

# Jornada sobre actualización de modelos estructurales

## ESTRATEGIAS DE DISEÑO PARA GARANTIZAR UN ADECUADO NIVEL DE CONFORT EN PASARELAS PEATONALES

Javier Fernando Jiménez Alonso

Departamento de Estructuras de Edificación e Ingeniería del Terreno

Universidad de Sevilla



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

Área de Mecánica de Mecánica de los Medios Continuos y  
Teoría de Estructuras

Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

**Universidad de Málaga**  
**20 de Mayo 2016**



## Tabla de contenidos

- I. Introducción.
- II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.
- III. Optimización de estructuras.
- IV. Casos prácticos.
- V. Referencias.

## Tabla de contenidos

### **I. Introducción.**

II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.

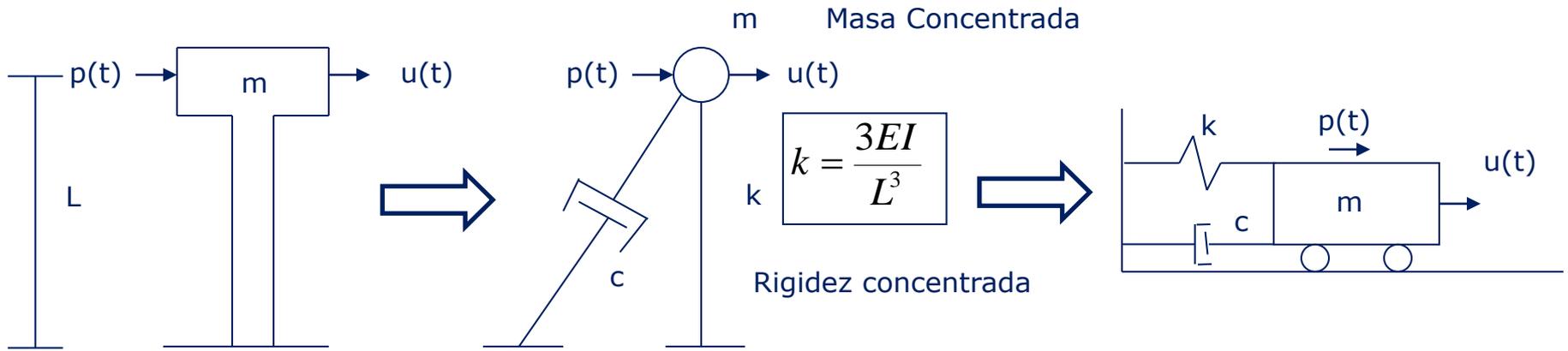
III. Optimización de estructuras.

IV. Casos prácticos.

V. Referencias.

## I. Introducción.

Sistemas discretos de un solo grado de libertad (SDOF)



Ej. Tanque de Agua

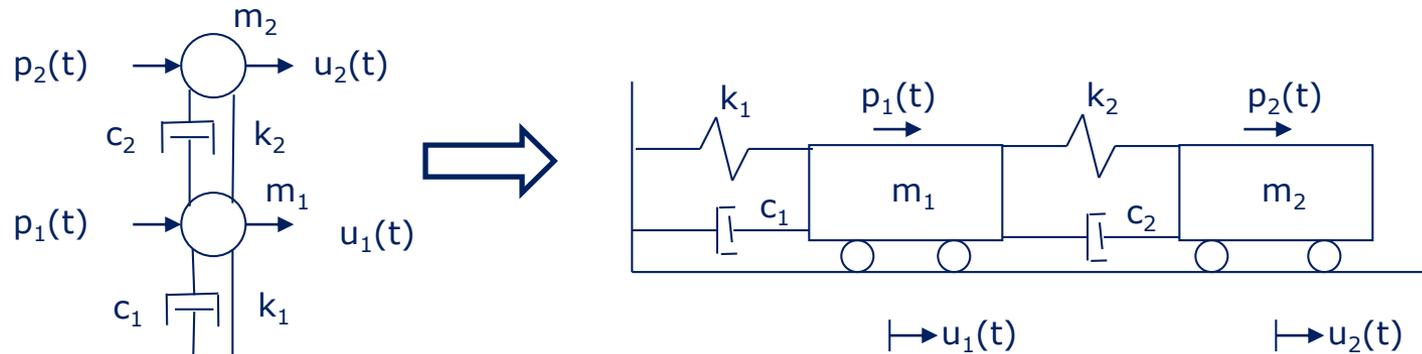
Amortiguamiento concentrado

$$m \cdot \ddot{u}(t) + c \cdot \dot{u}(t) + k \cdot u(t) = p(t)$$

Ecuación diferencial ordinaria

## I. Introducción.

Sistemas discretos de múltiples grado de libertad (MDOF)



Masa concentrada en múltiples localizaciones

Amortiguamiento concentrado en múltiples localizaciones

Rigidez concentrada en múltiples localizaciones

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1(t) \\ p_2(t) \end{bmatrix}$$

Sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias

## I. Introducción.

$$m \cdot \ddot{u}(t) + c \cdot \dot{u}(t) + k \cdot u(t) = p_0 \cdot \cos(\bar{\omega}t)$$



$$u(t) = u_h(t) + u_p(t)$$

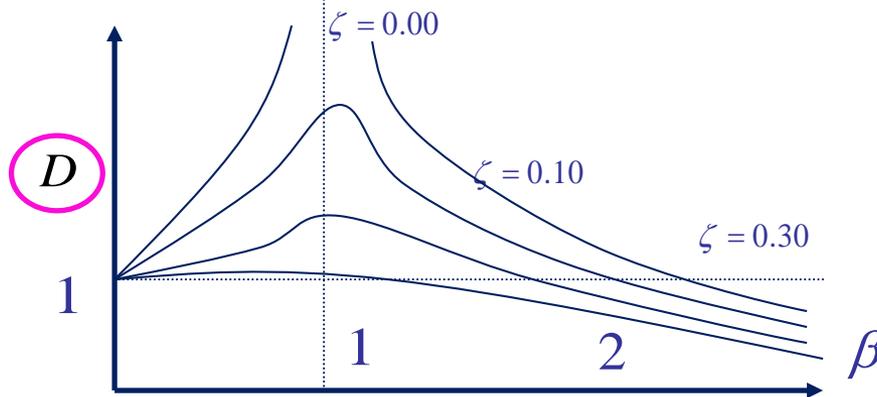
$$u_h(t) = (A \cdot \cos(\omega_d t) + B \cdot \text{sen}(\omega_d t)) \cdot e^{-\zeta \omega_n t}$$

Estado Transitorio

$$u_p(t) = \frac{p_0}{k} \frac{1 - \beta^2}{(1 - \beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2} \text{sen}(\bar{\omega}t) - \frac{p_0}{k} \frac{2\zeta\beta}{(1 - \beta^2)^2 + (2\zeta\beta)^2} \cos(\bar{\omega}t)$$

Estado Estable

$$\beta = \frac{\bar{\omega}}{\omega_n}$$



$$u_p(t) = u_{st} \cdot D \cdot \text{sen}(\bar{\omega}t - \theta)$$

$\beta$

## I. Introducción.

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}(t) = \mathbf{p}(t)$$

$$\ddot{\mathbf{u}}(t) = \boldsymbol{\varphi} \cdot \ddot{\mathbf{y}}(t)$$

$$\dot{\mathbf{u}}(t) = \boldsymbol{\varphi} \cdot \dot{\mathbf{y}}(t)$$

$$\mathbf{u}(t) = \boldsymbol{\varphi} \cdot \mathbf{y}(t)$$

$$\boldsymbol{\varphi}^T \cdot \mathbf{M} \cdot \boldsymbol{\varphi} \cdot \ddot{\mathbf{y}}(t) + \boldsymbol{\varphi}^T \cdot \mathbf{C} \cdot \boldsymbol{\varphi} \cdot \dot{\mathbf{y}}(t) + \boldsymbol{\varphi}^T \cdot \mathbf{K} \cdot \boldsymbol{\varphi} \cdot \mathbf{y}(t) = \boldsymbol{\varphi}^T \cdot \mathbf{p}(t)$$

$$\mathbf{M}^* \cdot \ddot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{C}^* \cdot \dot{\mathbf{y}}(t) + \mathbf{K}^* \cdot \mathbf{y}(t) = \boldsymbol{\varphi}^T \cdot \mathbf{p}(t)$$

\* Matrices diagonales → Desacoplar el sistema de n ecuaciones diferenciales

## I. Introducción.

### Carga peatonal equivalente $p(t)$

$$p(t) = G \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_f \cdot t) \cdot n' \cdot \psi$$

$G$  Componente de la carga peatonal ( $G=280$  N para la dirección vertical caminando,  $G=35$  N para la dirección lateral caminando,  $G=1250$  N para la dirección vertical corriendo).

$f_f$  es la frecuencia natural de la estructura bajo consideración.

$$n' = \begin{cases} 10.80 \cdot \sqrt{\zeta \cdot n} & \text{Para las clases de tráfico TC1-TC3 (15 P-0.20 P/m}^2\text{-0.50 P/m}^2\text{)} \\ 1.85 \cdot \sqrt{n} & \text{Para las clases de tráfico TC4-TC5 (1.00 P/m}^2\text{-1.50 P/m}^2\text{)} \end{cases}$$

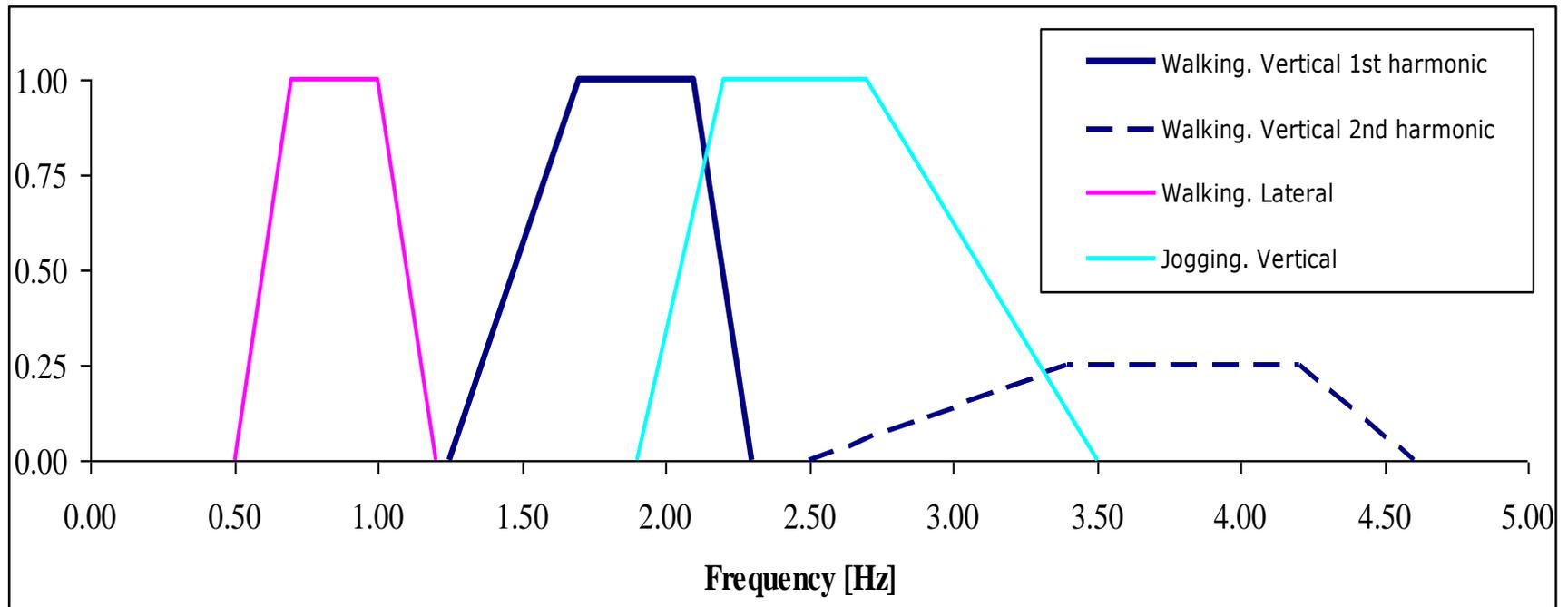
$\zeta$  es el ratio de amortiguamiento estructural.

$\psi$  Es el coeficiente de reducción para tener en cuenta la probabilidad de que la frecuencia del paso se aproxime a la frecuencia natural bajo consideración.

## I. Introducción.

### Carga peatonal equivalente $p(t)$

$\psi$  Coeficiente de reducción peatonal



## I. Introducción.

### Carga peatonal equivalente $p(t)$

#### Clases de Tráfico

Clases	Densidad $d$ [ $P/m^2$ ]	Características
TC1	$< 15 P$	Tráfico muy débil
TC2	$< 0.20 P/m^2$	Paseo confortable y libre
TC3	$< 0.50 P/m^2$	Tráfico denso
TC4	$< 1.00 P/m^2$	Situación inconfortable
TC5	$< 1.50 P/m^2$	Tráfico muy denso

#### Clases de Confort

Nivel	Grado	Aceleración Vertical	Aceleración Horizontal
CL1	Máximo	$< 0.50 m/s^2$	$< 0.10 m/s^2$
CL2	Medio	$0.50-1.00 m/s^2$	$0.10-0.30 m/s^2$
CL3	Mínimo	$1.00-2.50 m/s^2$	$0.30-0.80 m/s^2$
CL4	Sin confort	$> 2.50 m/s^2$	$> 0.80 m/s^2$

Evitar lock-in lateral  $\rightarrow$  aceleración lateral  $< 0.15 m/s^2$

## Tabla de contenidos

I. Introducción.

**II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.**

III. Optimización de estructuras.

IV. Casos prácticos.

V. Referencias.

## II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.

### Modificación de la masa

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}(t) = p(t)$$

Pasarelas muy ligeras → Uso tableros pesados hormigón → Mejora comportamiento dinámico

$$M_i \geq \frac{\sqrt{n_p} \cdot (k_1 \cdot \zeta^{k_2} + 1.65 \cdot k_3 \cdot \zeta^{k_4})}{a_{\text{lim}}}$$

d [P/m <sup>2</sup> ]	Vertical-Torsion				Lateral			
	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>
<0.50	0.7603		0.050					
1.00	0.5700	0.4680	0.040	0.675	0.1205	0.4500	0.0120	0.6405
1.50	0.4000		0.035					

## II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.

### Modificación de la frecuencia natural

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K} \mathbf{u}(t) = p(t)$$

- Hiperestaticidad.
- Barandillas como elemento estructural.
- Sistema de cables de estabilización.
- Aumento de canto estructuras.

