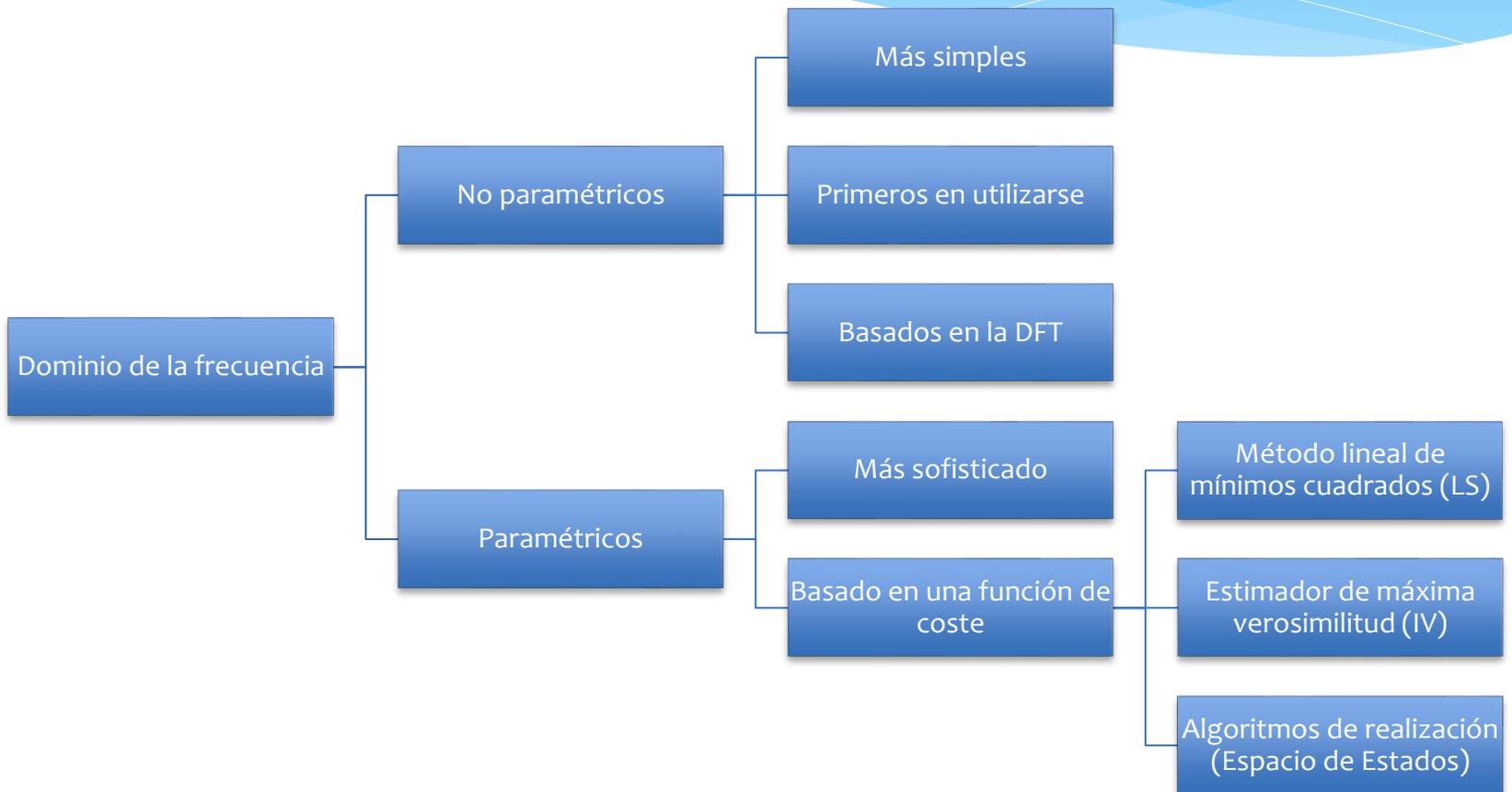
Jornada sobre Comportamiento Estructural y Monitorización de Estructuras
Viernes 20 Mayo 2016, Universidad de Málaga

Dr. Rafael Castro Triguero
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Contratado Dr. Universidad de Córdoba
Grupo Investigación Mecánica de Sólidos y Estructuras

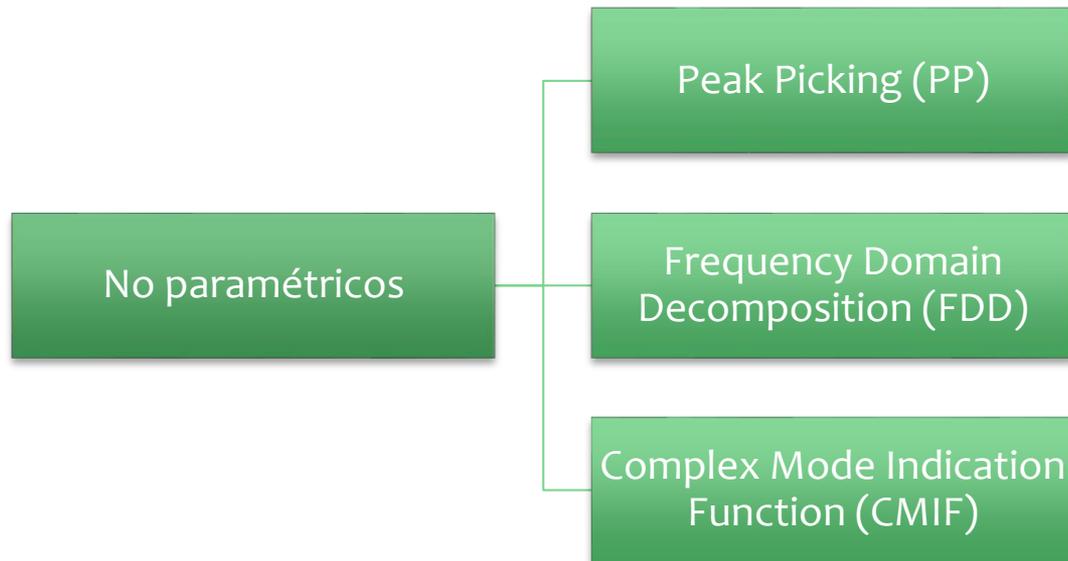
Clasificación métodos de identificación mediante OMA



Métodos en el dominio de la frecuencia



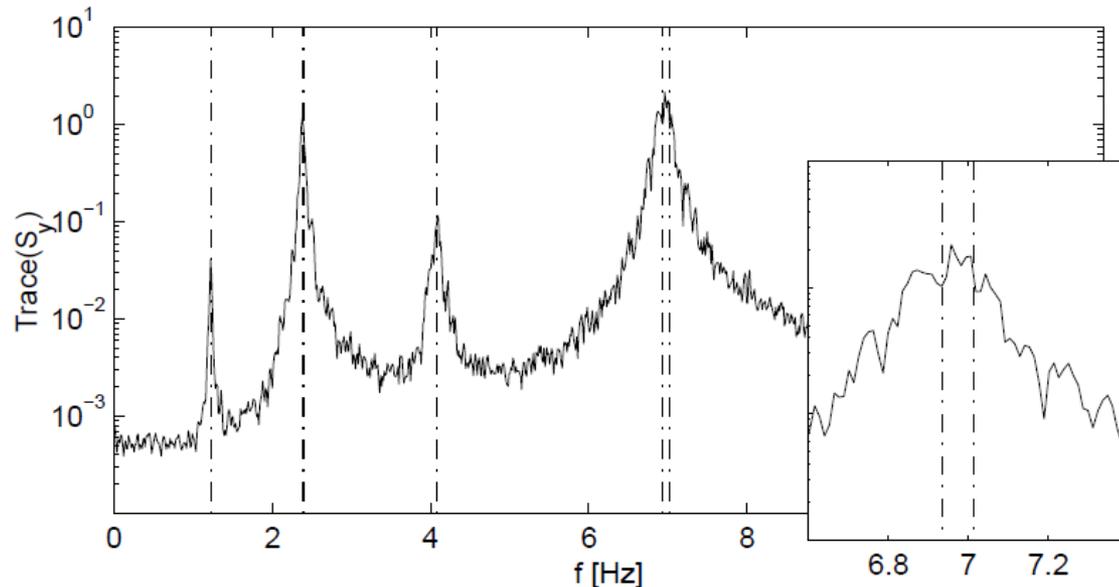
Métodos en el dominio de la frecuencia



Dominio de la frecuencia – No paramétricos

Peak Picking (PP)

