



Grupo de Optimización Estructural

GOE

Optimización de estructuras de acero
realizadas con perfiles armados rigidizados
de sección variable

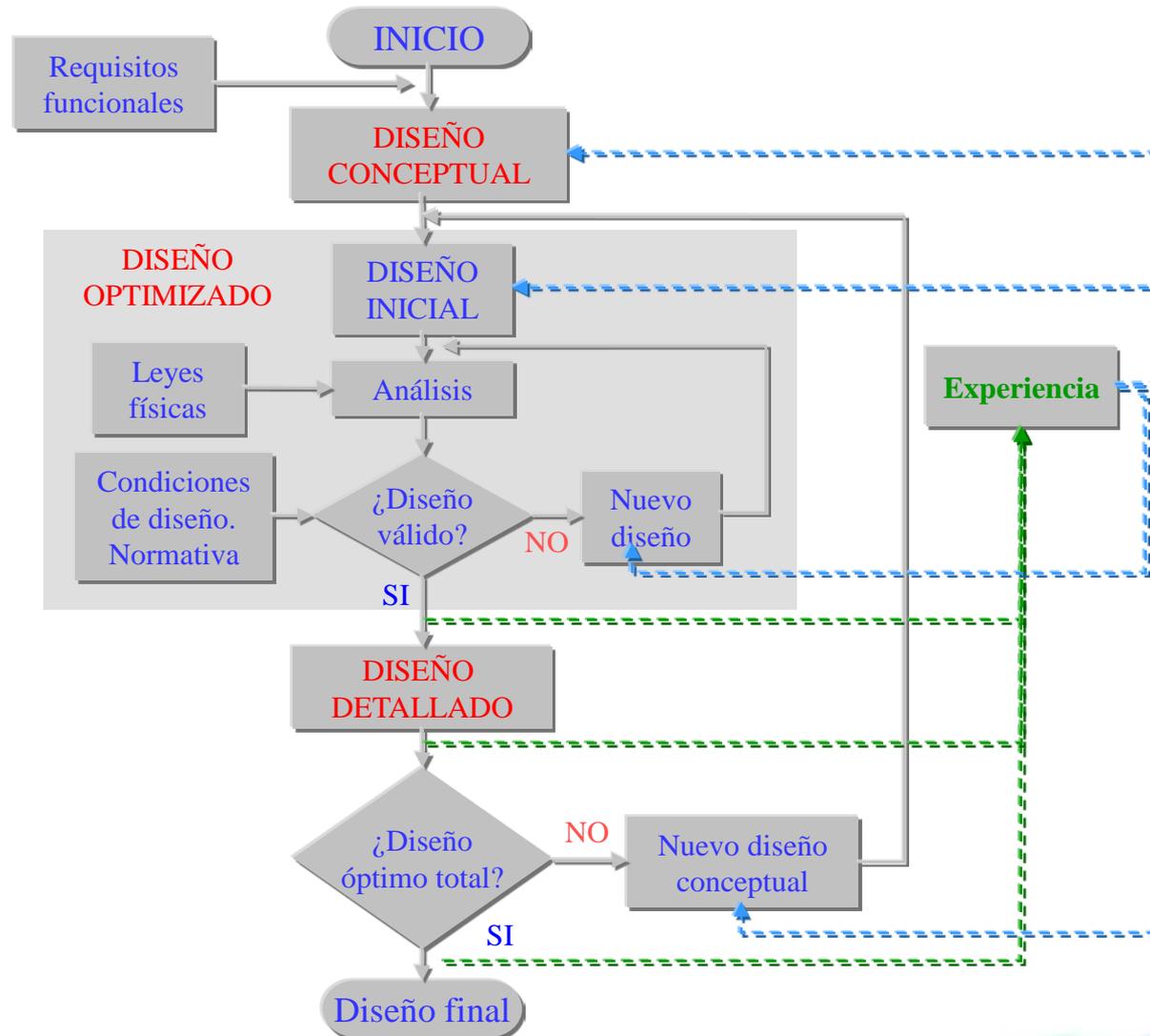
Pascual Martí y Concepción Díaz
Departamento de Estructuras y Construcción
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