## II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.

### Modificación del amortiguamiento estructural

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}(t) = p(t)$$

- (i) Instalación de equipos de control: activos, semiactivos, pasivo o híbridos.
- (ii) Actuación sobre elementos no estructurales
- (iii) Detalles constructivos

## II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.

### Modificación del amortiguamiento estructural

Actuación sobre elementos no estructurales

Pavimento en pasarelas → incrementa el amortiguamiento

Aparatos de apoyo de neopreno → Incrementa el amortiguamiento

Uniones atornillos incrementa amortiguamiento frente a soldadas

## II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.

### Modificación del amortiguamiento estructural

Equipos de control pasivo: amortiguadores viscosos



## II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.

### Modificación del amortiguamiento estructural

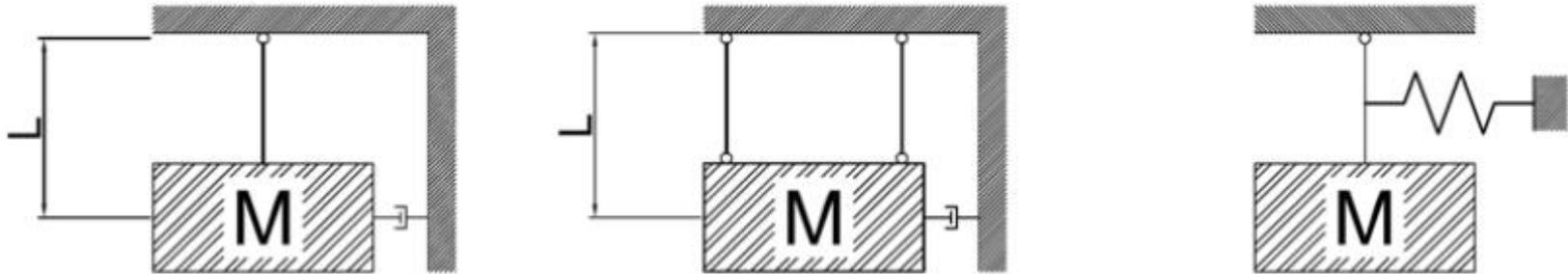
Equipos de control pasivo: amortiguadores masa sincronizada (TMD)



## II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.

### Modificación del amortiguamiento estructural

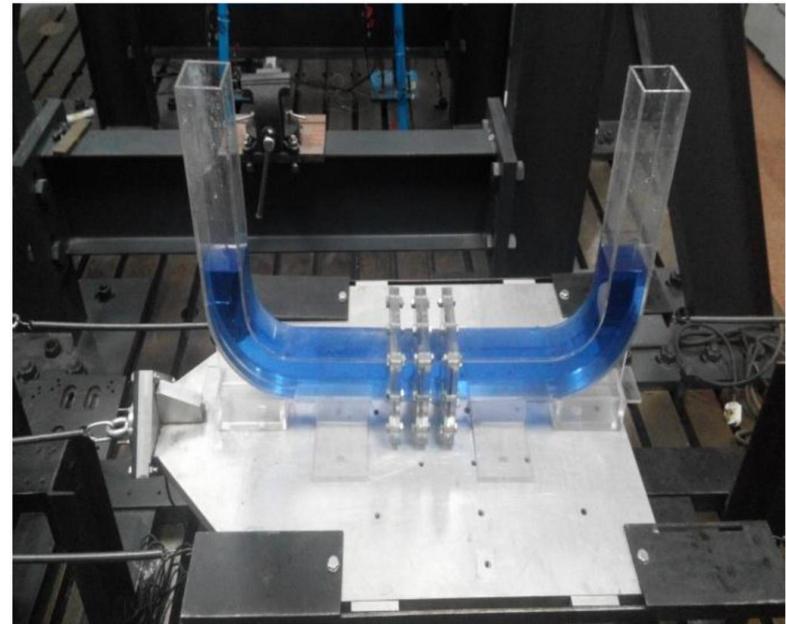
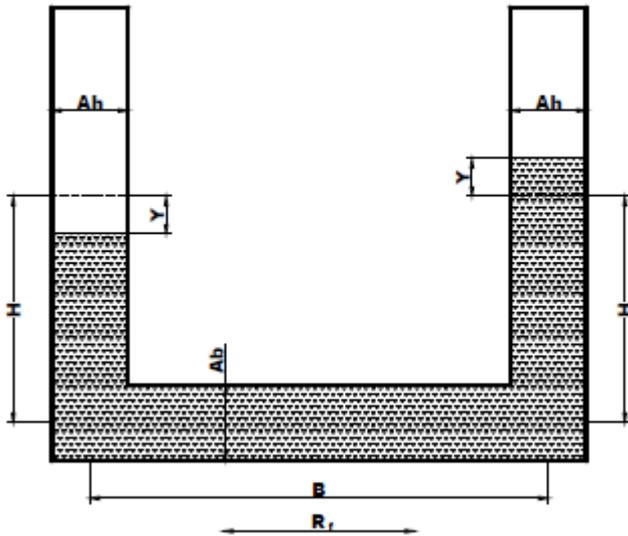
Equipos de control pasivo: amortiguadores péndulo



## II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.

### Modificación del amortiguamiento estructural

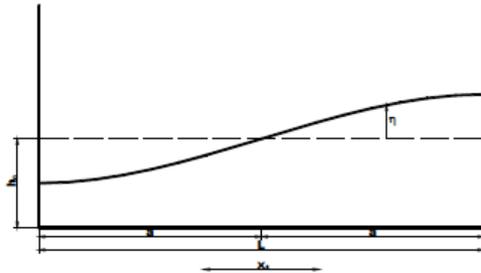
Equipos de control pasivo: amortiguadores columna liquida sincronizada (TLCD)



## II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.

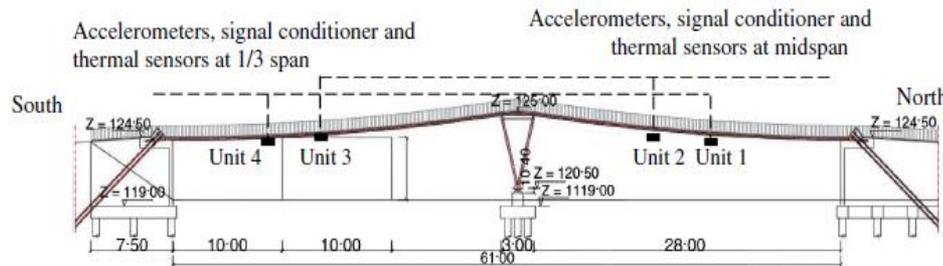
### Modificación del amortiguamiento estructural

Equipos de control pasivo: amortiguadores liquido sincronizada (TLD)

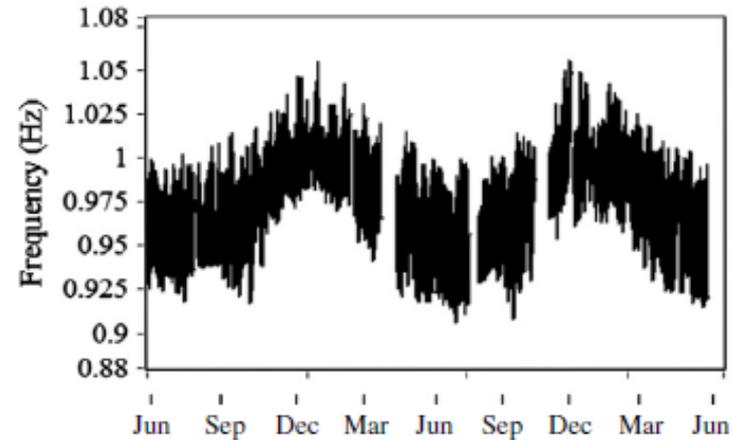


## II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.

### Variación temporal frecuencias naturales de la estructura



Pasarela peatonal campus FEUP (Oporto, Portugal)

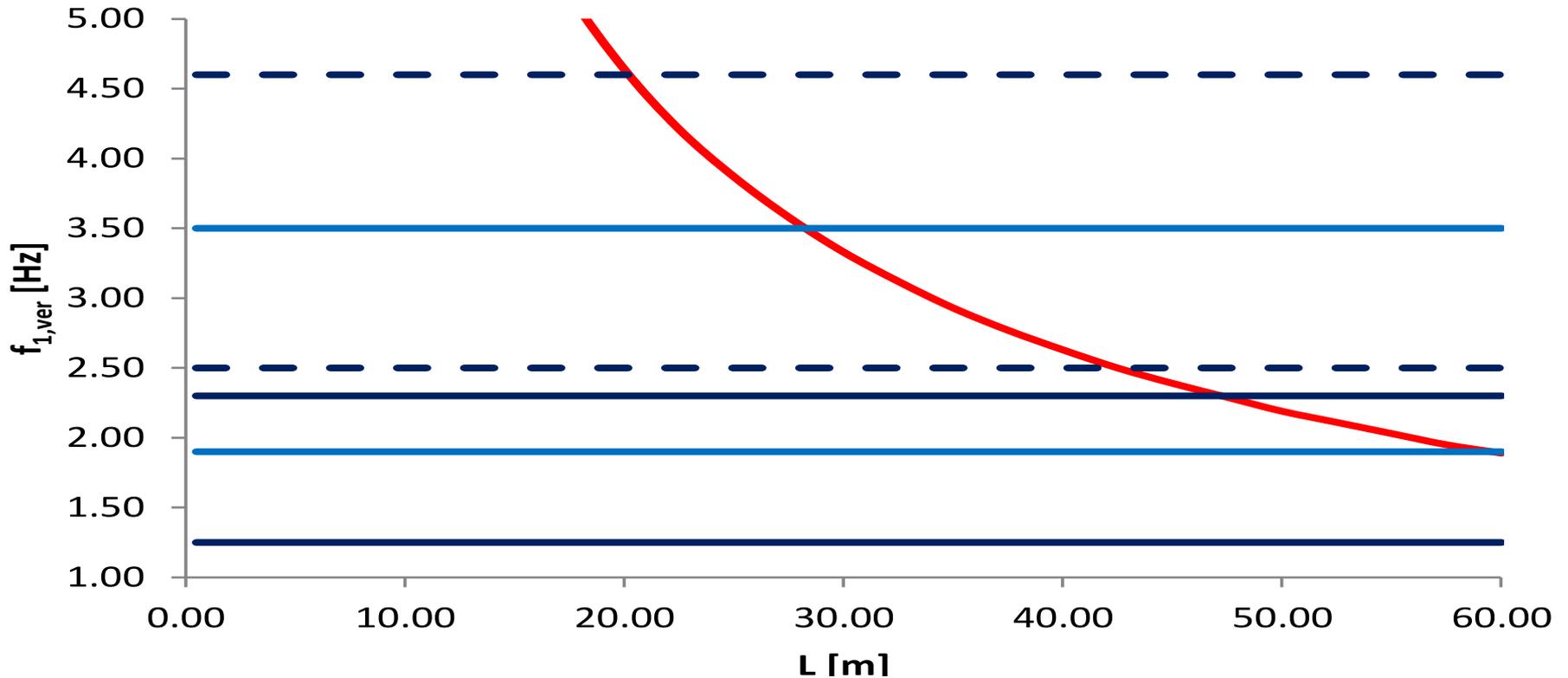


Variación 1ª frecuencia natural de la estructura

Structural Health Monitoring of a stress-ribbon footbridge (W. Hu)

## II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.

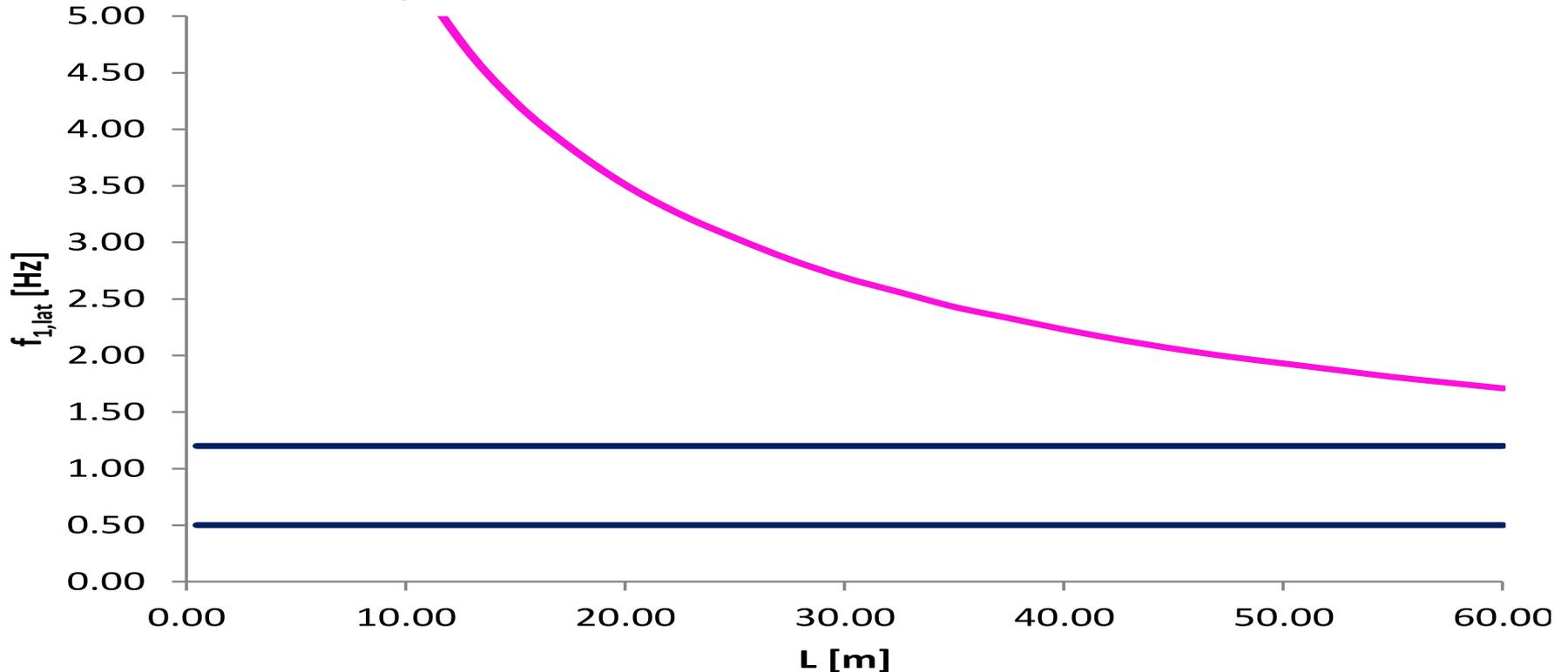
Evolución de la primera frecuencia natural vertical de la estructura con la luz



Fundamental Frequencies of Vibration of Footbridges in Portugal: From In Situ Measurements to Numerical Modelling (C.S. Oliveira)

## II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.

Evolución de la primera frecuencia natural lateral de la estructura con la luz



Fundamental Frequencies of Vibration of Footbridges in Portugal: From In Situ Measurements to Numerical Modelling (C.S. Oliveira)

## Tabla de contenidos

- I. Introducción.
- II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.
- III. Optimización de estructuras.**
- IV. Casos prácticos.
- V. Referencias.