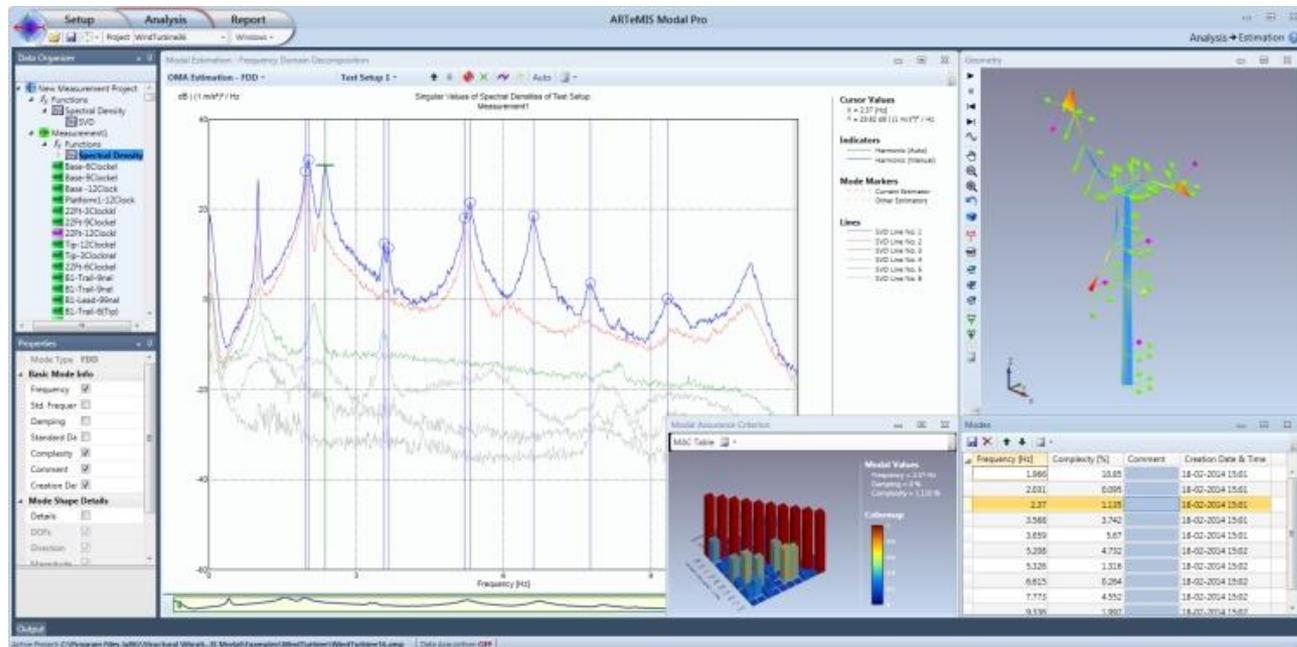
- * Método más simple.
- * Se aplica a auto-espectros y espectros cruzados de las respuestas operacionales.
- * Seleccionando picos en los espectros, se pueden obtener estimaciones de las frecuencias y formas modales.
- * La precisión depende de la resolución en frecuencias utilizada.



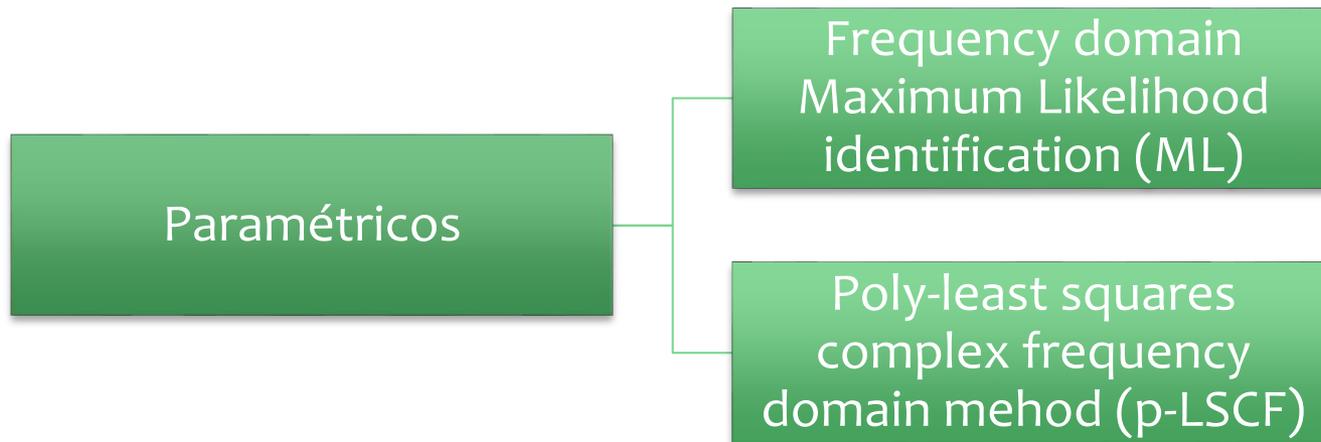
Dominio de la frecuencia – No paramétricos

Frequency Domain Decomposition (FDD)

- * Método ligeramente más sofisticado.
- * Permite:
 - * Separación de modos estrechamente espaciados.
 - * Identificación de amortiguamientos modales.
- * Interpreta espectro de salida estimado con el método de Welch.



Métodos en el dominio de la frecuencia



Dominio de la frecuencia – Paramétricos

Frequency-domain maximum likelihood identification (ML)

- * Método basado en la optimización que estima los parámetros modales minimizando una función de coste cuadrática ponderada adecuadamente con la incertidumbre en los datos experimentales.
- * El método da lugar a ecuaciones no lineales en los parámetros desconocidos.
- * Esto requiere un procedimiento iterativo con problemas como:
 - * Convergencia no garantizada,
 - * Mínimos locales,
 - * Sensibilidad a los valores iniciales,
 - * Alta carga computacional.

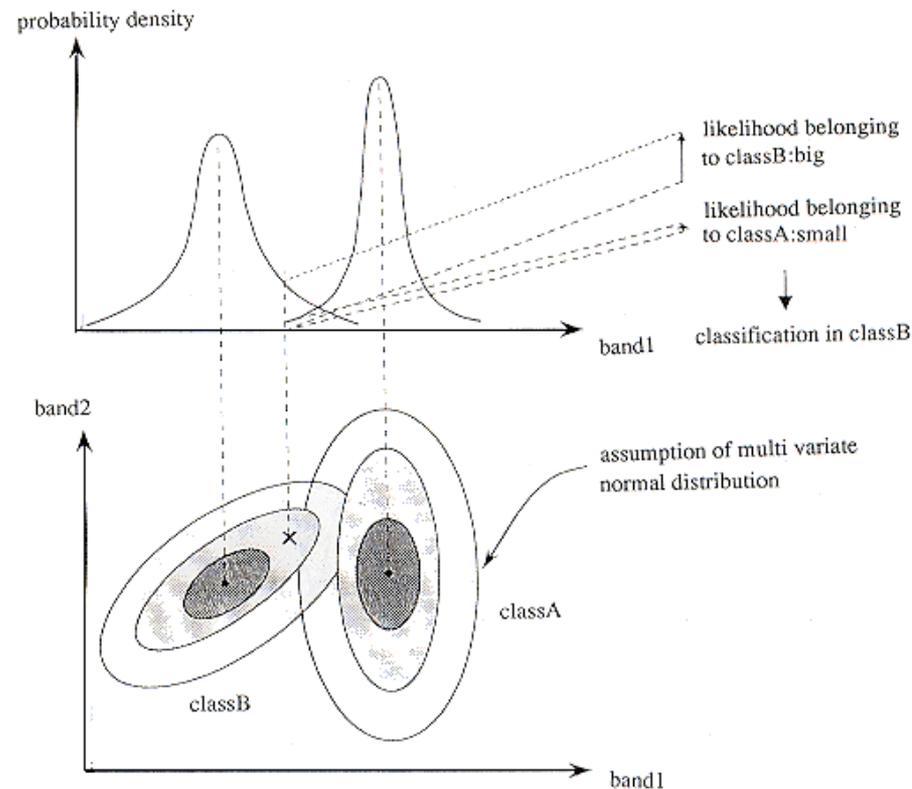


Figure 11.7.1 Concept of Maximum Likelihood Method

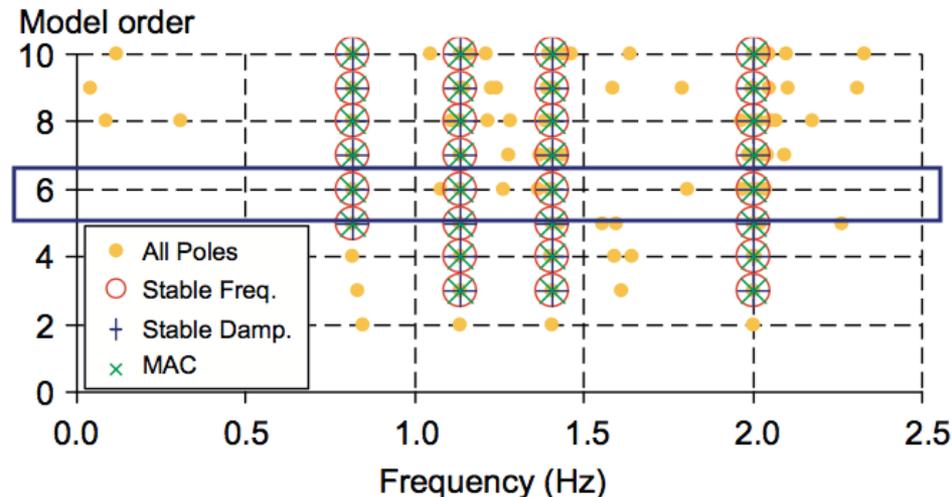
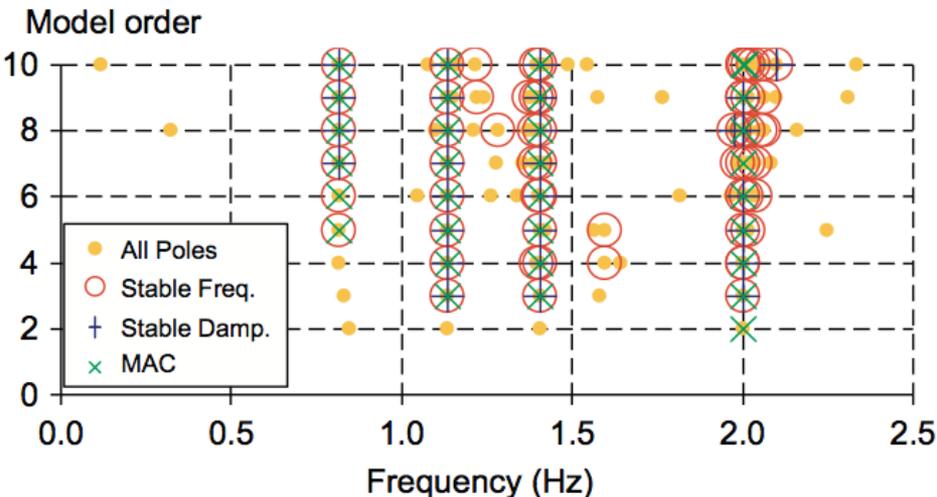
Dominio de la frecuencia – Paramétricos