CEA 2004. Congreso de la Estructura de Acero
A Coruña, 22 - 24 de Septiembre de 2004

Contenido de la presentación

- ⊕ El proceso de diseño de estructuras.
- ⊕ El diseño óptimo de estructuras.
- ⊕ Formulación y resolución del problema de optimización.
- ⊕ Formulación del problema de diseño óptimo.
- ⊕ Ejemplos:
 - ⊕ Viga armada con rigidizadores transversales y longitudinal.
 - ⊕ Pórtico a dos aguas con perfiles de sección variable.
- ⊕ Conclusiones.

El proceso de diseño de estructuras



Inconvenientes

- ⊕ Proceso iterativo de prueba y error.
- ⊕ Las modificaciones para mejorar el diseño dependen de la experiencia del diseñador.
- ⊕ Se obtienen soluciones que no siempre son las mejores y, además, con un alto coste de tiempo.
- ⊕ En las estructuras de acero con perfiles armados rigidizados de sección variable es difícil obtener el mejor diseño, debido:
 - ⊕ Alto número de variables (cantos, anchos, espesores, rigidizadores, etc.).
 - ⊕ Alto número y complejidad de las condiciones de diseño (resistencia, rigidez, pandeos globales, pandeos locales, etc.).

Objetivo

Automatizar totalmente el proceso de diseño de estructuras, realizando la fase de síntesis (modificación del diseño a partir de la información del análisis) mediante el empleo de algoritmos de optimización.

Ventajas

- ⊕ Permiten considerar las especificaciones de diseño, cada vez más numerosas y difíciles de cumplir, que se exigen a las estructuras actuales.
- ⊕ Incrementan la calidad y la seguridad de las estructuras y, al mismo tiempo, reducen los costes.
- ⊕ Introducen medidas de racionalización en el diseño de la estructura, dejando más tiempo disponible para las fases creativas del proceso de diseño.

Formulación:

Encontrar el vector de **variables de diseño \mathbf{x}** ,
que minimice la **función objetivo $f(\mathbf{x})$** ,
sujeto a las **restricciones**:

$$g_j(\mathbf{x}) \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m_d$$

$$h_j(\mathbf{x}) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, m_i$$

$$x_i^I \leq x_i \leq x_i^S \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Resolución:

Programación Matemática No Lineal.
Algoritmos genéticos, etc.

Formulación del problema de diseño óptimo. Variables y función objetivo

Variables

(11 independientes)

- Alturas alma (h_1, h_2)
- Espesor alma (e)
- Anchos alas ($b_{s1}, b_{i1}, b_{s2}, b_{i2}$)
- Espesor alas (e_{1s}, e_{1i})
- Sep. rig. transv. (s_{rt})
- Altura coloc. rig. long. (h_{rl})