## III. Optimización de estructuras.

### ¿Qué es la optimización de estructuras?

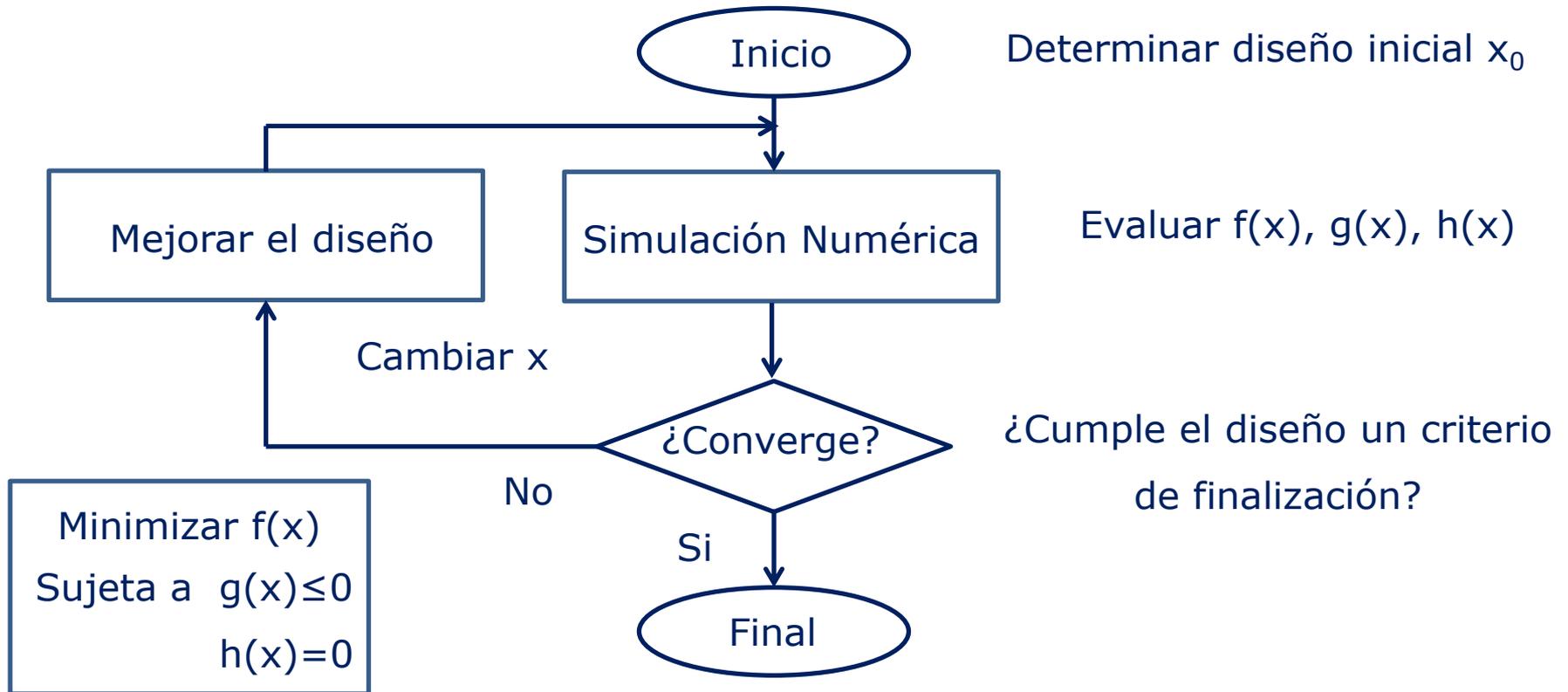
**Obtener el mejor diseño con los medios disponibles**

1. ¿Cuál es nuestro criterio para el mejor diseño? → Función Objetivo
2. ¿Cuáles son los medios disponibles? → Condicionantes
3. ¿Cómo podemos definir nuestra estructura? → Variables de Diseño

Minimizar $f(x)$	⇒	Función Objetivo
Sujeta a $g(x) \leq 0$ $h(x) = 0$	⇒	Condicionantes
$x$	⇒	Variables de Diseño

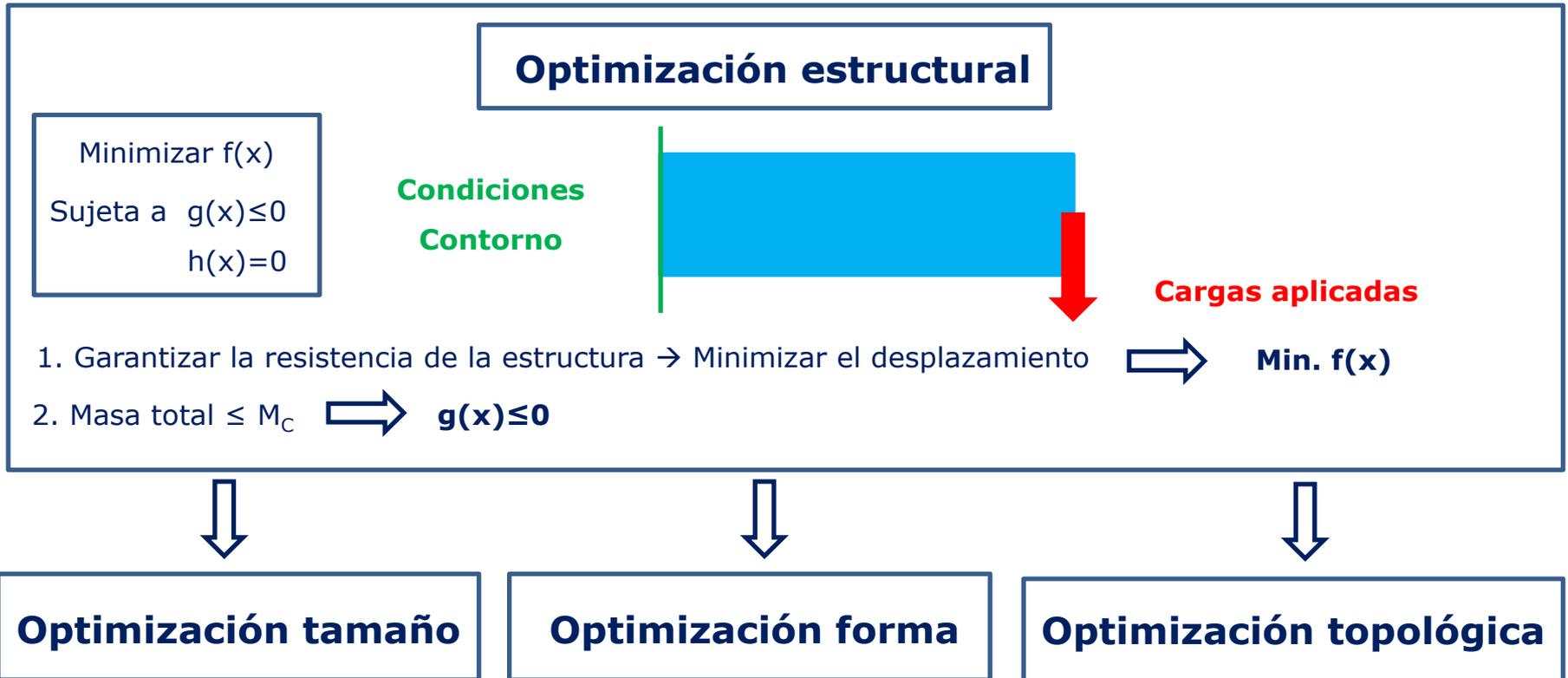
## III. Optimización de estructuras.

### Proceso de Optimización de Estructuras



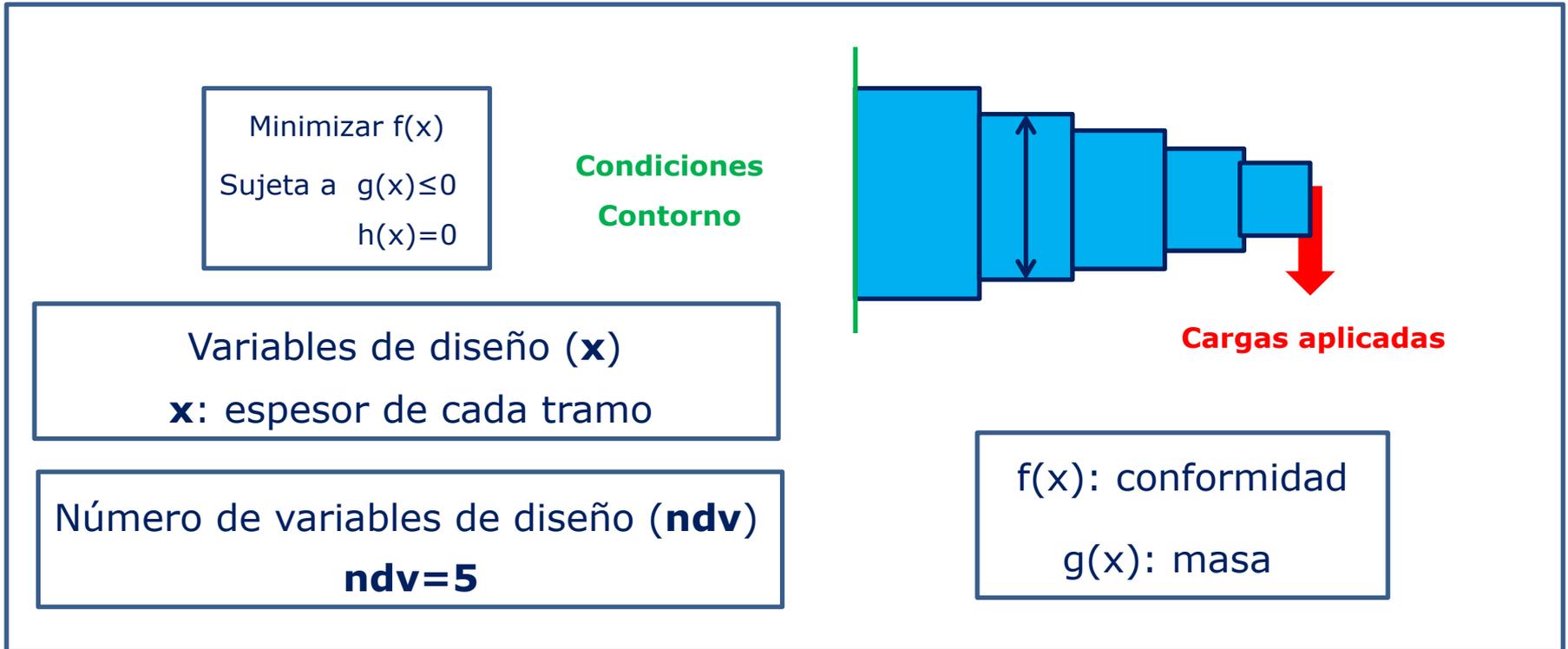
## III. Optimización de estructuras.

Seleccionar el mejor diseño estructural → Tipo de variable de diseño



## III. Optimización de estructuras.

### Optimización tamaño



## III. Optimización de estructuras.

### Optimización forma

Minimizar  $f(x)$   
Sujeta a  $g(x) \leq 0$   
 $h(x) = 0$

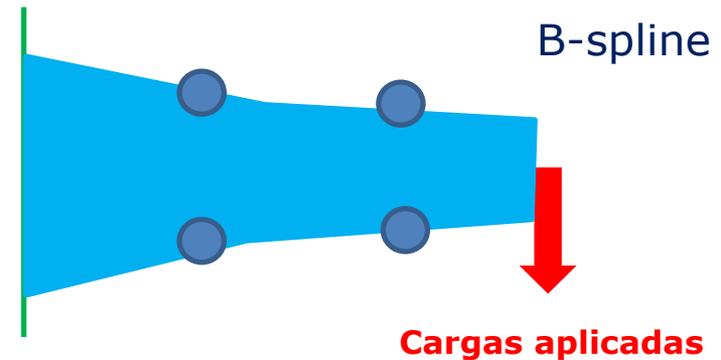
Condiciones  
Contorno

Variables de diseño ( $\mathbf{x}$ )

$\mathbf{x}$ : posición de cada punto del B-spline

Número de variables de diseño ( $\mathbf{ndv}$ )

**$\mathbf{ndv} = 8$**



$f(x)$ : conformidad

$g(x)$ : masa

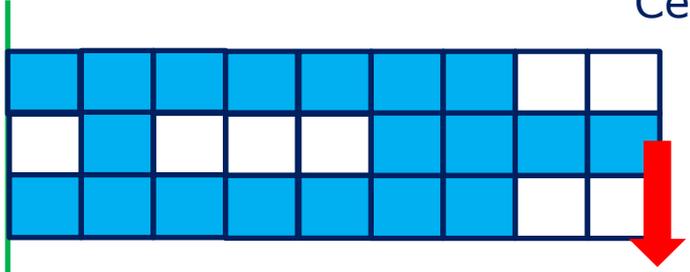
## III. Optimización de estructuras.

### Optimización topológica

Minimizar  $f(x)$   
Sujeta a  $g(x) \leq 0$   
 $h(x) = 0$

**Condiciones**  
**Contorno**

Celdas



**Cargas aplicadas**

Variables de diseño ( $\mathbf{x}$ )  
 $\mathbf{x}$ : densidad de cada celda

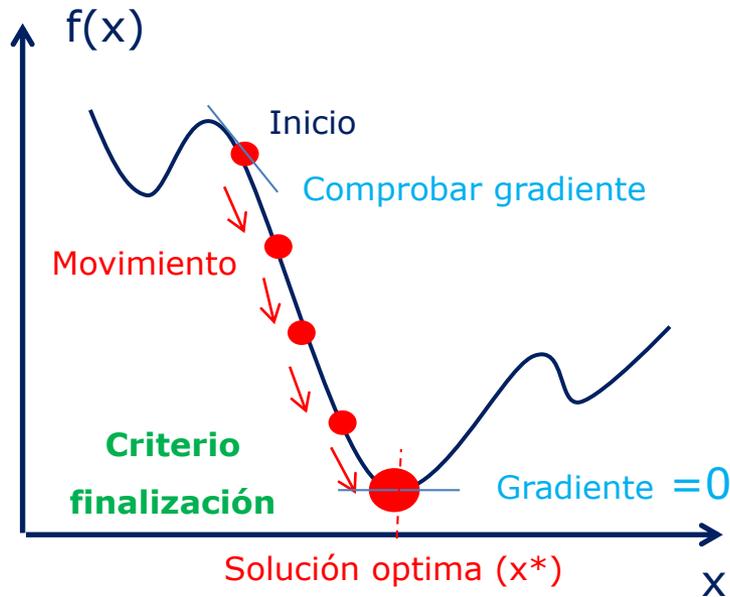
Número de variables de diseño (**ndv**)  
**ndv=27**

$f(x)$ : conformidad  
 $g(x)$ : masa

## III. Optimización de estructuras.

### Métodos de Optimización

#### Métodos basados en el gradiente



#### Métodos Heurísticos

- Son reglas prácticas que permiten encontrar una solución óptima a un problema.
- Se usan en problemas de optimización muy complejos.
- Permiten obtener mínimos globales.
- Incorporan aleatoriedad.
- Algoritmos genéticos (GA).
- Algoritmos genéticos multi-objetivo (MGA).

## III. Optimización de estructuras.

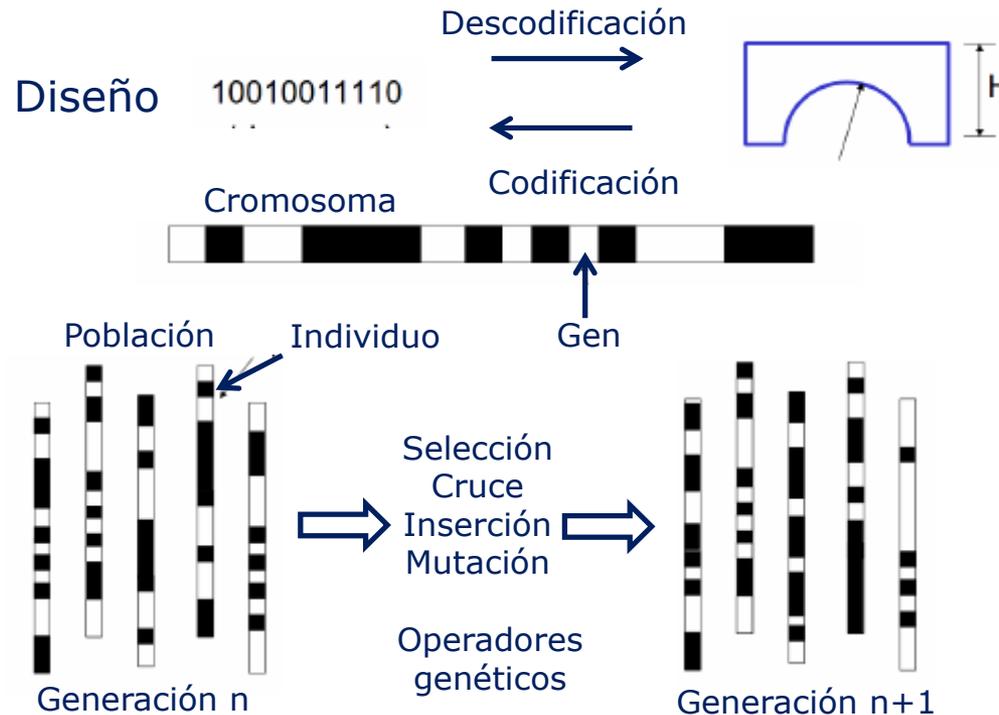
### ¿Óptimo local o global?