Poly-least squares complex frequency domain method (p-LSCF)

- * Comercialmente conocido como “PolyMax”.
- * Desarrollado para identificación de parámetros modales a partir de FRF's, basado en un ajuste por mínimos cuadrados.
- * Produce estimaciones de polos globales y vectores de participación modal.

$$A_p = I$$

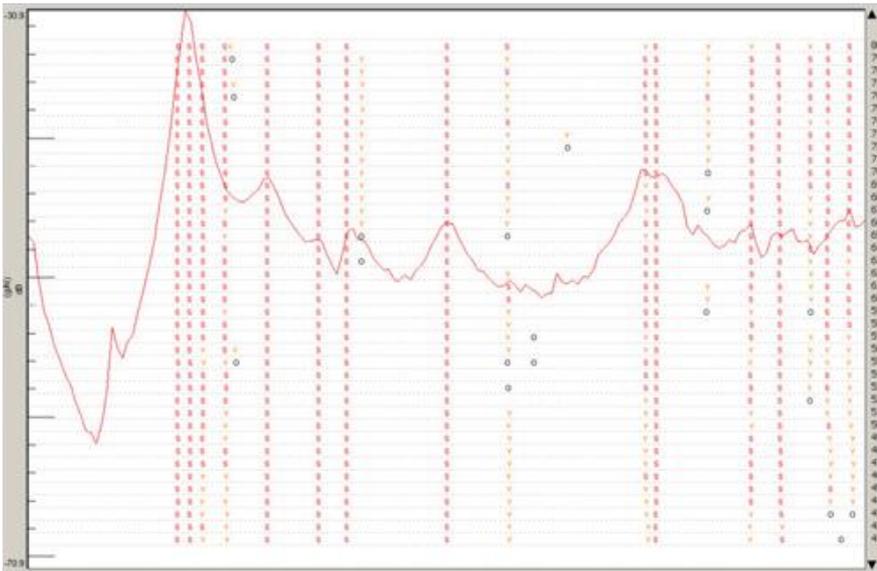
$$A_0 = I$$



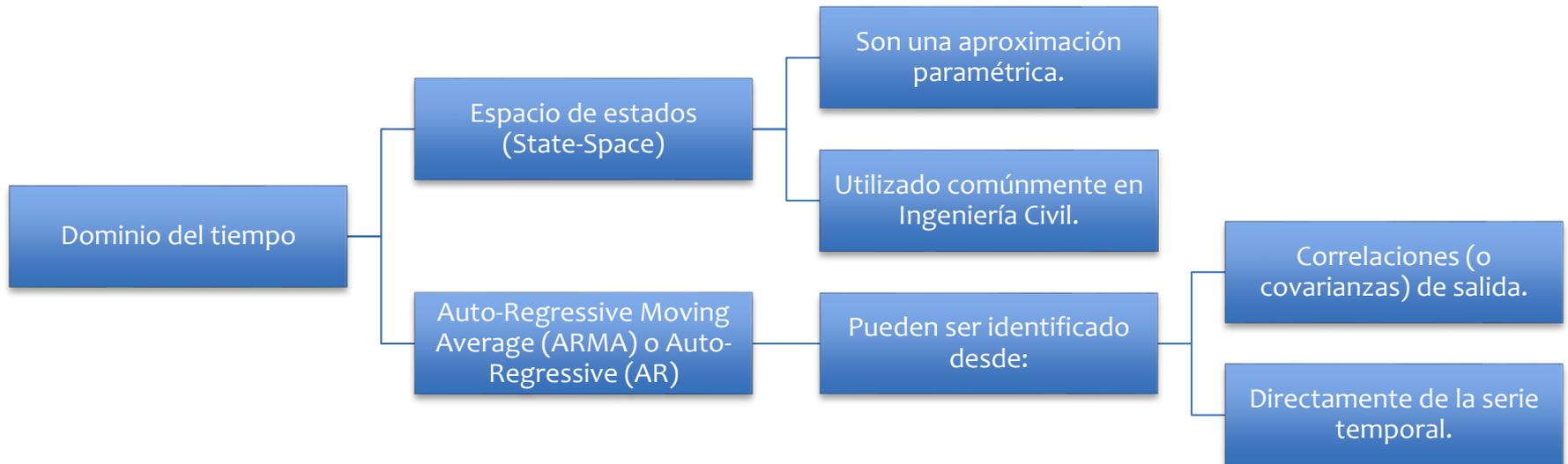
Dominio de la frecuencia – Paramétricos

Poly-least squares complex frequency domain method (p-LSCF)

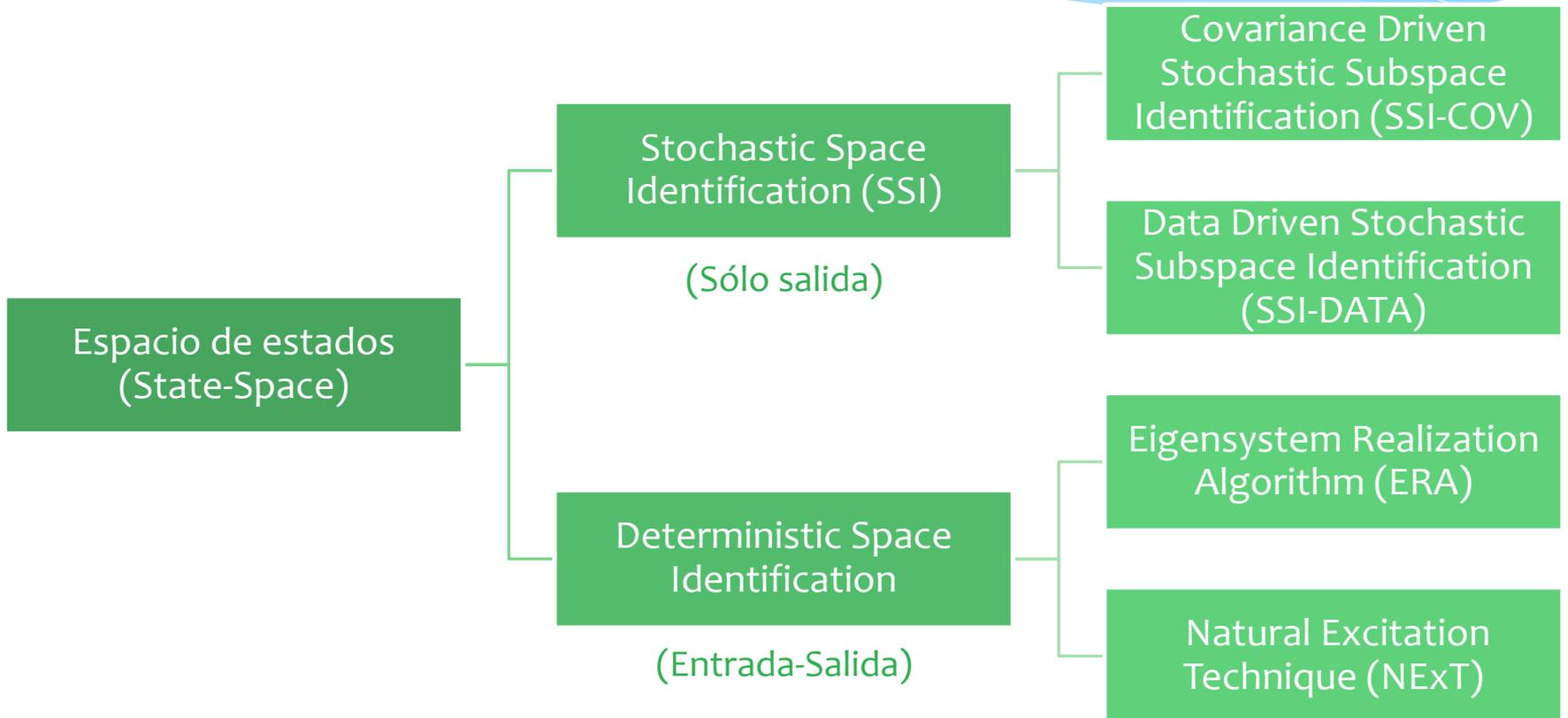
- * Ventajas:
 - * Diagramas fáciles de interpretar.
 - * Identificación de polos muy estable y factores de participación.
- * Se aplica a casos de difícil identificación:
 - * Sistemas de orden superior.
 - * Sistemas altamente amortiguados con gran superposición modal.