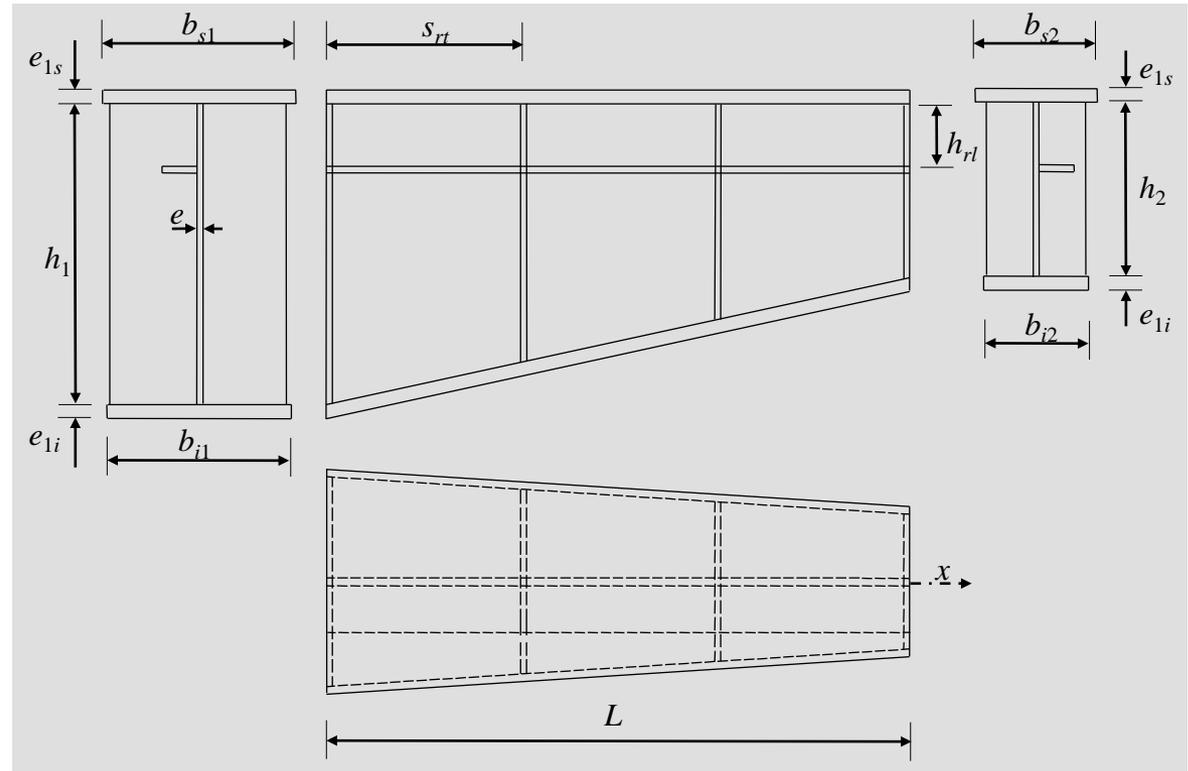
Variables

(dependientes)

- Dimensiones rigidizadores

Función objetivo

$$f = \sum_{j=1}^{n_e} \left[C_{alma,j} \rho L_j \frac{h_1 + h_2}{2} e + C_{alas,j} \rho L_j \left(\frac{b_{s1} + b_{i1}}{2} e_{1s} + \frac{b_{i2} + b_{s2}}{2} e_{1i} \right) + \sum_{i=1}^{n_{rt,j}} \left(C_{rt} \rho h_{rt,i} A_{rt} + C_{srvs} 2b_{rt,i} + C_{srva} 2h_{rt,i} \right) + C_{rl} \rho L_{rl,j} A_{rl} + L_j (C_{sas} + C_{sai}) \right]$$



Formulación del problema de diseño óptimo. Restricciones (1)

✦ Propiedades estáticas del elemento de sección variable y FEP

- ✦ División en tramos de inercia constante
- ✦ Aproximaciones
- ✦ Condensación de grados de libertad
- ✦ Integración numérica

$$A = \frac{A_1 + A_2}{2} \quad I = I_1 \left(0,08 + 0,92 \sqrt{\frac{I_2}{I_1}} \right) \quad (\text{DIN 4114})$$

✦ Pandeo de la estructura

- ✦ Análisis de estabilidad global
- ✦ Método omega (con inercias equivalentes)

✦ Pandeo lateral

- ✦ Análisis de estabilidad global
- ✦ NBE EA 95 (con inercias equivalentes)

✦ Normas y otras referencias

- ✦ NBE EA 95
- ✦ Recomendaciones para el proyecto de puentes de acero (ENSIDESA)
- ✦ DB SE-A, EC3, ...

Formulación del problema de diseño óptimo de estructuras. Restricciones (2)

- ⊕ Resistencia $g_{\sigma}(\mathbf{x}) = 1 - \frac{\sigma_c^*}{\sigma_u} \geq 0$
- ⊕ Flecha $g_f(\mathbf{x}) = 1 - \frac{f}{f_{max}} \geq 0$
- ⊕ Desplazamiento $g_D(\mathbf{x}) = 1 - \frac{D_j}{D_{max}} \geq 0$
- ⊕ Pandeo estructura $g_{wp}(\mathbf{x}) = 1 - \frac{\sigma_w^*}{\sigma_u} \geq 0$
- ⊕ Esbeltez $g_{esb}(\mathbf{x}) = 1 - \frac{\lambda}{\lambda_{max}} \geq 0$
- ⊕ Pandeo lateral $g_{pl}(\mathbf{x}) = 1 - \frac{M^*}{M_{cr}} \geq 0$