## III. Optimización de estructuras.

### Algoritmos genéticos (GA)

Principio de Charles Darwin → Selección natural



## III. Optimización de estructuras.

### Algoritmos genéticos multi-objetivo (MGA)

Minimización de varias funciones objetivo

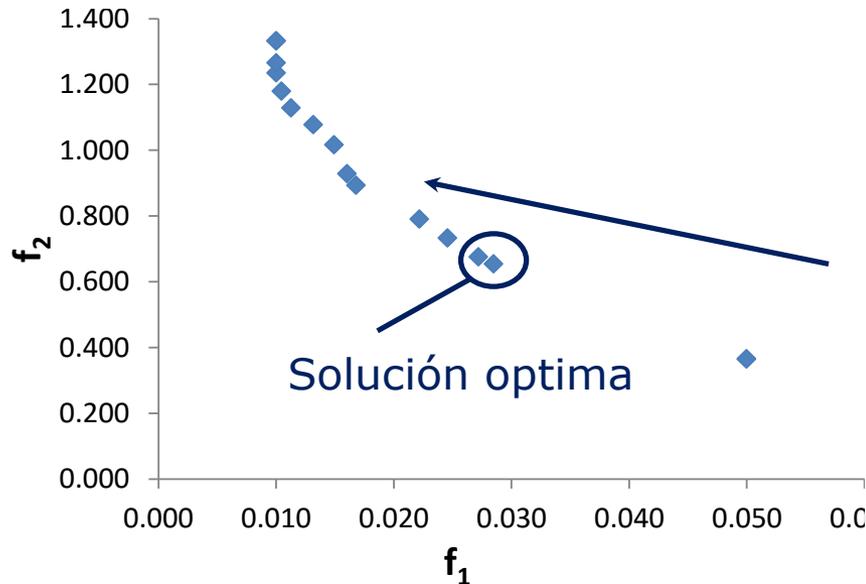


Conjunto soluciones optimas



Solución optima

Sentido físico



n variables diseño  $\mathbf{x} = \{x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n\}^T$   
k funciones objetivo  $\mathbf{f} = \{f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_k\}^T$

## Tabla de contenidos

- I. Introducción.
- II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.
- III. Optimización de estructuras.
- IV. Casos prácticos.**
- V. Referencias.

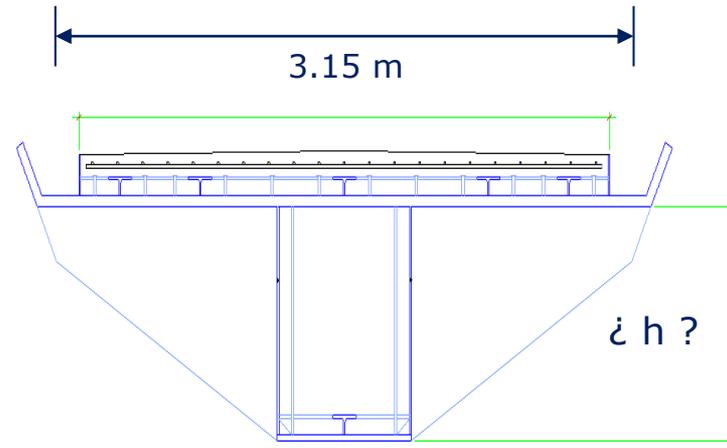
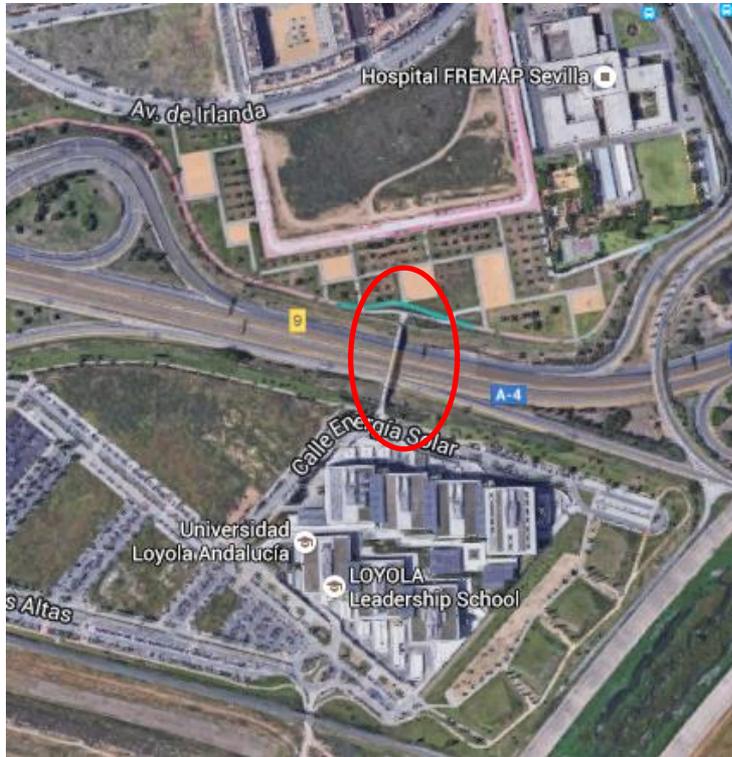
## IV. Casos prácticos.

### Pasarela Palmas Altas (Sevilla, España)



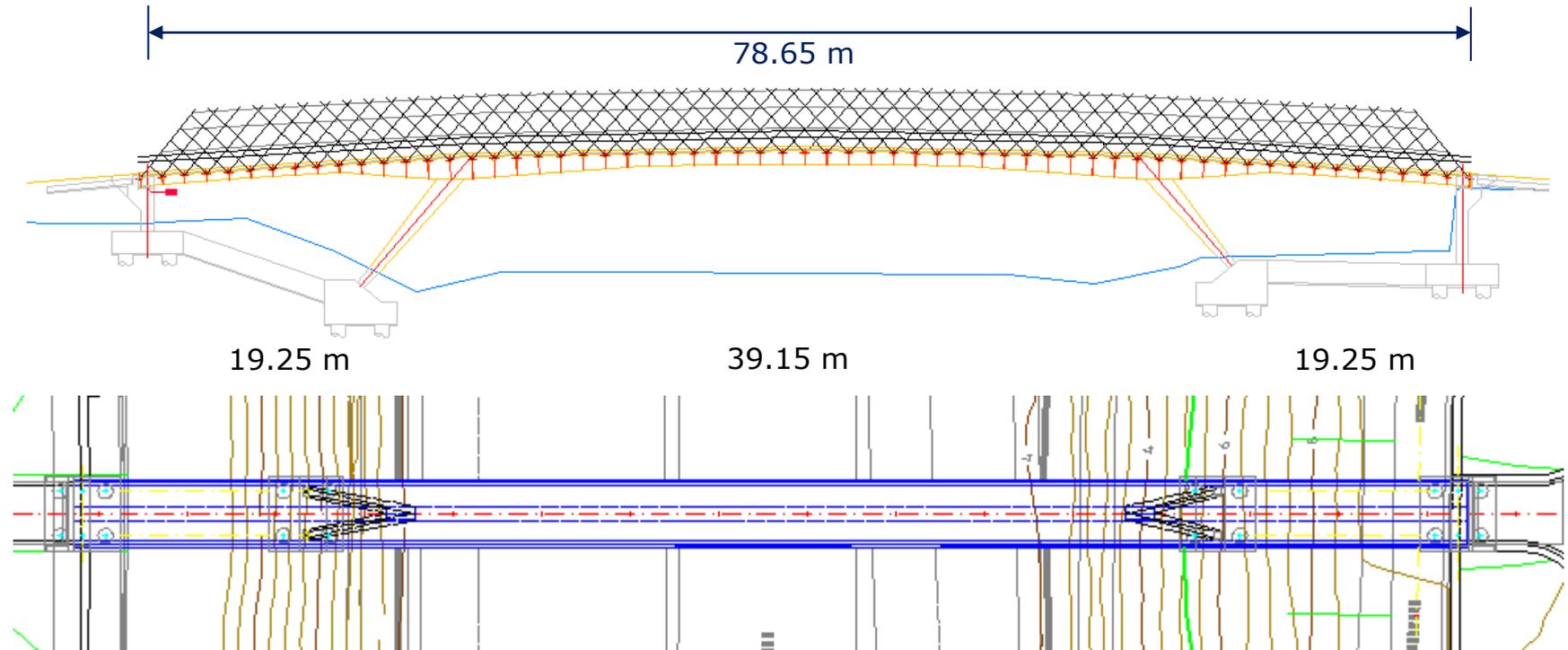
## IV. Casos prácticos.

### Pasarela Palmas Altas (Sevilla, España)



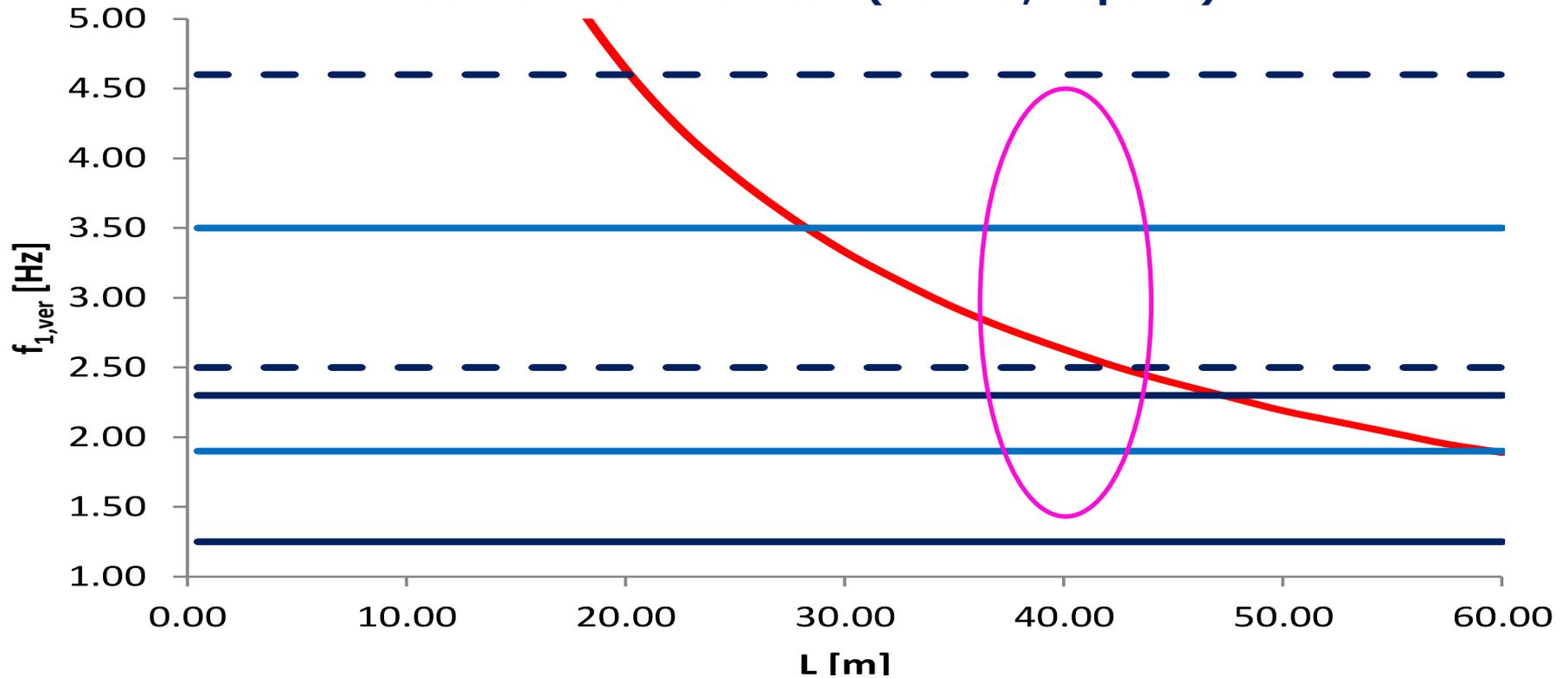
## IV. Casos prácticos.

### Pasarela Palmas Altas (Sevilla, España)



## IV. Casos prácticos.

### Pasarela Palmas Altas (Sevilla, España)



## IV. Casos prácticos.

### Pasarela Palmas Altas (Sevilla, España)

Carga peatonal equivalente

$$p_{pas}(t) = 280 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \cdot n'_p \cdot \psi$$

$$p_{car}(t) = 1250 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \cdot n'_p \cdot \psi$$

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C} \cdot \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K} \cdot \mathbf{u}(t) = \mathbf{p}(t)$$

Incertidumbre 20 %

SHM

Nivel	Grado	Aceleración vertical
CL1	Máximo	<0.50 m/s <sup>2</sup>
CL2	Medio	0.50-1.00 m/s <sup>2</sup>
CL3	Mínimo	1.00-2.50 m/s <sup>2</sup>
CL4	Malestar	>2.50 m/s <sup>2</sup>

Clase de confort

Criterio de Confort

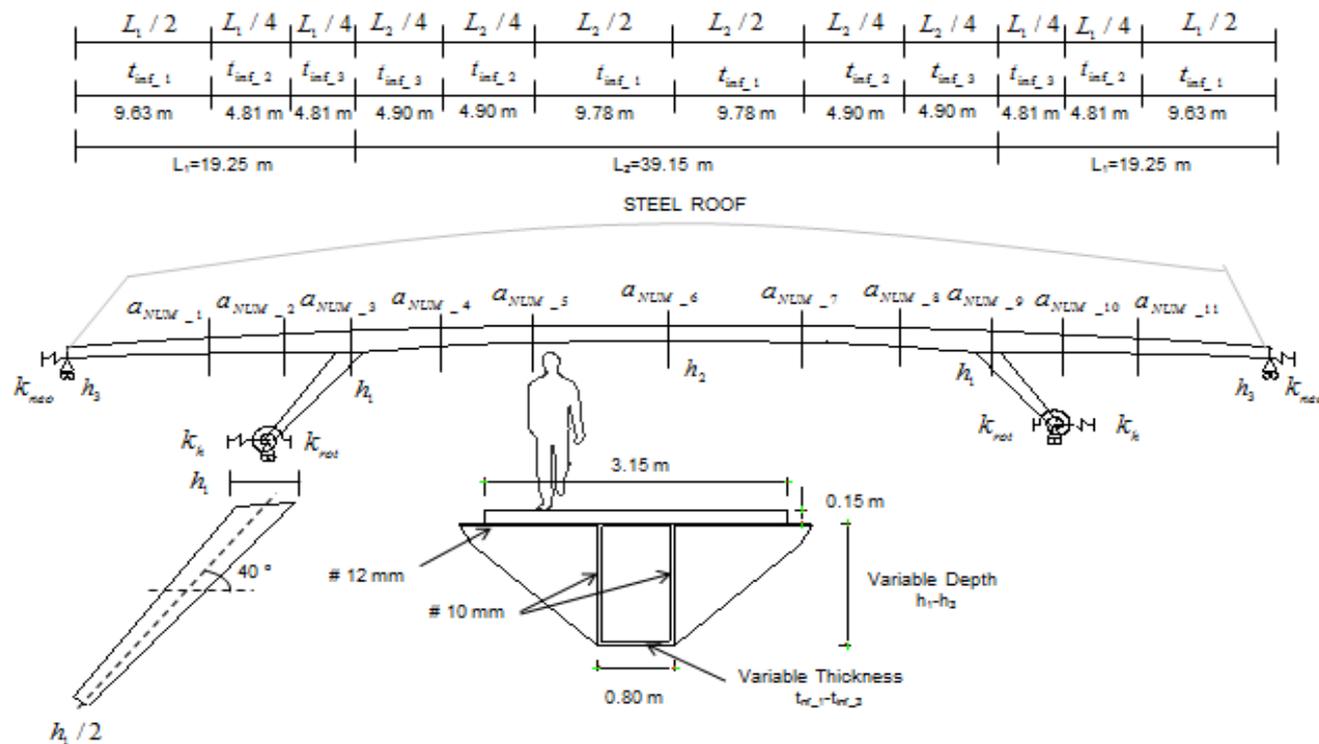
$$\ddot{u}_{cal} < \ddot{u}_{adm}$$



## Estrategias de diseño para garantizar un adecuado nivel de confort en pasarelas peatonales

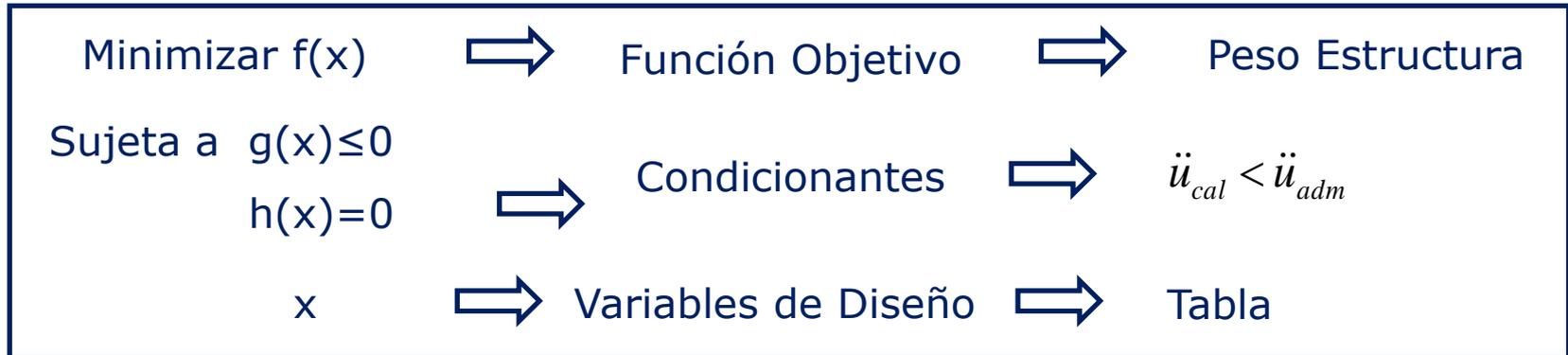
## IV. Casos prácticos.