Métodos en el dominio del tiempo



Métodos en el dominio del tiempo



Dominio del tiempo – Espacio de Estados – Determinísticos

Eigensystem Realization Algorithm (ERA)

Serie de datos temporales

Matriz de Hankel generalizada

$$H(k-1) = [Y_{s_i+k+t_j}]; \quad Y_{s_i+k+t_j} = C_j A^{s_i+k-1+t_j} B_i$$

Descomposición en valores singulares

$$H(0) = R \Sigma S^T \longrightarrow \Sigma = \begin{bmatrix} \Sigma_n & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Matriz de la realización del sistema

$$\hat{A} = \Sigma_n^{-1/2} R_n^T H(1) S_n \Sigma_n^{-1/2}$$

$$\hat{B} = \Sigma_n^{1/2} S_n^T E_r$$

$$\hat{C} = E_m^T R_n \Sigma_n^{1/2}$$

Resolución del problema de autovalores.

$$A_c = \Psi \Lambda_c \Psi^{-1}$$

$$\phi = C_c \Psi$$

Extracción de las propiedades del sistema

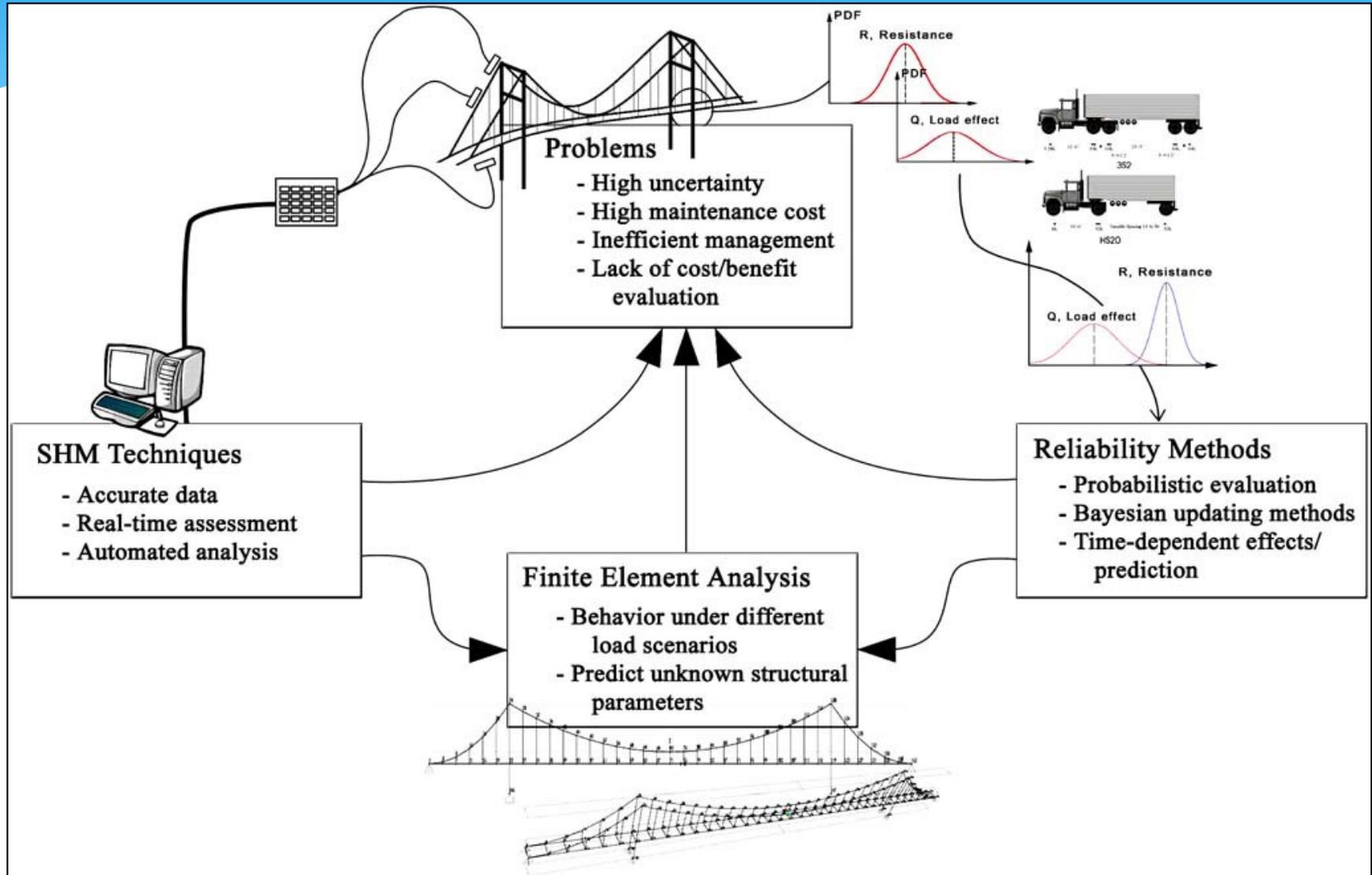
Actualización de Modelos



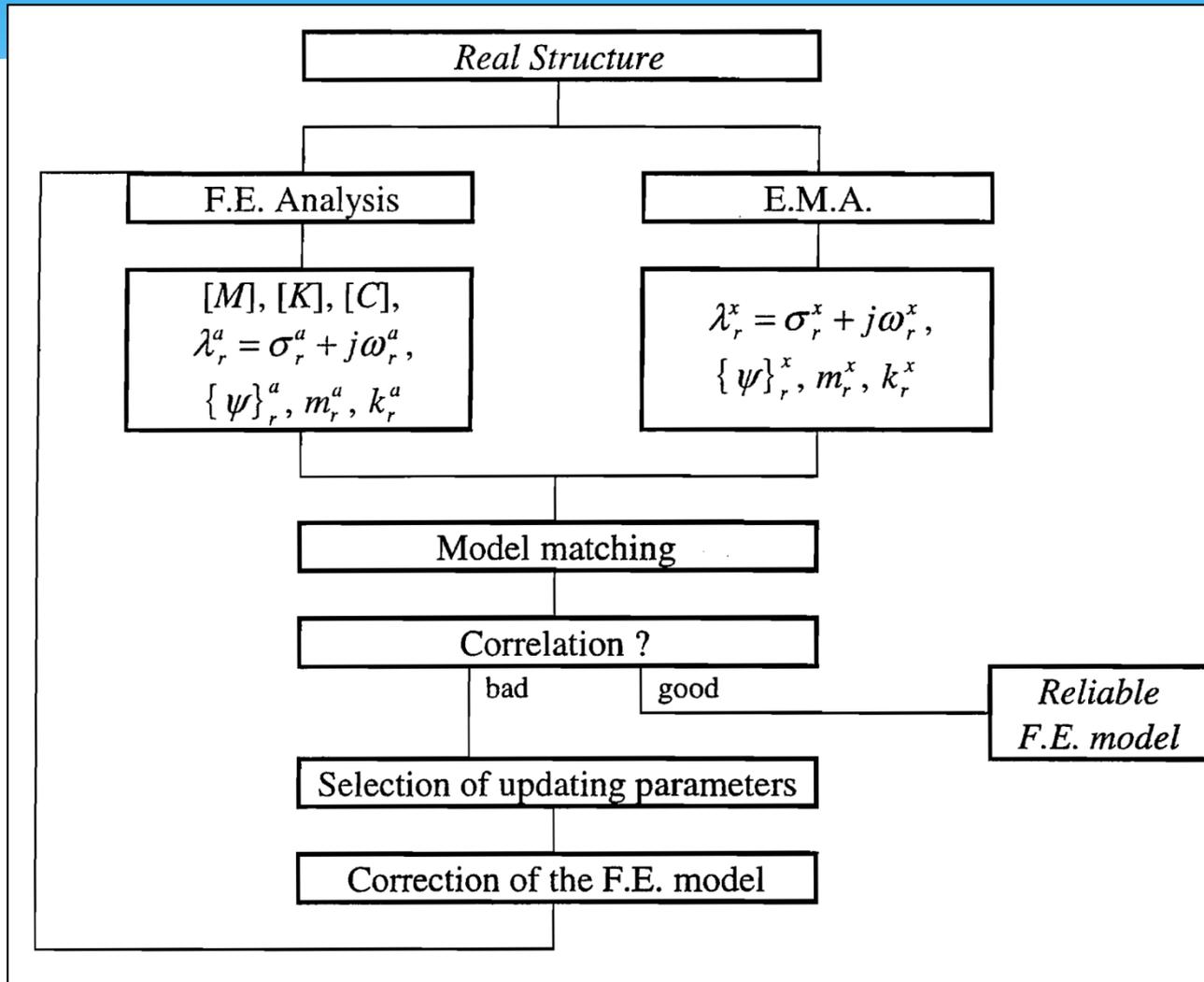
Jornada sobre Comportamiento Estructural y Monitorización de Estructuras
Viernes 20 Mayo 2016, Universidad de Málaga

Dr. Rafael Castro Triguero
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Contratado Dr. Universidad de Córdoba
Grupo Investigación Mecánica de Sólidos y Estructuras

Actualización de Modelos



Actualización de Modelos



Actualización de Modelos

Construcción modelo FEM:

- * $[M]$ = matriz de masas
- * $[K]$ = matriz de rigidez
- * $[C]$ = matriz de amortiguamiento

$$(-p^2[M] + p[C] + [K])\{X\} = \{0\}$$

$$\left(p \begin{bmatrix} [M] & [0] \\ [0] & -[M] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [C] & [K] \\ [M] & [0] \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \dot{X} \\ X \end{Bmatrix} = \{0\}$$