Formulación del problema de diseño óptimo de estructuras. Restricciones (3)

- ⊕ Pandeo local ala comprimida para piezas sometidas a un esfuerzo de flexión

$$g_{plac}(\mathbf{x}) = \frac{15e_{1c}}{b_c/2} \sqrt{\frac{2400}{\sigma_u}} - 1 \geq 0$$

- ⊕ Limitación de los espesores para elementos planos de piezas comprimidas

$$g_{eec}(\mathbf{x}) = \frac{\eta e}{h} \sqrt{\frac{2400}{\sigma_u}} - 1 \geq 0$$

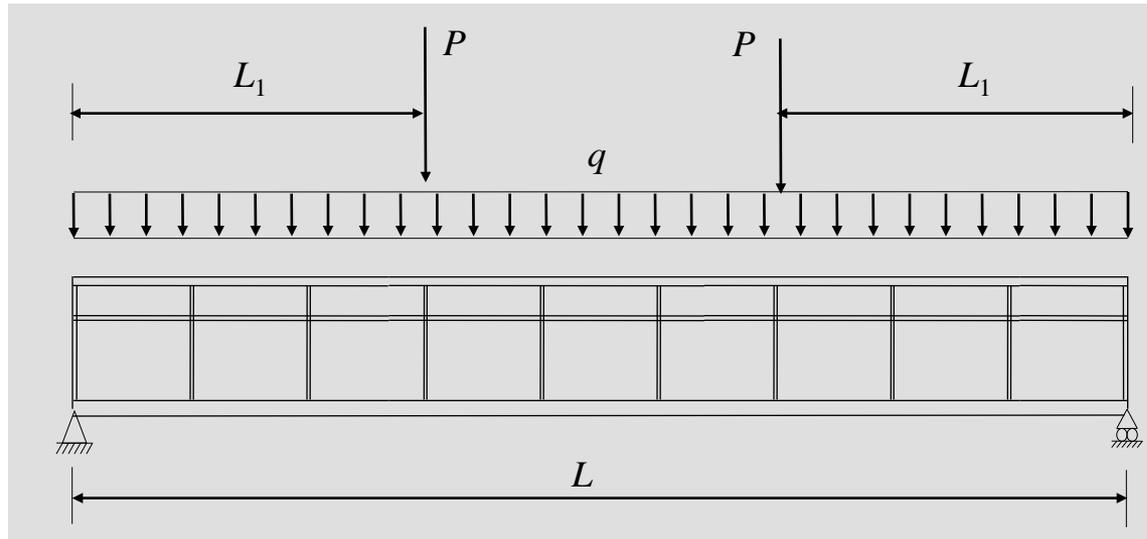
- ⊕ Abolladura del alma

$$g_{aa}(\mathbf{x}) = 1 - \frac{\sigma_{co}}{\sigma_{co,i}} \geq 0$$

- ⊕ De borde (espesores almas y alas, alturas almas, anchos alas, etc.)

$$x_i^{min} \leq x_i \leq x_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Viga armada con rigidizadores transversales y longitudinal. Datos



Datos: $L = 30 \text{ m}$ $L_1 = 10 \text{ m}$ $L_b = 5 \text{ m}$
 $P = 150 \text{ kN}$ $q = 15 \text{ kN/m}$

Acero: $E = 210 \text{ GPa}$ $G = 81 \text{ GPa}$ $\nu = 0,3$
 $\rho = 78,2 \text{ kN/m}^3$ $\sigma_e = 260 \text{ MPa}$