### Pasarela Palmas Altas (Sevilla, España)



## IV. Casos prácticos.

### Pasarela Palmas Altas (Sevilla, España)



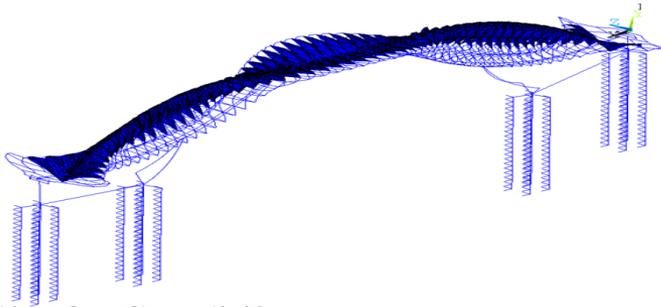
### Parámetros de diseño

	Descripción	V.D.	Mínimo	Diseño	Máximo
1	Canto sobre pilas	$h_1$ [m]	0.50	<b>1.30</b>	1.50
2	Canto medio vano	$h_2$ [m]	0.50	<b>0.90</b>	1.50
3	Canto sobre estribo	$h_3$ [m]	0.50	<b>0.60</b>	1.50
4	Espesor ala inferior 1	$t_{inf\_1}$ [mm]	12.00	<b>25.00</b>	40.00
5	Espesor ala inferior 2	$t_{inf\_2}$ [mm]	12.00	<b>30.00</b>	40.00
6	Espesor ala inferior 3	$t_{inf\_3}$ [mm]	12.00	<b>35.00</b>	40.00

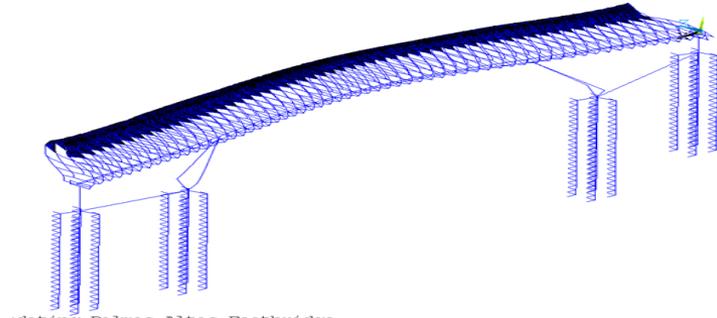
## IV. Casos prácticos.

### Pasarela Palmas Altas (Sevilla, España)

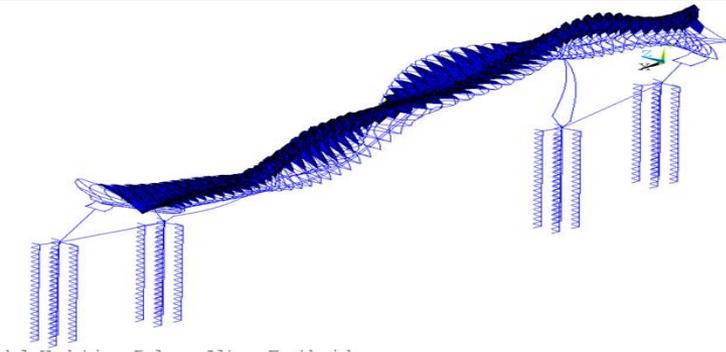
1º Modo vibración vertical  $f=2.875$  Hz



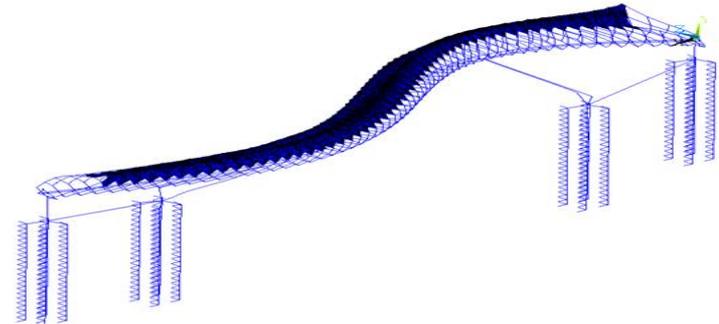
1º Modo vibración lateral  $f=2.175$  Hz



2º Modo vibración vertical  $f=3.754$  Hz



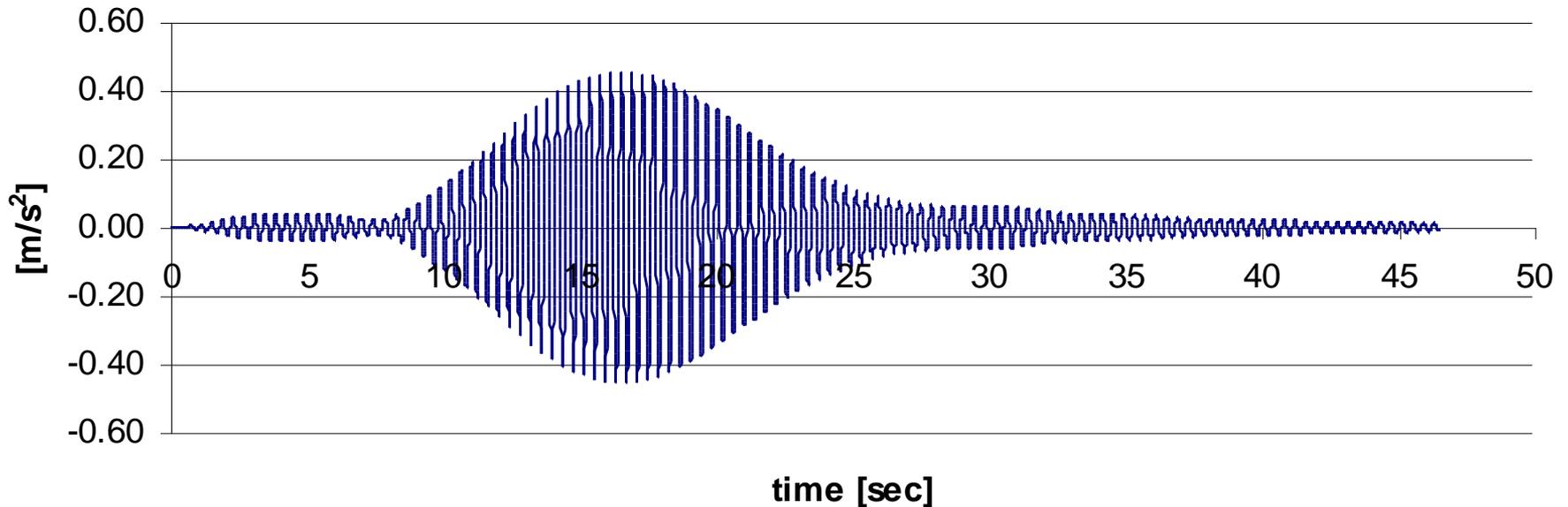
2º Modo vibración lateral  $f=5.328$  Hz



## IV. Casos prácticos.

### Pasarela Palmas Altas (Sevilla, España)

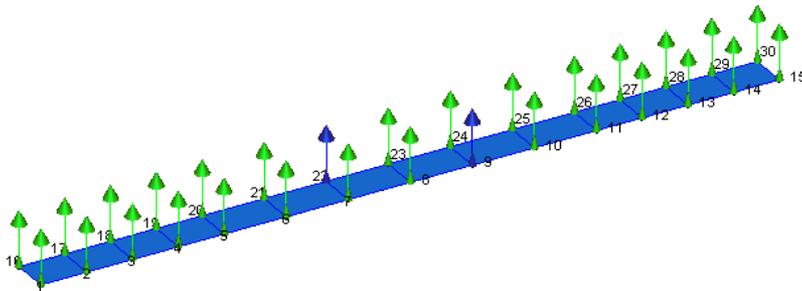
Máxima aceleración vertical numérica 1 peatón corriendo a  $f=2.875$  Hz



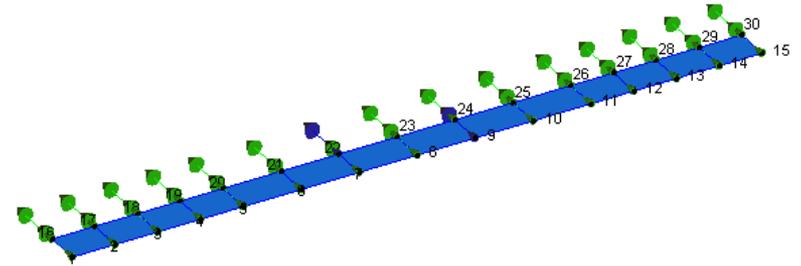
## IV. Casos prácticos.

### Pasarela Palmas Altas (Sevilla, España)

#### Ensayo ambiental



Esquema ensayo vibración ambiental vertical



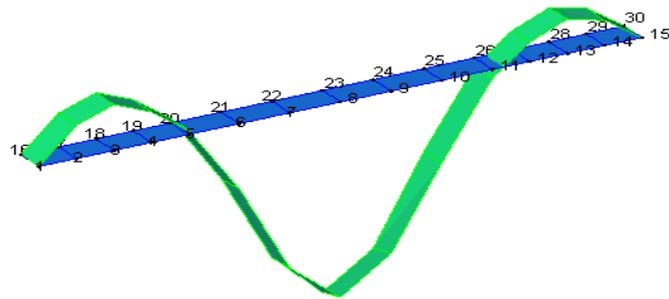
Esquema ensayo vibración ambiental lateral

- 4 Acelerómetros uniaxiales.
- 14 Vertical/Lateral conjuntos de medidas
- ● 2 Acelerómetros de referencia
- Duración de cada medida 900 seg.
- Frecuencia de muestreo 100 Hz.

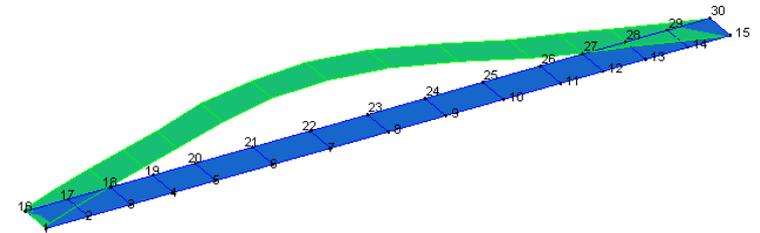
## IV. Casos prácticos.

### Pasarela Palmas Altas (Sevilla, España) Modos de vibración experimentales (E.F.D.D.)

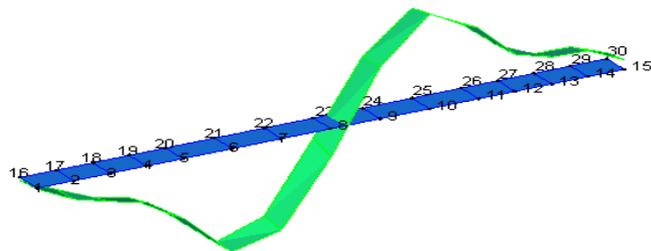
1º Modo de vibración vertical  $f=3.026$  Hz



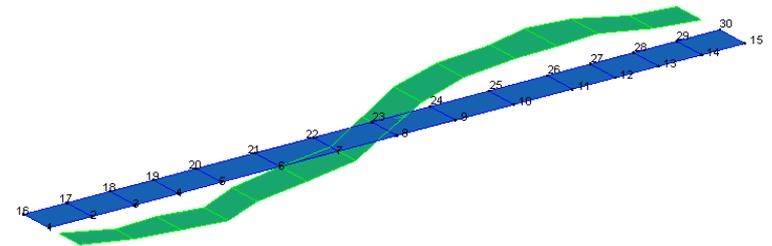
1º Modo vibración lateral  $f=2.372$  Hz



2º Modo de vibración vertical  $f=3.844$  Hz



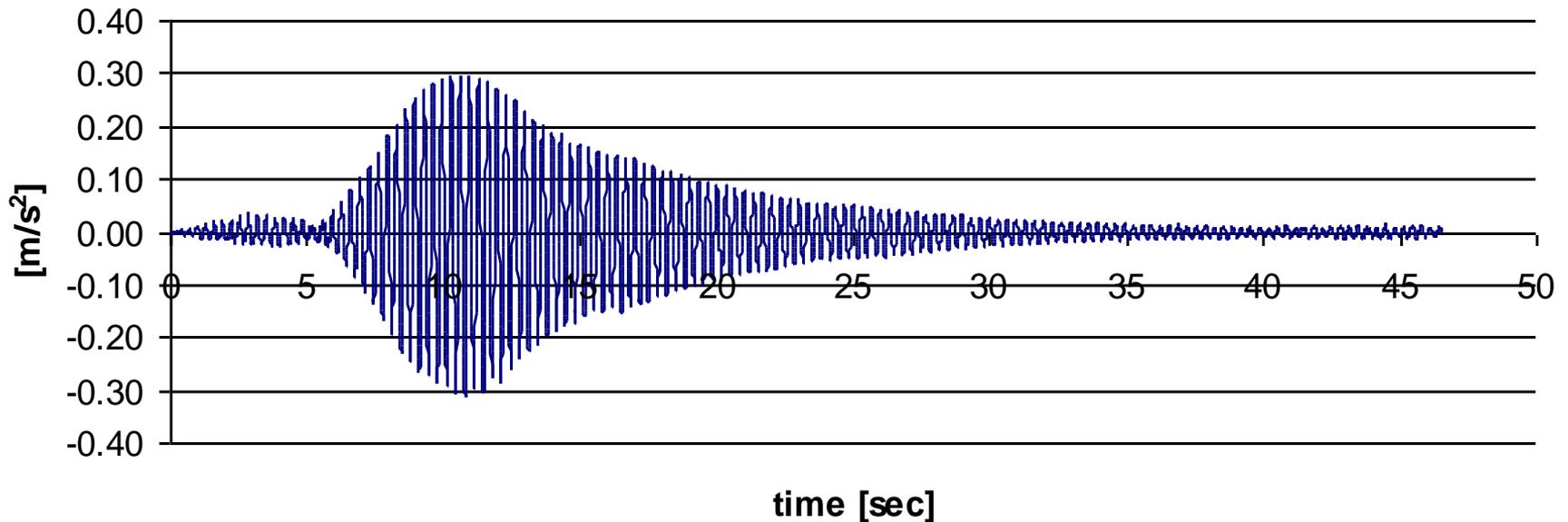
2º Modo vibración lateral  $f=5.508$  Hz