$[M]$, $[K]$ y $[C]$ o FRF's

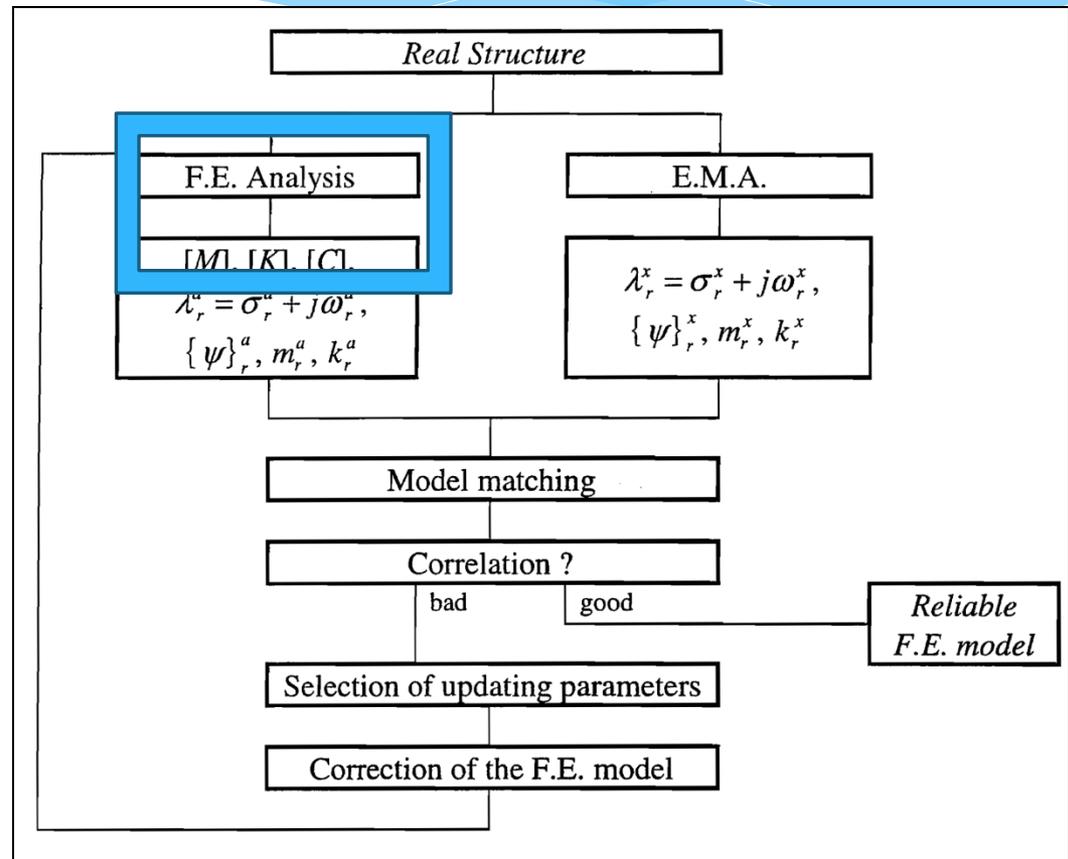
A menudo se considera $[C]=0$

Se obtienen:

* Autovalores $\rightarrow \lambda_r = \sigma_r + j\omega_r$

* Autovectores $\rightarrow \{\psi\}_r$

$$\lambda_r^a = \sigma_r^a + j\omega_r^a, \{\psi\}_r^a, m_r^a, k_r^a$$

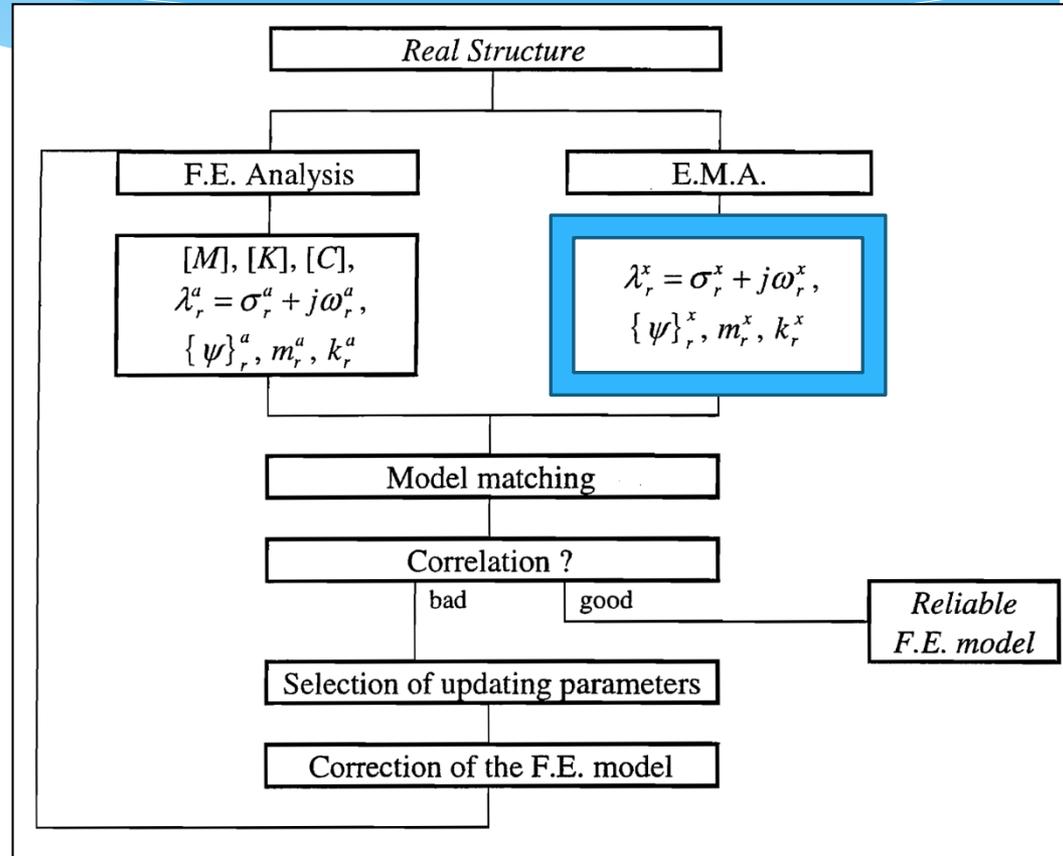


Actualización de Modelos

Ensayo experimental – FRF's

Aplicando técnicas de identificación de parámetros modales, se obtiene experimentalmente:

$$\lambda_r^x = \sigma_r^x + j\omega_r^x, \{\psi\}_r^x, m_r^x, k_r^x$$



Actualización de Modelos

Malla medida \neq Grupo nodos FEM

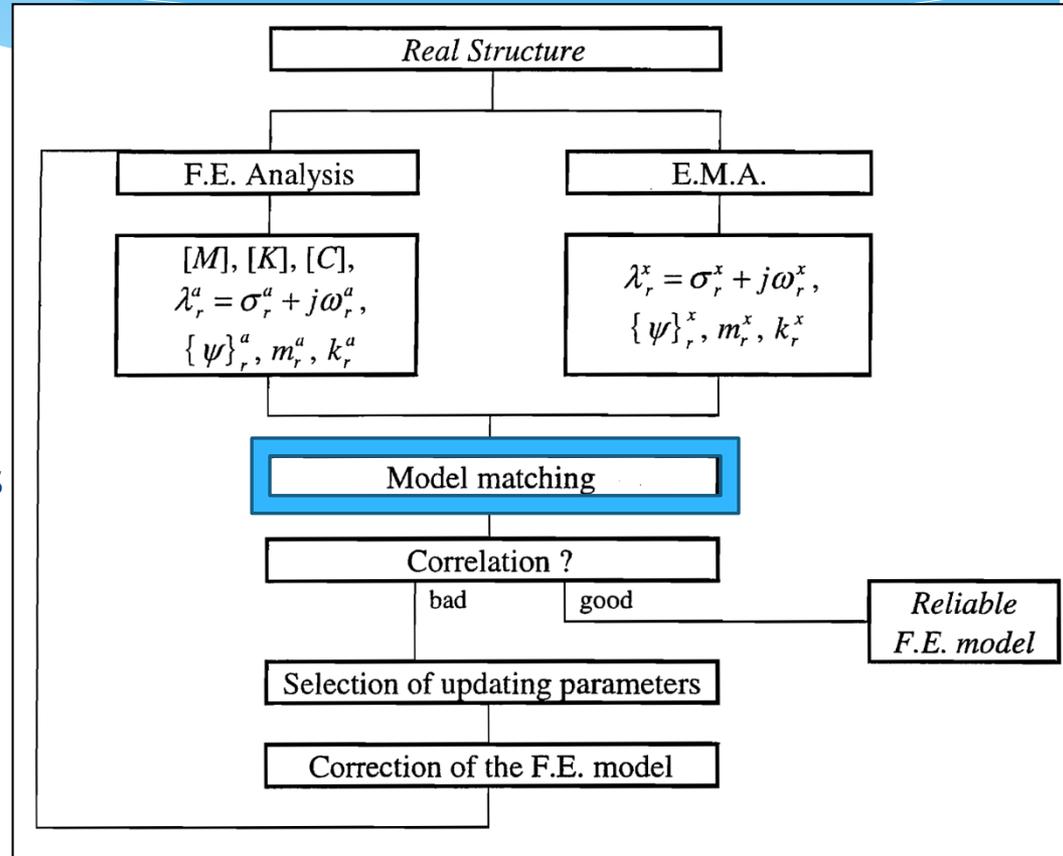
- * Punto medido \neq Nodo FEM
- * DOF de FEM $>$ DOF medidos

Técnicas de correlación

- * Mod. analítico
 - * Mod. experimental
- Coincidencias
DOF a DOF

Solución:

- * Reducir DOF de FEM
- * Expandir DOF medidos



Model matching

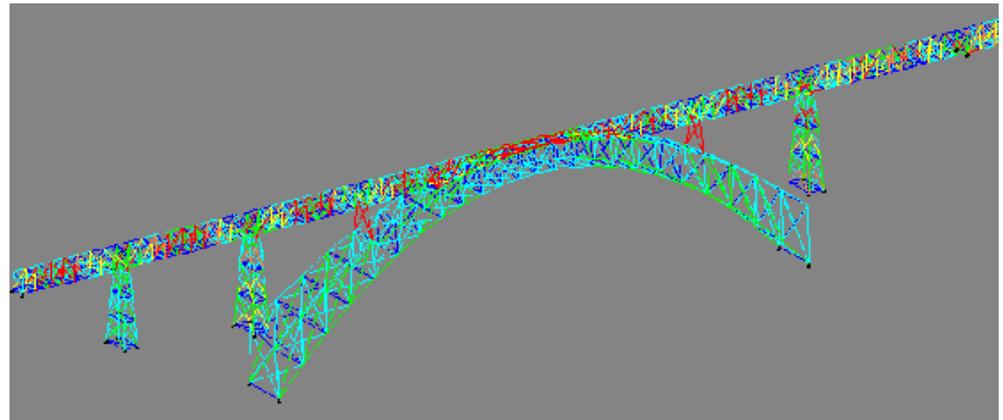
DOF de FEM \neq DOF medidos

- * FEM requiere una malla fina, para tener predicciones precisas.
- * En la práctica no es siempre posible:
 - * Algunos nodos FEM están internos en la estructura, difícil acceso.
 - * Difícil medir DOF rotacionales.
 - * En OMA, no es necesario una malla fina de puntos medidos.