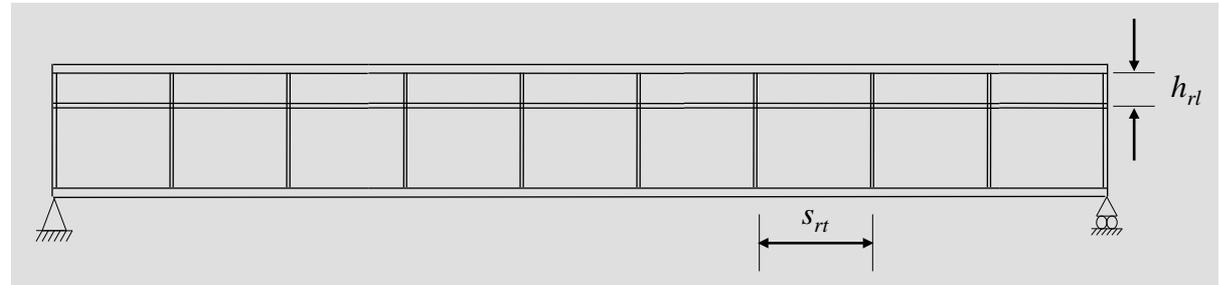
Condiciones de diseño:

$$f_{adm,CP} = L/1000 \quad \gamma_q = 1,33 \quad \gamma_P = 1,50$$

Viga armada con rigidizadores transversales y longitudinal. Formulación diseño óptimo

Variables (6)

- Altura alma (h)
- Espesor alma (e)
- Ancho alas (b)
- Espesor alas (e_1)
- Sep. rig. transv. (s_{rt})
- Altura coloc. rig. long. (h_{rl})