## IV. Casos prácticos.

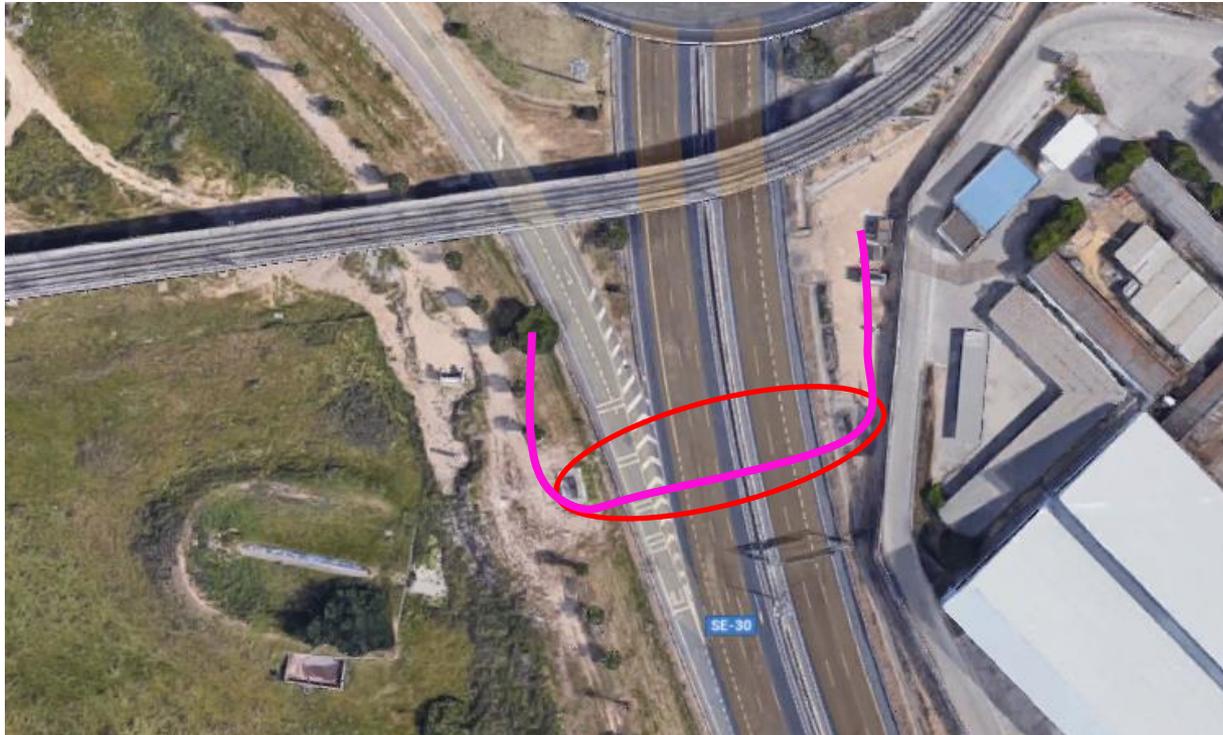
### Pasarela Palmas Altas (Sevilla, España)

Máxima aceleración vertical experimental 1 peatón corriendo a  $f=3.00$  Hz



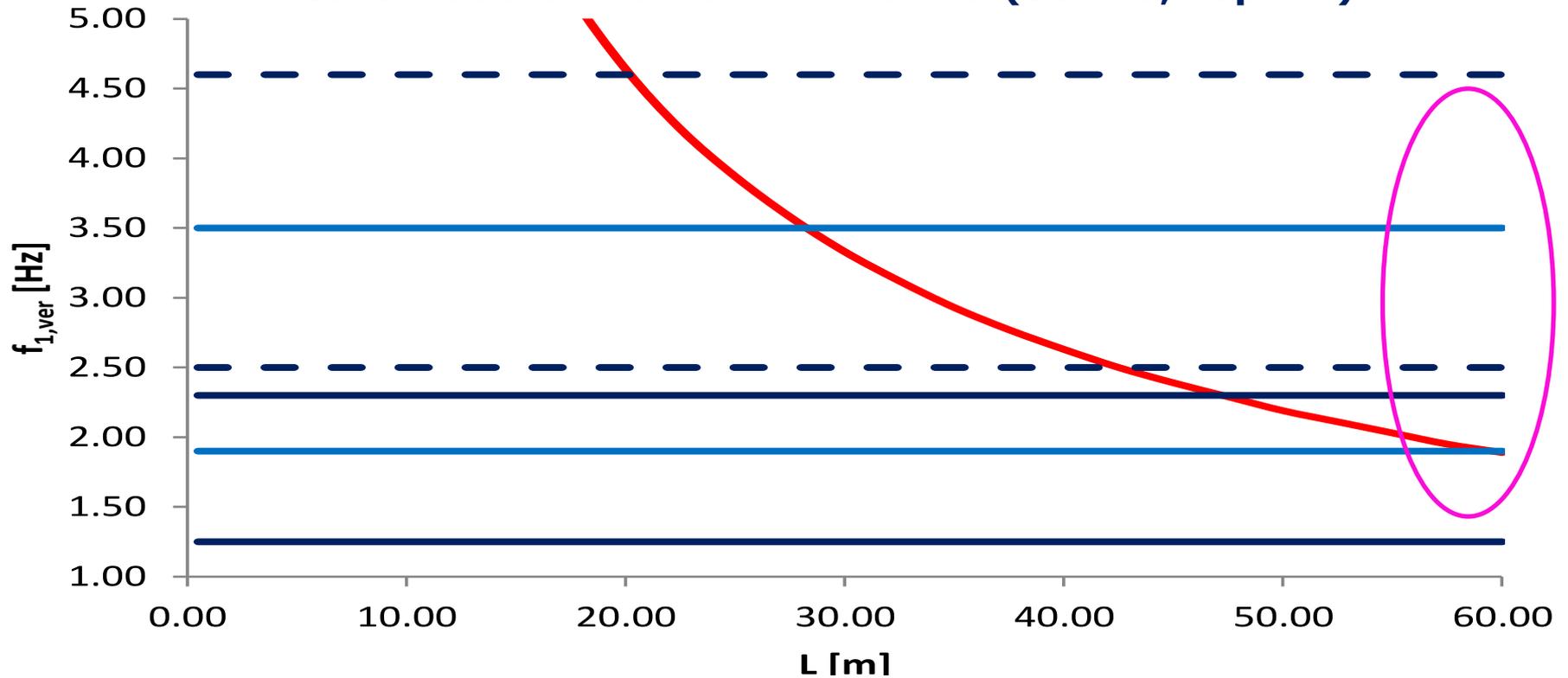
## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)



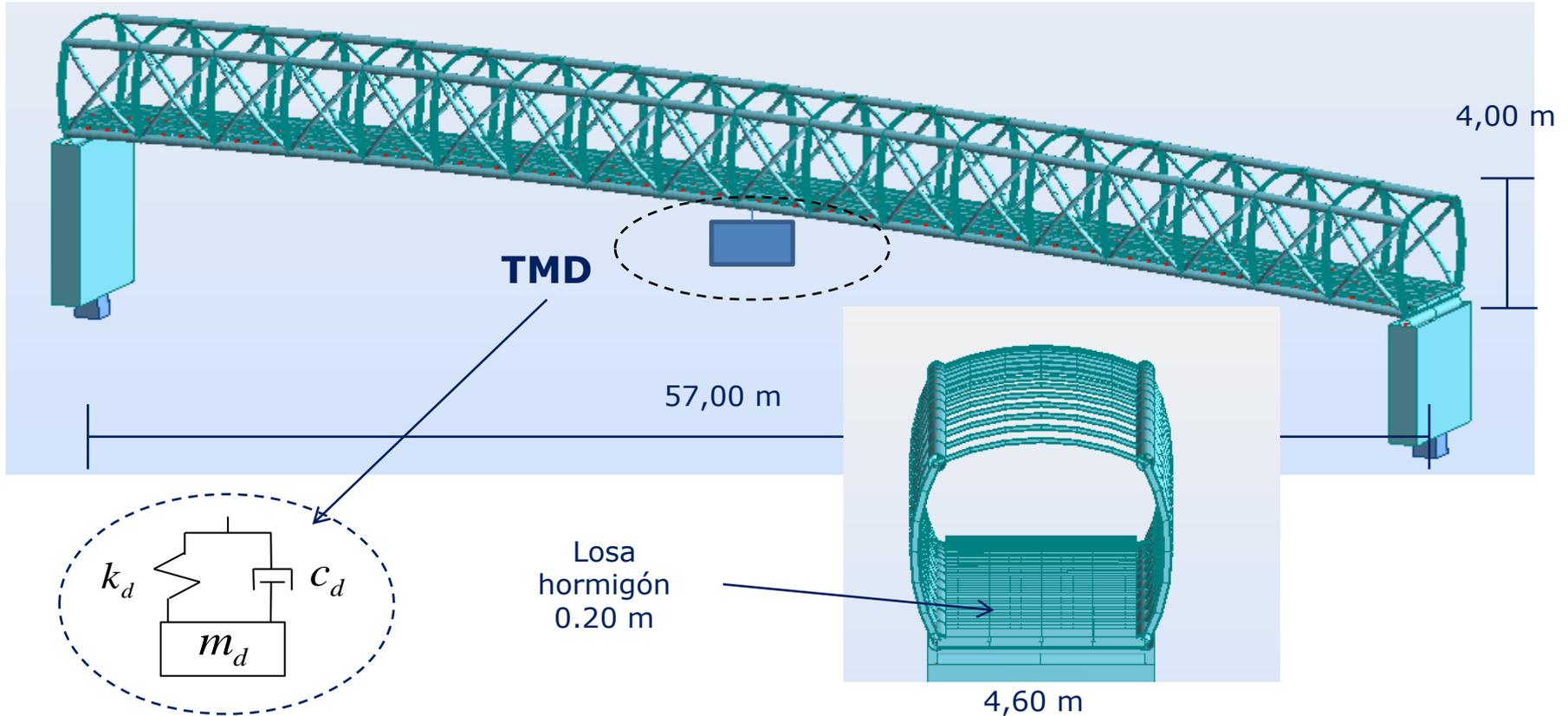
## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)



## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)



## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)

- Amortiguadores de masa sincronizada (TMD) → Sistema control pasivo.
- Componentes mecánicos:

$m_d$	masa TMD
$c_d$	amortiguamiento TMD
$k_d$	rigidez TMD



- Pasarela esbelta → TMD → Control de vibraciones.
- Normativa actual → Propuesta de Den (**DH**).

## IV. Casos prácticos.

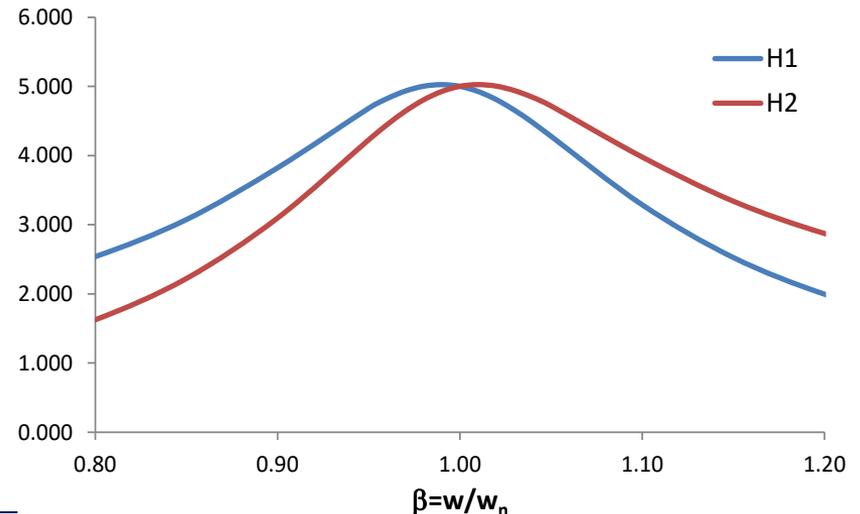
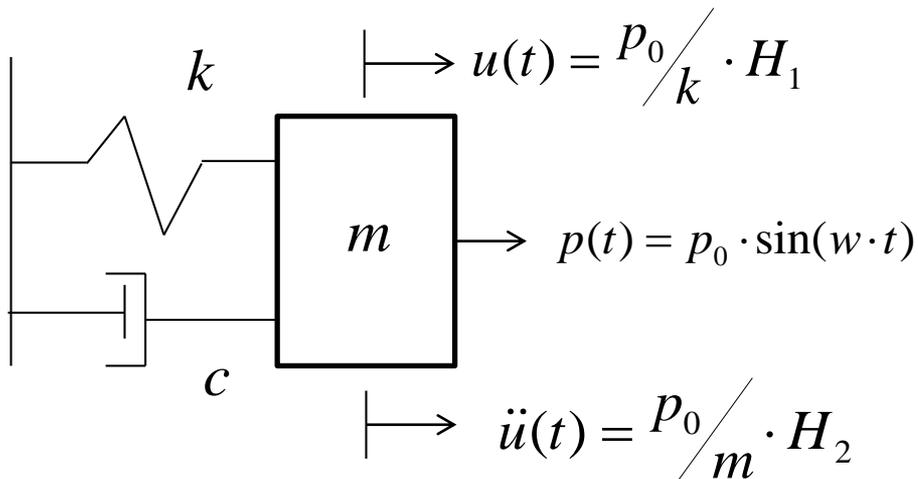
### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)

- Limitaciones Den Hartog's (DH):

SDOF no amortiguado

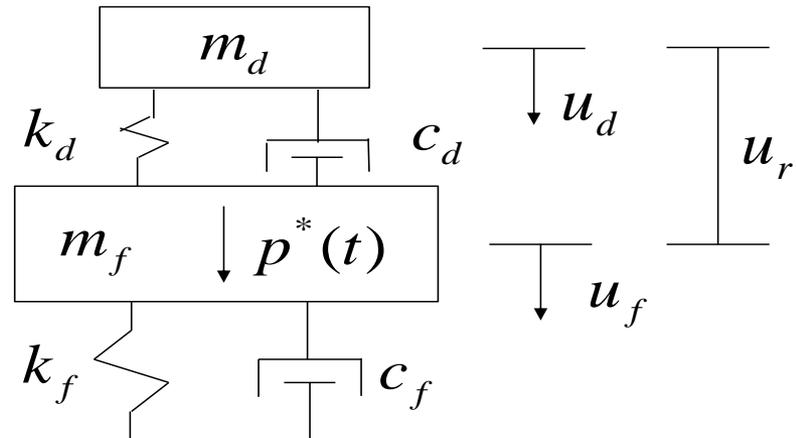
Minimización de la respuesta en desplazamientos

¿ Incertidumbres de la estructura ?



## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)



$$m_f \cdot \ddot{u}_f + c_f \cdot \dot{u}_f + c_d \cdot (\dot{u}_f - \dot{u}_d) + k_f \cdot u_f + k_d \cdot (u_f - u_d) = p^*(t)$$

$$m_d \cdot \ddot{u}_d + c_d \cdot (\dot{u}_d - \dot{u}_f) + k_d \cdot (u_d - u_f) = 0$$

## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)

$$p^*(t) = p(t) \cdot \phi(x) = G \cdot \cos(w_f \cdot t) \cdot n' \cdot \psi \cdot \phi(x)$$

$$n' = \begin{cases} 10.8 \cdot \sqrt{\zeta_f \cdot n} & \text{if } d < 1.00 \quad P / m^2 \\ 1.85 \cdot \sqrt{n} & \text{if } d \geq 1.00 \quad P / m^2 \end{cases}$$

$$\psi = \begin{cases} 0 & \text{if } f_f \leq 1.25 \quad \text{Hz} \\ 2.22 \cdot (f_f - 1.25) & \text{if } 1.25 < f_f < 1.70 \quad \text{Hz} \\ 1 & \text{if } 1.70 \leq f_f \leq 2.10 \quad \text{Hz} \\ 1 - 5 \cdot (f_f - 2.10) & \text{if } 2.10 < f_f < 2.30 \quad \text{Hz} \\ 0 & \text{if } f_f \geq 2.30 \quad \text{Hz} \end{cases}$$

## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)

Metodología Clásica de Den Hartog (**DH**)

- (i) Elección de la masa del TMD,  $m_d$ , basada en el ratio de masa  $\mu = m_d/m_f$   
(ii) Calculo del óptimo de los ratios del TMD.

$$\mu = m_d/m_f$$

↓

$a_{\max} < a_{adm}$

$$\delta_{opt} = 1/(1 + \mu) = f_d/f_f$$

$$\zeta_{opt} = \sqrt{3\mu/(8 \cdot (1 + \mu)^3)}$$

- (iii) Calculo de las constantes del TMD.

$$k_d = m_d \cdot (2 \cdot \pi \cdot \delta_{opt} \cdot f_f)^2$$

$$c_d = 2 \cdot m_d \cdot 2 \cdot \pi \cdot \delta_{opt} \cdot f_f \cdot \zeta_{opt}$$

## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)

Algoritmos genéticos multi-objetivo (MGA)

Minimización de varias funciones objetivo

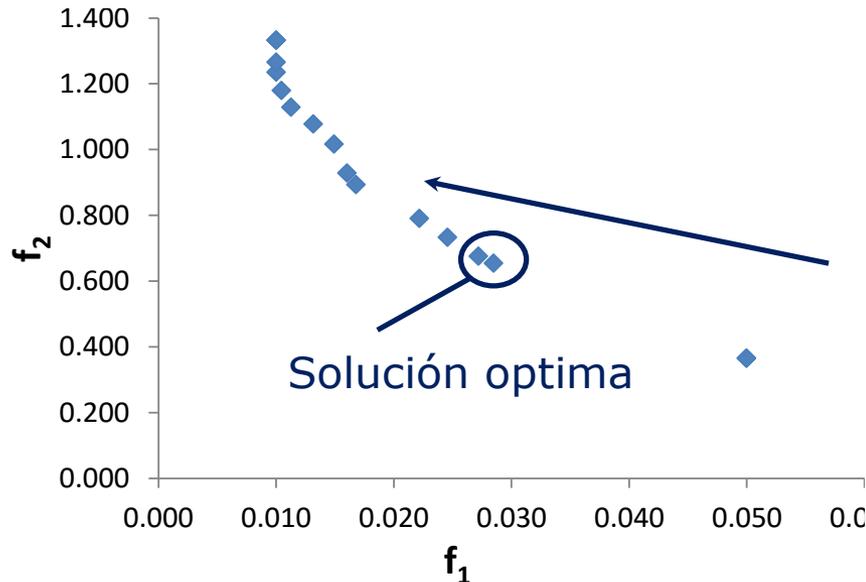


Conjunto soluciones optimas



Solución optima

Sentido físico

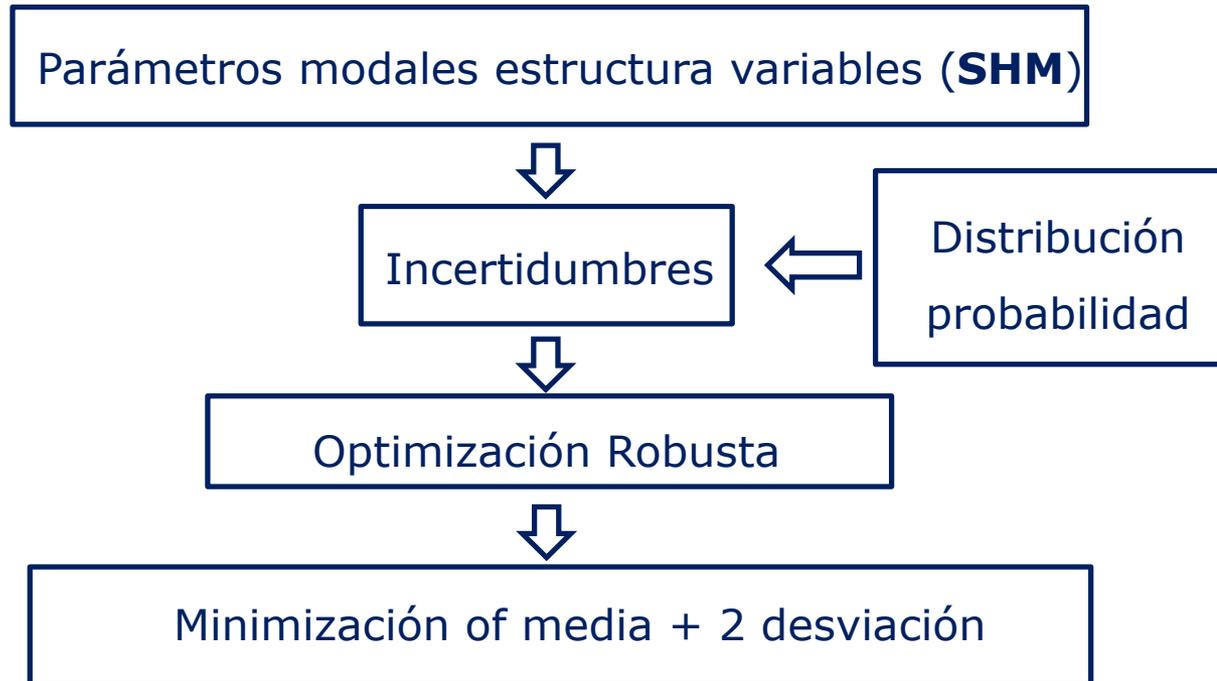


$$\begin{aligned} \text{n variables diseño } \mathbf{x} &= \{x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_n\}^T \\ \text{k funciones objetivo } \mathbf{f} &= \{f_1 \quad f_2 \quad \dots \quad f_k\}^T \end{aligned}$$

## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)

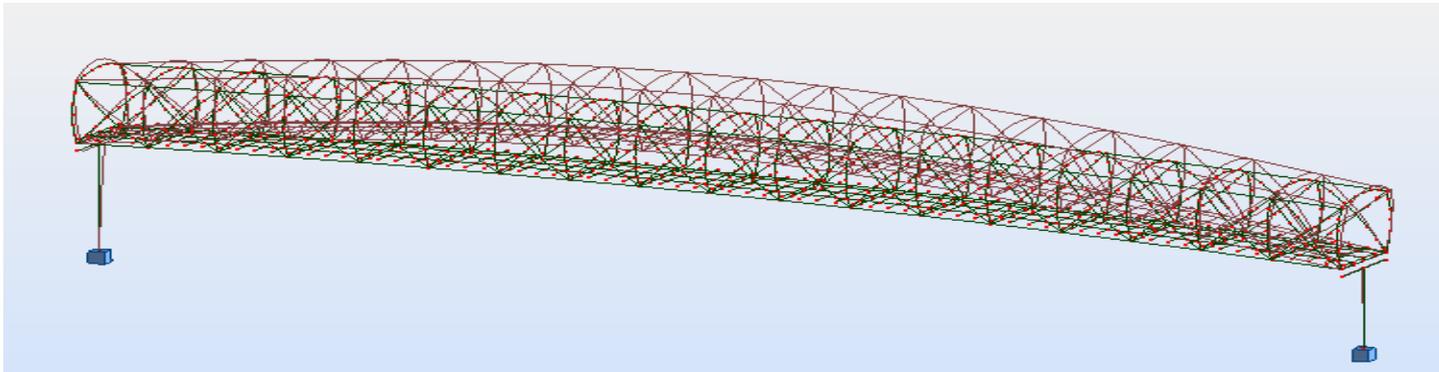
Diseño robusto del amortiguador TMD



## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)

Análisis numérico modal de la estructura



L.C.	$d$ [P/m <sup>2</sup> ]	$a_{adm}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$n$ [P]	$m_f$ [kg]	$f_f$ [Hz]	$a_{max}$ [m/s <sup>2</sup> ]
I	<0.20	0.50	15	34706	2.14	1.05
II	0.20	0.50	19	35984	2.10	1.16
III	0.50	0.50	48	37710	2.05	1.74
IV	0.80	0.50	76	39500	2.00	2.08
V	1.00	0.50	96	40750	1.97	4.96

## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)

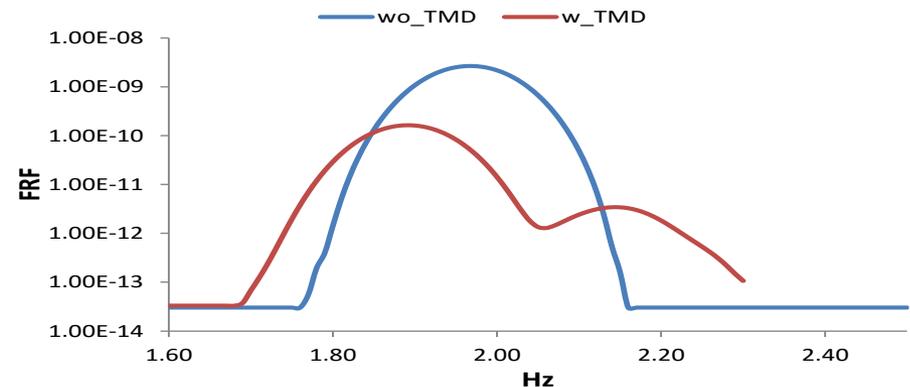
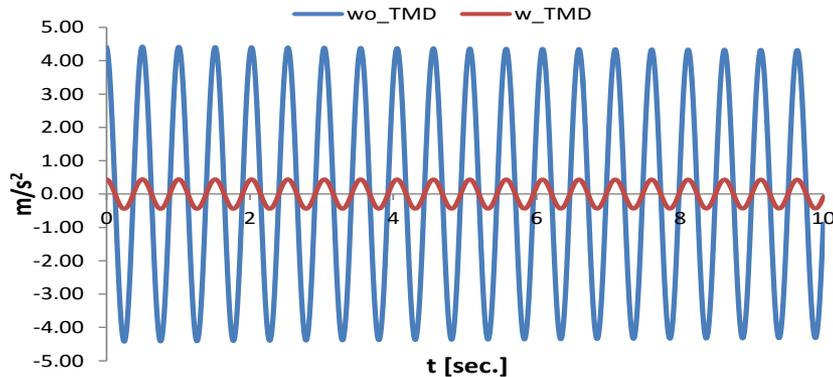
Diseño determinista del TMD

- TMD → máxima deflexión modal.

- Dos métodos deterministas:

Propuesta clásica de Den Hartog (**DH**)

Propuesta usando Algoritmos genéticos multi-objetivo (**MGA**)



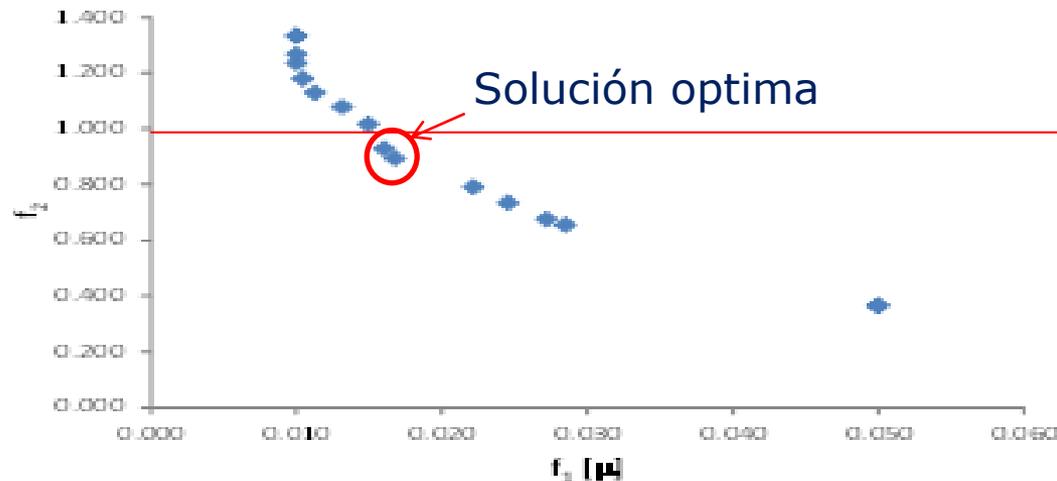
## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)

Diseño determinista del TMD

Optimización usando algoritmos genéticos multi-objetivo (**MGA**)

$$\mathbf{f} = \left\{ \mu \quad \max(a_{\max}^I / a_{adm} \quad \dots \quad a_{\max}^V / a_{adm}) \right\}$$



Domino de búsqueda

$$\mu \in [0.01 - 0.10]$$

$$\delta_{opt} \in [0.85 - 1.15]$$

$$\zeta_{opt} \in [0.05 - 0.20]$$

## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)

Diseño determinista del TMD

Method	$\mu$ [%]	$\delta_{opt}$	$\zeta_{opt}$ [%]	$m_d$ [kg]	$k_d$ [N/m]	$c_d$ [Ns/m]	$a_{max}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{adm}$ [m/s <sup>2</sup> ]
DH	3.49	0.96	10.87	1211	204465	3420	0.49	0.50
MGA	1.60	0.95	5.61	555.30	91780	802	0.47	0.50

La implementación de los MGA permite una reducción de los parámetros:

masa TMD 54.14 %

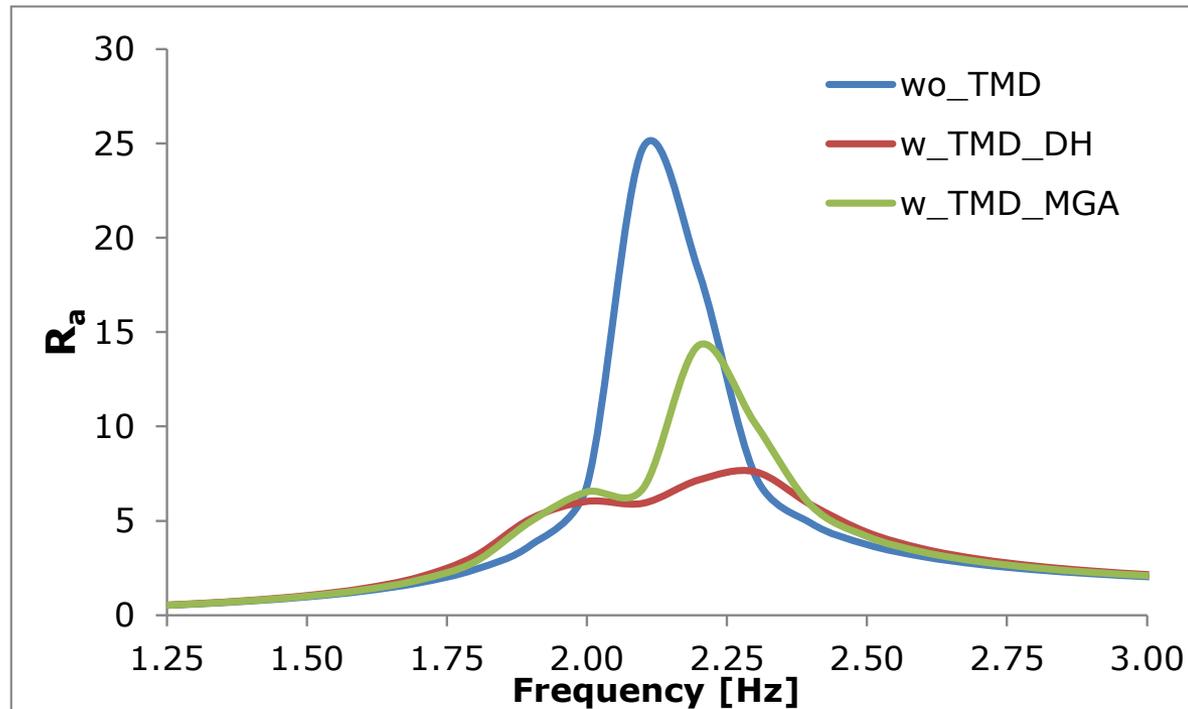
rigidez TMD 55.11 %

ratio de amortiguamiento TMD 76.55 %

## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)