El número y localización de DOF deben coincidir.

Primera fase: correspondencia DOF

$$\{X_F\} = \begin{Bmatrix} \{X_A\} \\ \{X_D\} \end{Bmatrix}$$

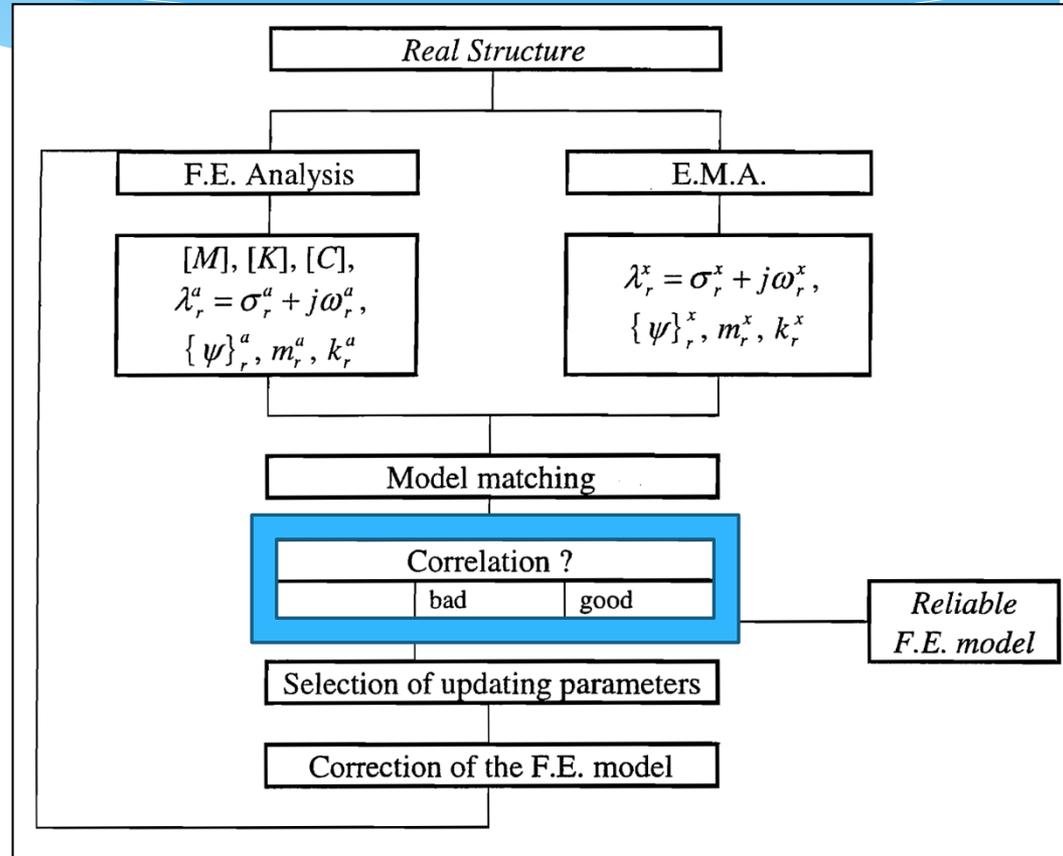


Actualización de Modelos

Verificación del modelo.

Comparación entre parámetros modales analíticos y parámetros modales experimentales:

- * Buena correlación: fin proceso de actualización (FEM – OK).
- * Mala correlación: corregir FEM.

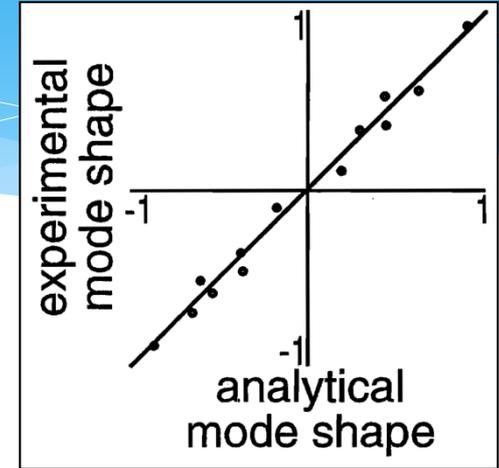


Correlation

- * Comparación visual de las formas modales
 - * Se comparan las representaciones de las formas modales analíticas y experimentales.
 - * A menudo se complica por la falta de medición de puntos experimentales.
- * Criterio de garantía modal (MAC):
 - * Factor de correlación para cada par de modos analítico y experimental:

$$MAC^{a-x}(i,j) = \frac{|\{\psi\}_i^{a'} \{\psi\}_j^x|^2}{(\{\psi\}_i^{a'} \{\psi\}_i^a)(\{\psi\}_j^{x'} \{\psi\}_j^x)} \quad \begin{cases} i = 1, N_m^a \\ j = 1, N_m^x \end{cases}$$

- * Varía entre 0 y 1.
- * $MAC=1$ \implies Indica buena correlación.
- * $MAC=0$ \implies No hay correlación
- * $MAC(i,j)>0.8$ \implies Si la diagonal muestra esta condición, se puede considerar buena correlación.



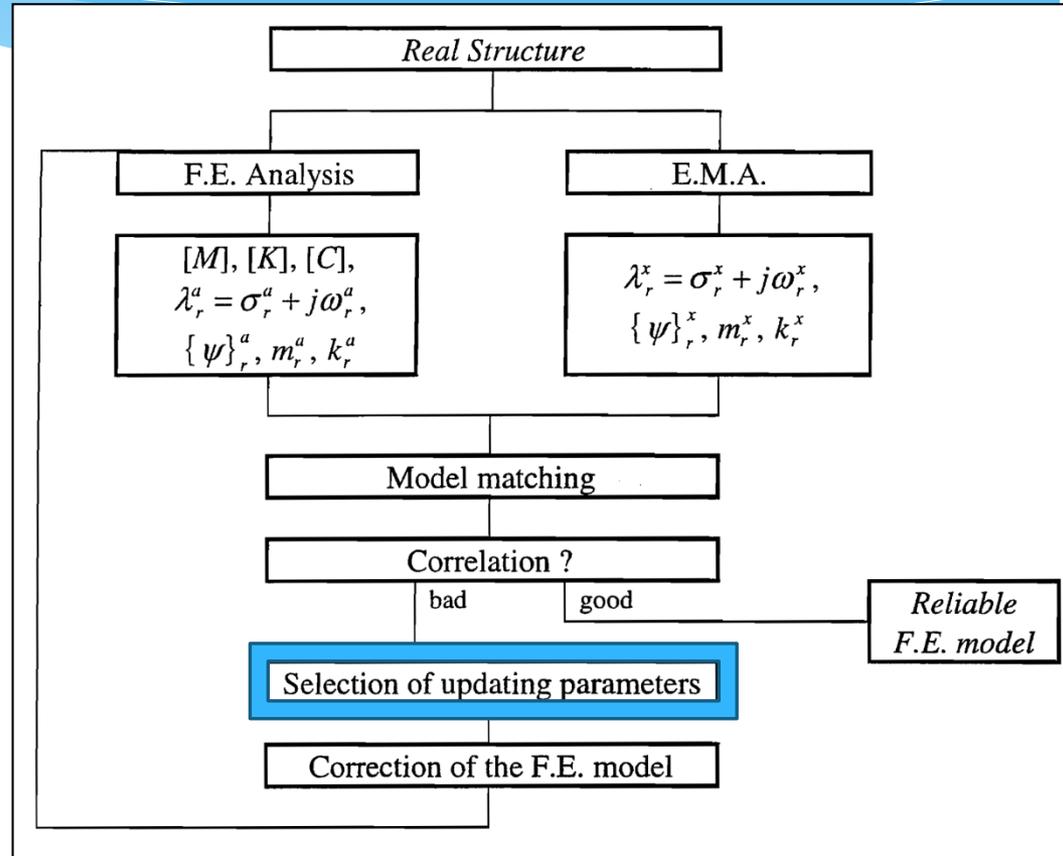
Actualización de Modelos

Selección de parámetros a actualizar

Es un punto crucial del proceso de actualización de modelos.

Tipos parámetros de actualización:

1. Elementos individuales...



Selection of updating parameters

Validez y fiabilidad del modelo actualizado

- * La selección de parámetros a actualizar, es una fase crucial en el proceso de corrección.
- S1: Todos los posibles modelos matemáticos del comportamiento dinámico de la estructura.
- S2: Todos los modelos FEM.
- S3: Todos los modelos FEM, que se correlacionan bien con los datos experimentales.
- S4: Grupo de modelos que derivan del modelo FEM original. Una mala correlación, S4 no tendrá espacio común con S3.
 - M_{opt} : Modelo cualquiera
 - F_{opt} : Modelo FEM cualquiera.
 - M_o : Modelo FEM original.
 - M_u : Modelo actualizado.