Espesores: 6, 8, 10, 12, 15, 20, 24 y 30 mm

$h, b, h_{rl} =$ múltiplos de 10 mm

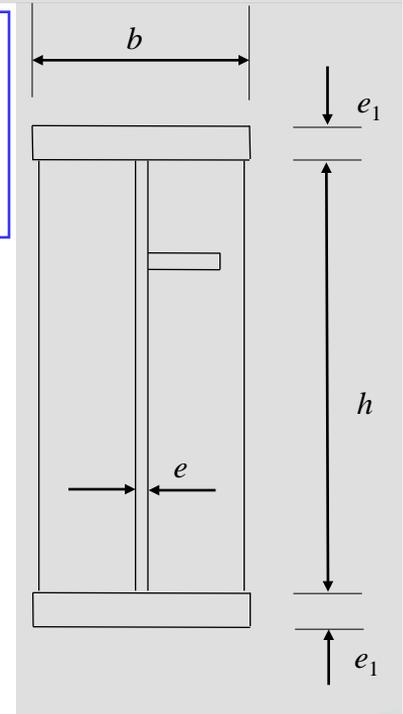
$$s_{rt} = L/n_{rt}$$

Función objetivo

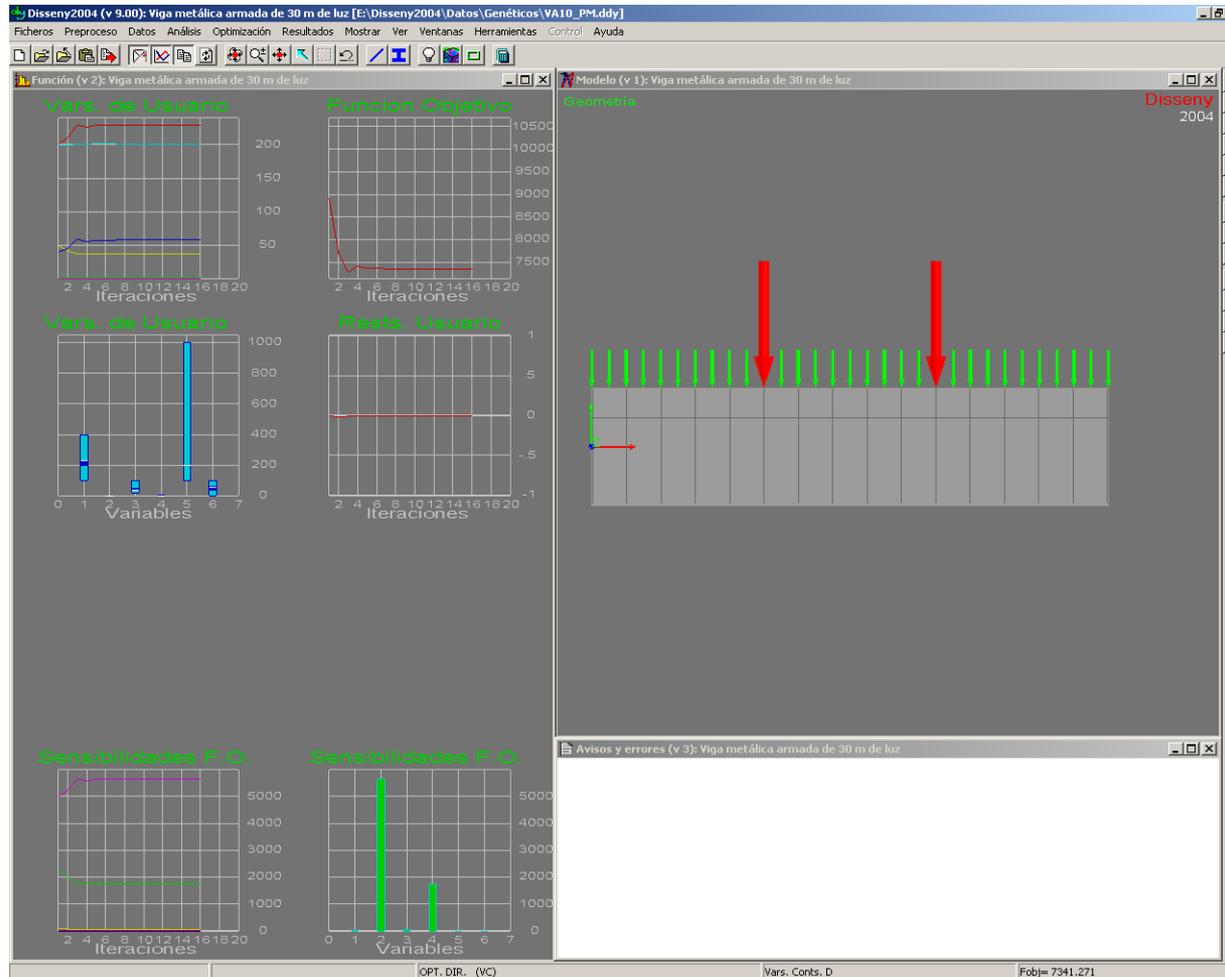
$$f = \rho [C_{alma} h e + C_{alas} (2 b e_1) + n_{rt} C_{rt} A_{rt} h + C_{rl} L_{rl} A_{rl}]$$

Restricciones (5+n_r)