Diseño determinista del TMD

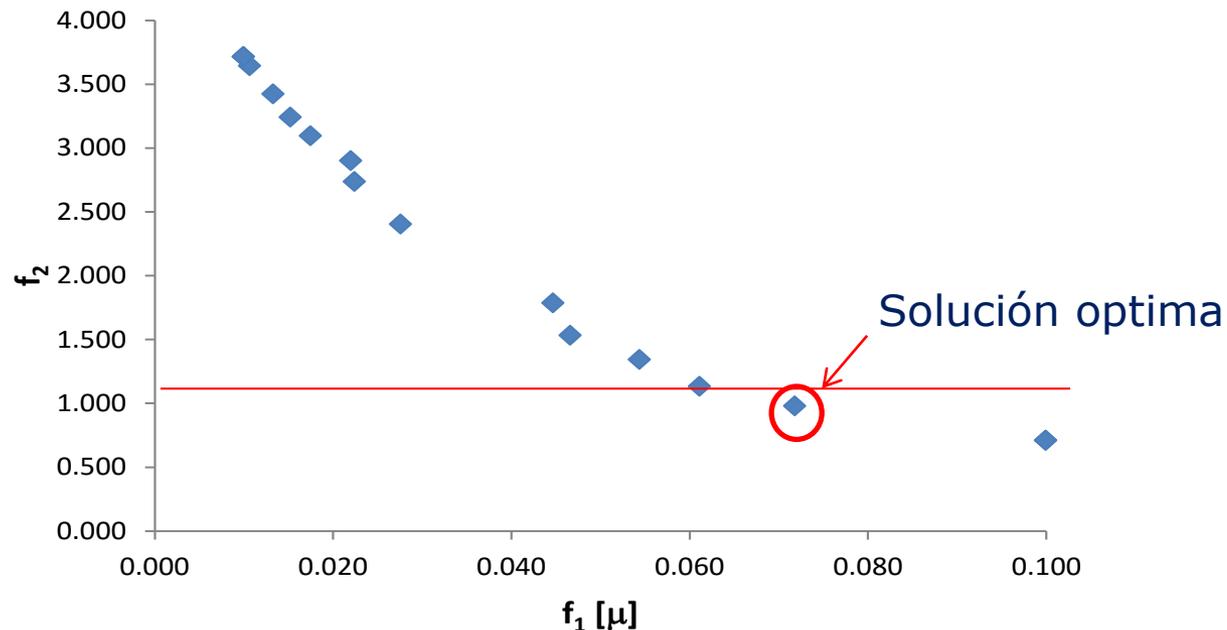


## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)

#### Diseño Robusto del TMD

$$\mathbf{f} = \left\{ \mu \quad E(\max(a_{\max}^I/a_{adm} \quad \dots \quad a_{\max}^V/a_{adm})) + 2 \cdot \sigma(\max(a_{\max}^I/a_{adm} \quad \dots \quad a_{\max}^V/a_{adm})) \right\}$$



## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)

#### Diseño Robusto del TMD

Method	$\mu$ [%]	$\delta_{opt}$	$\zeta_{opt}$ [%]	$m_d$ [kg]	$k_d$ [N/m]	$c_d$ [Ns/m]	$a_{max}$ [m/s <sup>2</sup> ]	$a_{adm}$ [m/s <sup>2</sup> ]
DH	9.60	0.91	16.54	3332	501466	13518	0.48	0.50
MGA	7.20	0.99	14.90	2498	442786	9912	0.49	0.50

La implementación de los MGA permite una reducción de los parámetros:

masa TMD 25.00 %

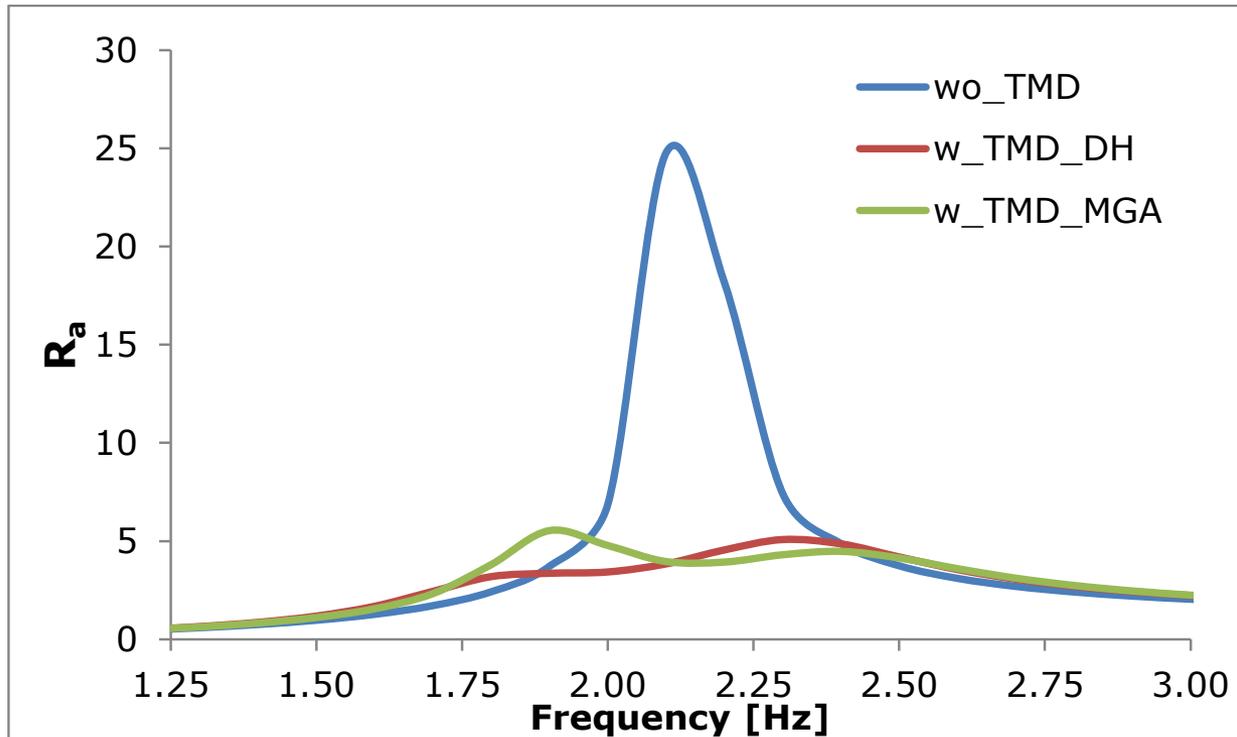
rigidez TMD 11.70 %

ratio de amortiguamiento TMD 26.65 %

## IV. Casos prácticos.

### Pasarela sobre la SE-30 en Tablada (Sevilla, España)

#### Diseño Robusto del TMD



## IV. Casos prácticos.

### Pasarela junto Puente Birrete en Paradas (Sevilla, España)



## IV. Casos prácticos.

### Pasarela junto Puente Birrete en Paradas (Sevilla, España)

Ratio de amortiguamiento para vibraciones en pasarelas

Tipo Construcción	Cargas de Servicio		Grandes Vibraciones
	$\zeta_{\min}$ [%]	$\zeta_{\text{med}}$ [%]	$\zeta_{\max}$ [%]
Hormigón armado	0.80	1.30	5.00
Hormigón pretensado	0.50	1.00	2.00
Mixtas	0.30	0.60	2.00
Acero soldado	0.20	0.40	2.00
Acero atornillado	0.20	0.40	4.00
Madera	1.00	1.50	4.00
Banda tesa	0.70	1.00	2.00
Elastómeros	----	----	7.00

## IV. Casos prácticos.

### Pasarela junto Puente Birrete en Paradas (Sevilla, España)

Ratios de amortiguamiento experimentales estimados (OMA).



Pasarela en Colvilhã

$\zeta=0.70 \%$



Pasarela en Viana do Castelo

$\zeta=1.10 \%$



Pasarela Palmas Altas

$\zeta=0.80 \%$

## IV. Casos prácticos.

### Pasarela junto Puente Birrete en Paradas (Sevilla, España)

¿Cómo puedo aumentar ratio de amortiguamiento de forma sencilla?

$$\zeta = \zeta_{est} + \zeta_{no-est} + \zeta_{aer} + \zeta_{cim}$$

$\geq 3\%$

$\zeta_{est}$  Amortiguamiento estructural → Normativas

$\zeta_{no-est}$  Amortiguamiento no estructural

$\zeta_{aer}$  Amortiguamiento aerodinámico

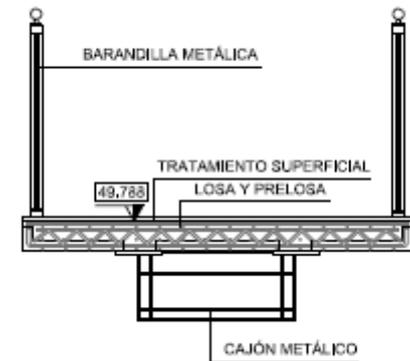
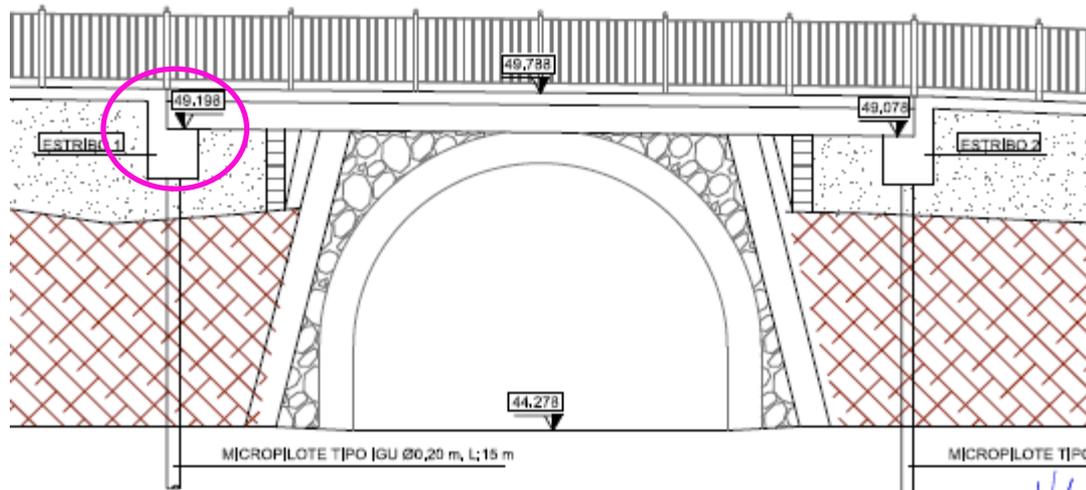
$\zeta_{cim}$  Amortiguamiento tipo de cimentación

Sistema amortiguado  
(SETRA)

## IV. Casos prácticos.

### Pasarela junto Puente Birrete en Paradas (Sevilla, España)

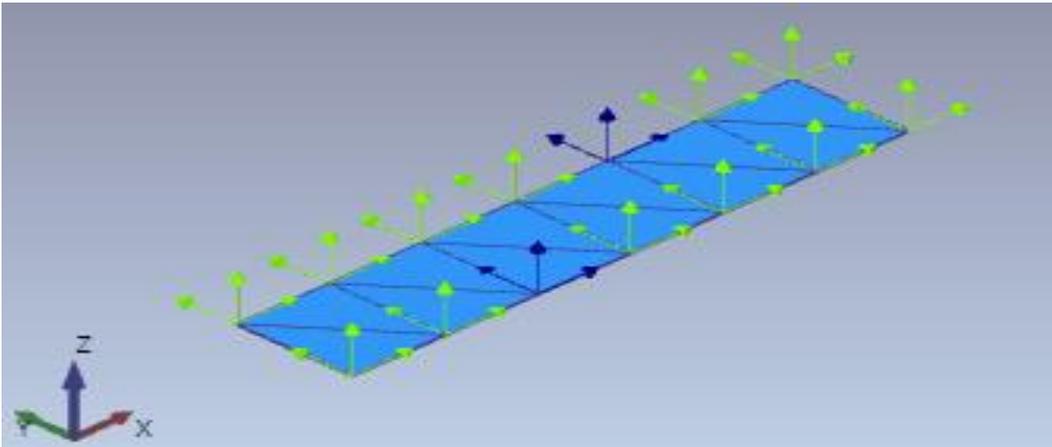
Detalles constructivos → Puentes Integrales  $\zeta_{cim}$



## IV. Casos prácticos.

### Pasarela junto Puente Birrete en Paradas (Sevilla, España)

#### Ensayo ambiental

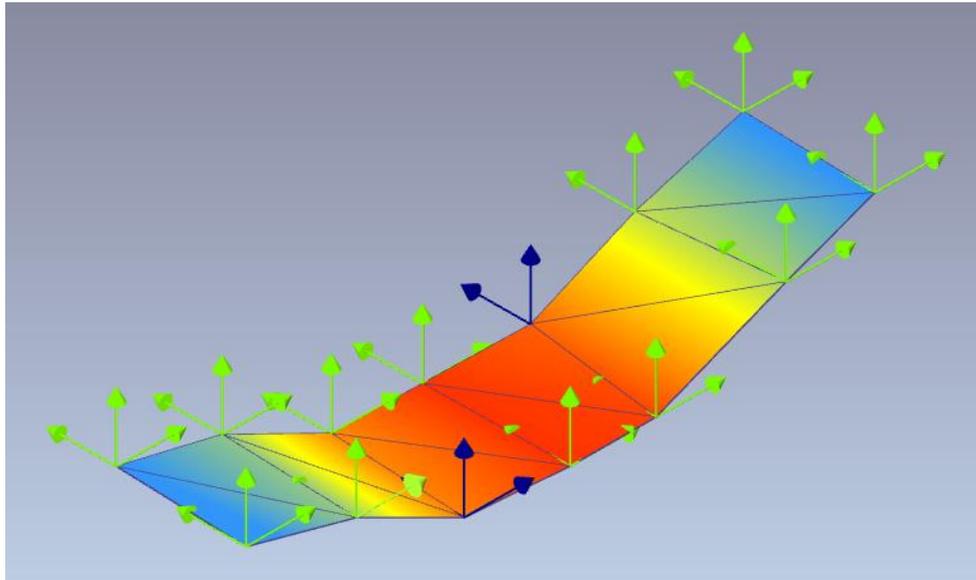


- 3 Acelerómetros triaxiales.
- 12 Conjuntos de medidas
- ● 2 Acelerómetros de referencia
- Duración de cada medida 600 seg.
- Frecuencia de muestreo 100 Hz.

## IV. Casos prácticos.

### Pasarela junto Puente Birrete en Paradas (Sevilla, España)

Estimación experimental del amortiguamiento



$f=16.791$  Hz

$\zeta$	[%]
EFDD	3.42
SSI	3.16

## Tabla de contenidos

- I. Introducción.
- II. Mejora del comportamiento dinámico de la estructura.
- III. Optimización de estructuras.
- IV. Casos prácticos.
- V. Referencias.**

## Referencias

- Soong, T.T., Costantinou, M.C.(1994). Passive and active control structural vibration control in civil engineering, p.160. State University of New York at Buffalo. Springe.
- SETRA/AFGC (2006). Guide méthodologique passerelles piétonnes (Technical Guide Footbridges: Assessment of vibration behaviour of footbridge under pedestrian loading).
- Butz CH., Heinemeyer, CH.; Goldack, A.; Keil, A.; Lukic, M.; Caetano, E.; Cunha, A. (2007). Advanced Load Models for Synchronous Pedestrian Excitation and Optimised Design Guidelines for Steel Footbridges (SYNPEX). RFCS-Research Project RFS-CR-03019.
- Den Hartog, J.P. (1947). Mechanical vibrations, p. 464. New York (USA). McGraw-Hill.
- Nocedal J., Wright S.J. (1999). Numerical Optimization, p. 683. New York (USA). Springer.
- Clough, R.W., Penzien J. (1993). Dynamics of structures, p. 634. New York (EEUU). McGraw-Hill Book Company.
- Matlab R2011a. . <http://www.mathworks.com/>.
- ANSYS Mechanical Release.
- Hu, W.H., Caetano, E., Cunha, A. (2013). Structural health monitoring of a stress-ribbon footbridge. Engineering Structures, 57: 578-593, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.06.051>.

**Gracias por su atención**