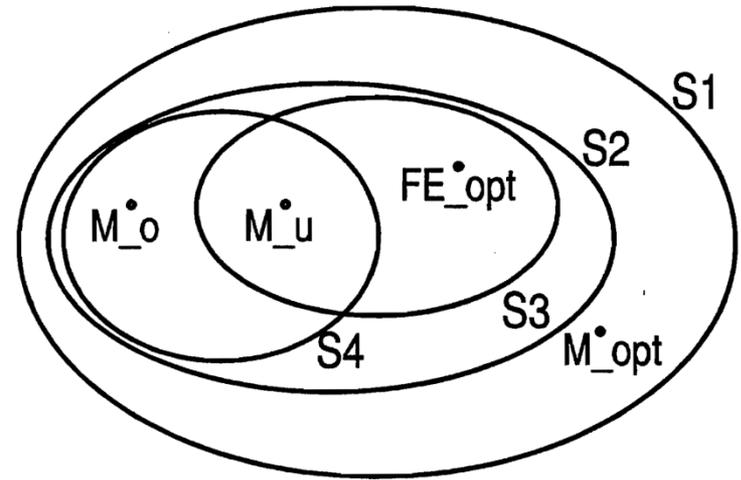
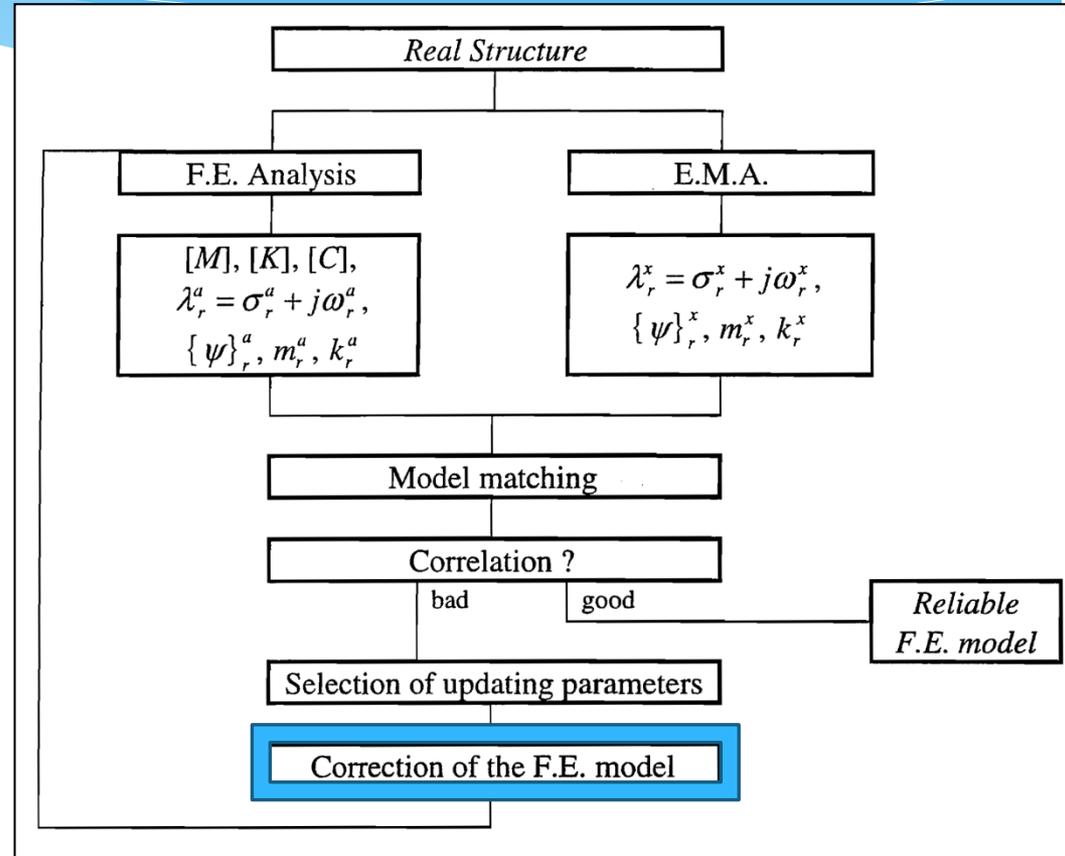


Figure a.6.5: Schematic overview of analytical models.

Actualización de Modelos

A menudo incompatibilidad de los datos obtenidos con técnicas experimentales a partir de FEM, razones:

1. DOF medidos, no coinciden con DOF del FEM.
2. Grupo de datos experimentales incompletos.
3. Mediciones contaminadas con ruido. Aceptable errores de:
 - * 3% frecuencias de resonancia
 - * 10% componentes formas modales
 - * 30% masas y rigideces modales
4. Amortiguamiento no incluido de manera precisa en el FEM.



Detección de Daño Estructural



Jornada sobre Comportamiento Estructural y Monitorización de Estructuras
Viernes 20 Mayo 2016, Universidad de Málaga

Dr. Rafael Castro Triguero
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Contratado Dr. Universidad de Córdoba
Grupo Investigación Mecánica de Sólidos y Estructuras

Introducción

Primeros métodos de detección de daño:

- * Inspección visual.
- * Métodos experimentales localizados:
 - * Met. acústicos o ultrasonidos.
 - * Met. basados en campos magnéticos.



Problema



Necesidad de conocer la localización del daño.

Introducción

Década 70-80 → Aparecen técnicas alternativas, basadas en las características dinámicas de las estructuras.

Sistema dinámico



Caracterizado por parámetros modales



- Frecuencias naturales
- Amortiguamiento
- Modos de vibración

Cambio parámetros modales



Daño



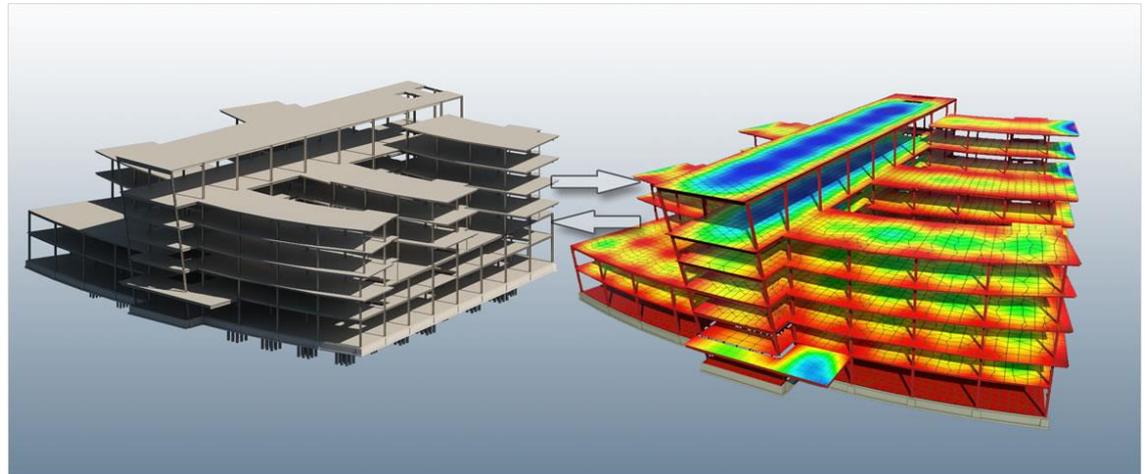
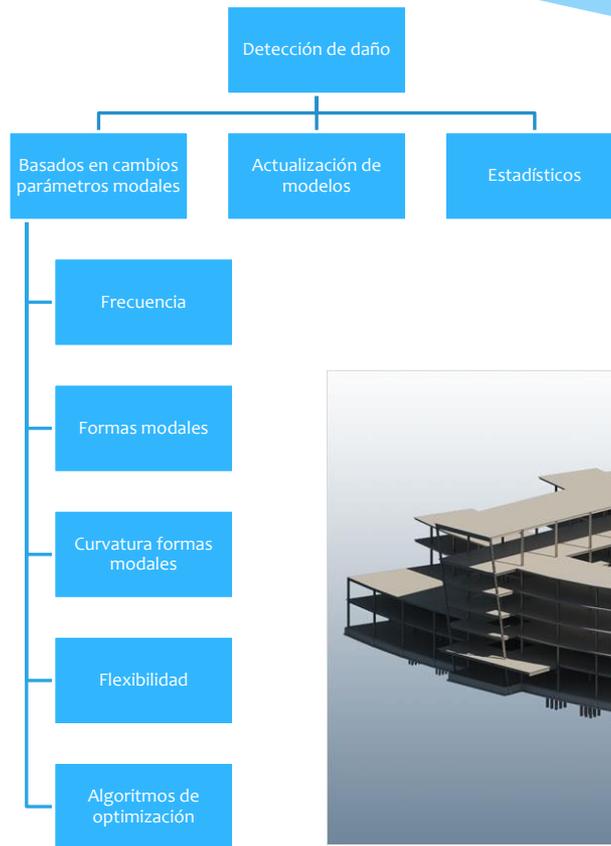
Fractura
Grieta

Niveles de identificación de daño:

- * Nivel 1: Determinación de la existencia del daño.
- * Nivel 2: Localización geométrica del daño.
- * Nivel 3: Cuantificación de la severidad del daño.
- * Nivel 4: Predicción de la vida en servicio restante de la estructura.



Clasificación métodos de detección de daño



Métodos basados en cambios de parámetros modales

Métodos basados en la frecuencia:

Medición fácil de realizar, en puntos accesibles.

No se contamina fácilmente del ruido experimental.

$$\omega = \sqrt{k/m}$$

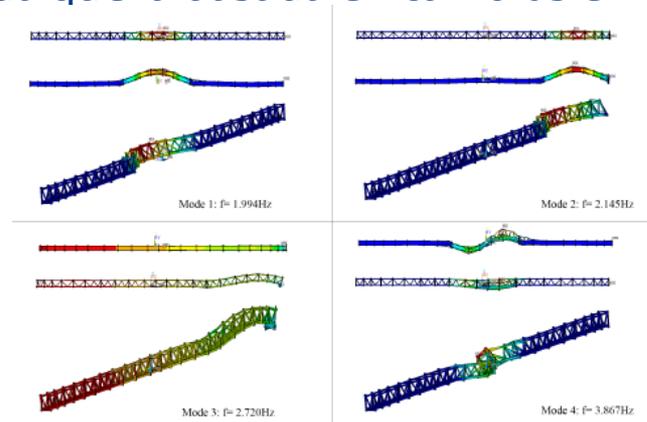
* Forward Problem:

- * Pertenece a la categoría Nivel 1 de identificación de daño.
- * Consiste en calcular cambios de frecuencias, a partir de un tipo de daño conocido.
- * Se modela el daño matemáticamente, y se comparan las frecuencias obtenidas, con las medidas experimentalmente para determinar el daño.