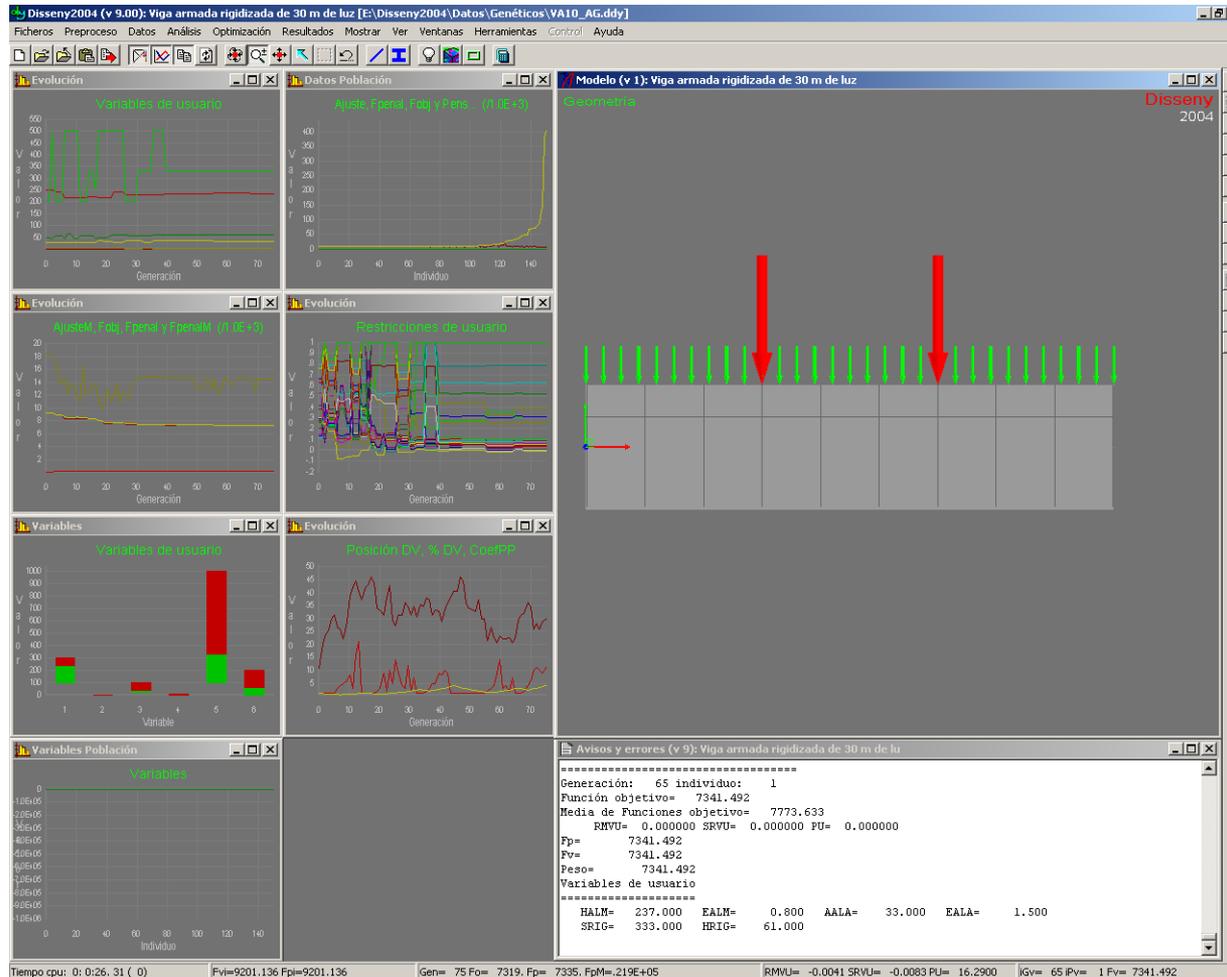
- Resistencia (1)
- Flecha (1)
- Pandeo lateral (1)
- Pandeo local ala comprimida (1)
- Abolladura del alma (n_r)



Viga armada con rigidizadores transversales y longitudinal. Programa de cálculo (DISSENY - PMNL)



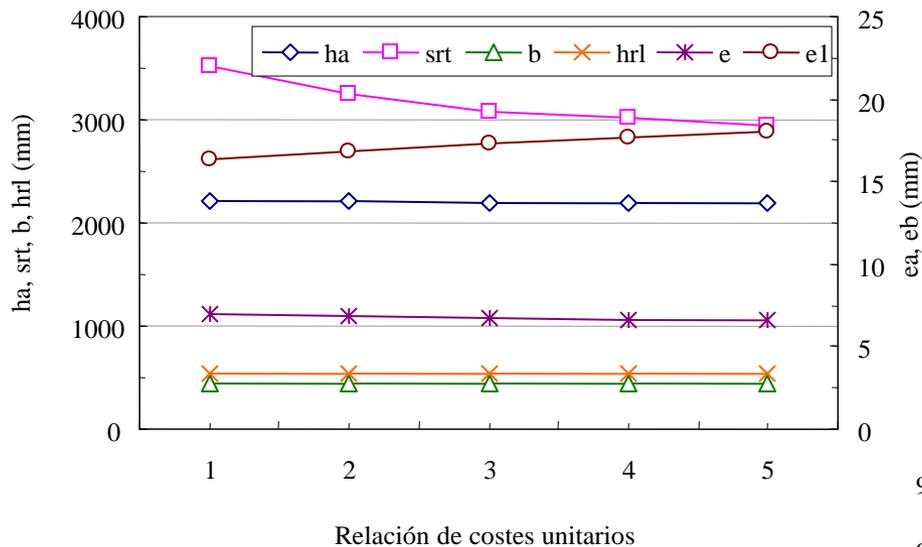
Viga armada con rigidizadores transversales y longitudinal. Programa de cálculo (DISSENY - AG)