Métodos basados en cambios de parámetros modales

Métodos basados en los modos de vibración:

- * Comparación directa de las formas modales (métodos tradicionales):
 - * Modal Assurance Criterion (MAC):
 - * Mide la similitud entre dos modos.
 - * Valores 1: combinación perfecta.
 - * Valores 0: no hay similitud.
 - * Técnica más sólida que la basada en cambios en la frecuencia.
- Valor pequeño → Indica posible daño



Métodos basados en cambios de parámetros modales

Métodos basados en los modos de vibración:

- * Análisis formas modales, usando métodos modernos de procesamiento de señal:

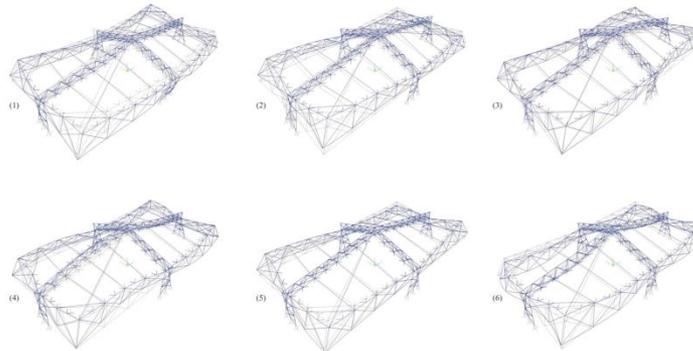
$$FD = \frac{\log_{10}(n)}{\log_{10}(d/L) + \log_{10}(n)}$$

- * Método dimensión fractal:

- * Calcula la dimensión fractal localizada directamente de la forma modal.
- * Localización y tamaño del daño, se obtienen del pico de la curva FD.

- * Método transformada de Wavelet:

- * Tratan los datos de las formas modales como una señal en el dominio espacial.
- * Utilizan la transformada de Wavelet para detectar irregularidades en la señal a causa del daño.

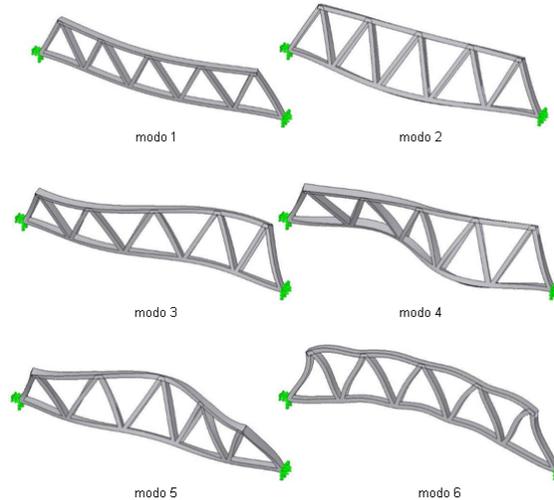


Métodos basados en cambios de parámetros modales

Métodos basados en la curvatura de los modos de vibración:

- * Método tradicional del cambio de la curvatura modal:
 - * Cambios en la curvatura de los modos, se localizan en la región dañada.
 - * Los cambios son más pronunciados que en los desplazamientos de los modos.

$$k_i = \frac{w_{i+1} + w_{i-1} - 2w_i}{h^2}$$

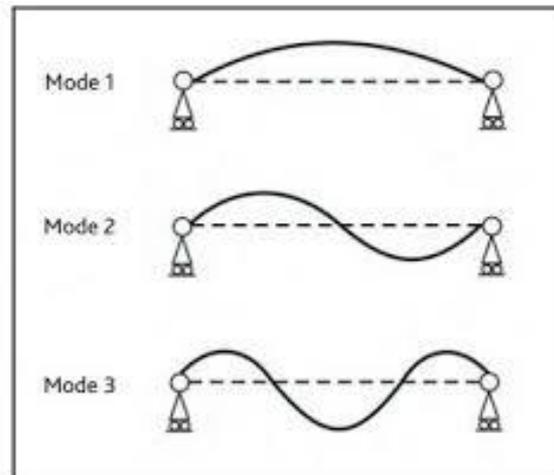


Métodos basados en cambios de parámetros modales

Métodos basados en la curvatura de los modos de vibración:

- * Métodos modernos procesamiento señal, usando curvatura modal:
 - * Utiliza una técnica de aislamiento de huecos para localizar el daño por ajuste de una curva polinómica cúbica, en la curvatura de la forma modal.

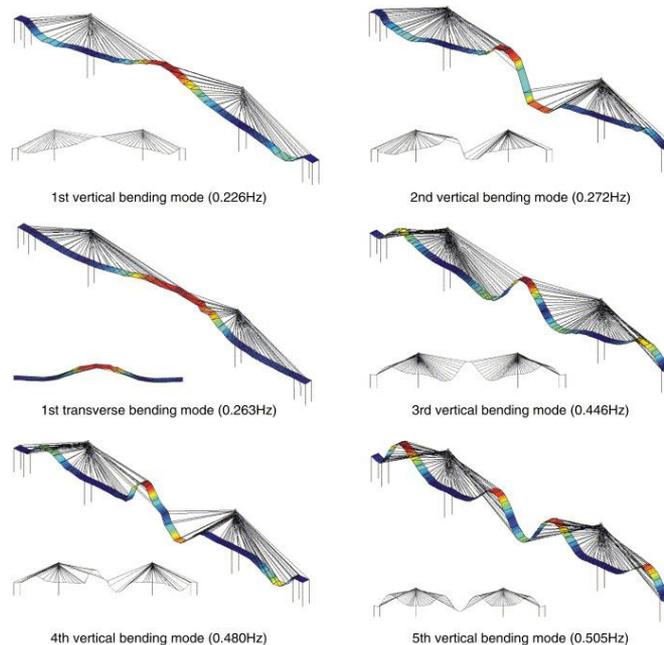
$$\delta_i = (a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3) - k_i$$



Métodos basados en cambios de parámetros modales

Métodos basados en la curvatura de los modos de vibración:

- * Métodos basados en la energía de deformación modal:
 - * Utiliza el cambio de la energía de deformación modal, para detectar daño.
 - * En vigas y placas, la energía de deformación global se relaciona con la curvatura de las formas modales.



Métodos basados en cambios de parámetros modales

Métodos basados en la flexibilidad modal:

- * Detectan el daño a través del cambio en la flexibilidad modal.
- * La curvatura de la superficie con carga uniforme, es sensible a la presencia de daños.
- * Válido, incluso con mediciones incompletas o ruidosas

$$[F] = [\Phi][\Lambda]^{-1}\Phi^T$$

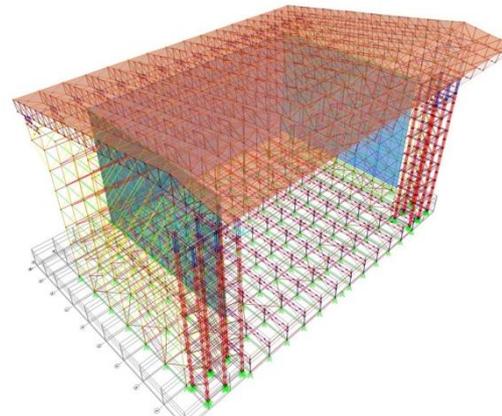
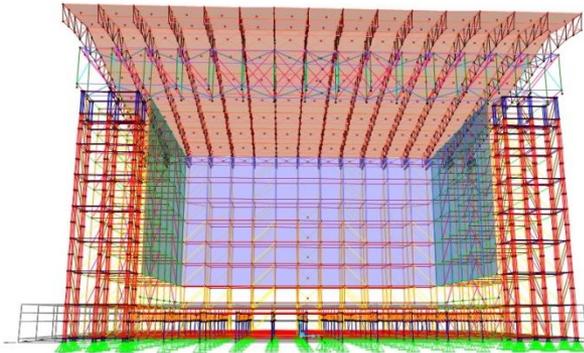
Métodos basados en algoritmos de optimización:

- * Existen numerosos métodos que formulan formas de identificación de daño, como un problema de optimización.
- * Usan múltiples parámetros modales como función objetivo.
- * Tipos de métodos:
 - * Métodos basados en redes neuronales.
 - * Métodos basados en algoritmos genéticos.



Métodos basados en la actualización de modelos

- * Modelos de actualización: proporcionan una fuente de algoritmos de identificación de daños.
- * Estado inicial, necesario modelo numérico bien correlacionado.
- * Aspectos a tener en cuenta en un modelo numérico:
 - * Los datos medidos, elegidos para ser comparados por el modelo.
 - * Precisión del modelo inicial.
 - * Tamaño y complejidad del modelo.
 - * Número de parámetros de actualización.
 - * No unicidad del modelo resultante en la adecuación de los datos medidos.



Métodos estadísticos

- * El daño se detecta por la desviación en los datos medidos en relación con los datos medidos en condiciones normales de funcionamiento.
 - * Una estructura no dañada, posee una distribución con una media y una varianza asociada.
 - * Estructura dañada: cambios en la media, varianza, o en ambas.
- * Inconveniente: necesario disponer de datos pasados.
- * Se utilizan los patrones estadísticos, para detectar la ubicación y cuantificación de daños.