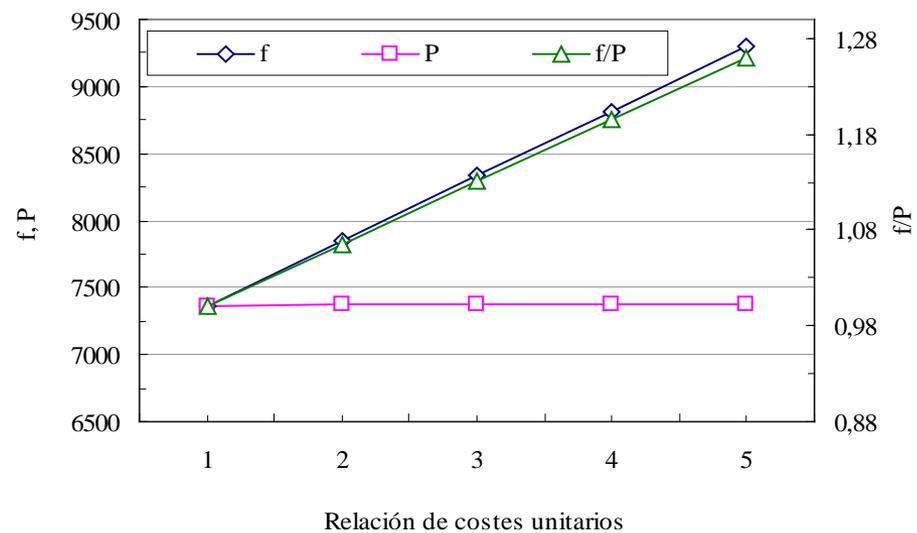
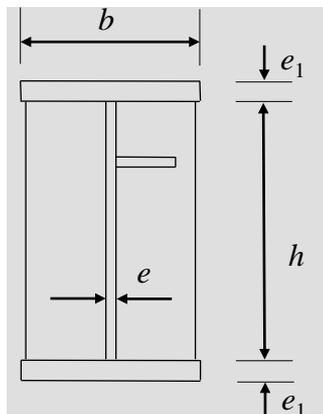
Viga armada con rigidizadores transversales y longitudinal. Resultados

	$C_{alma} = C_{alas} = 1$ $C_{rt} = C_{rl} = 1$		$C_{alma} = C_{alas} = 1$ $C_{rt} = C_{rl} = 2$		$C_{alma} = C_{alas} = 1$ $C_{rt} = C_{rl} = 3$		$C_{alma} = C_{alas} = 1$ $C_{rt} = C_{rl} = 4$	
	VC	VD	VC	VD	VC	VD	VC	VD
h (mm)	2287,5	2370	2211,8	2330	2163,1	2350	2125,4	2240
e	7,5	8	7,2	8	7,1	8	7,0	8
b	372,3	330	397,5	350	413,7	340	417,8	300
e_1	15,5	15	16,5	15	17,1	15	17,9	20
s_{rt}	2005,0	3330	1973,0	3330	1967,3	3330	2108,1	3330
h_{rl}	583,3	610	561,9	610	549,6	600	547,2	540
f	7341 (+0,0 %)	7341 (+0,0 %)	7942 (+8,1 %)	7950 (+8,1 %)	8491 (+15,6 %)	8495 (+15,6 %)	8976 (+22,2 %)	9132 (+24 %)
P (kp)	7341	7341	7389	7393	7443	7473	7508	7547
P_{vd}/P_{vc}		1,000		1,001		1,004		1,005
FC modo 1	1,05 (AA-RI-E)		1,05 (AA-RI-E)		1,03 (AA-RI-E)		1,05 (AA-RI-E)	
FC modo 10	1,30 (AA-RS-P)		1,22 (AA-RS-P)		1,24 (AA-RS-P)		1,58 (AA-RS-P)	

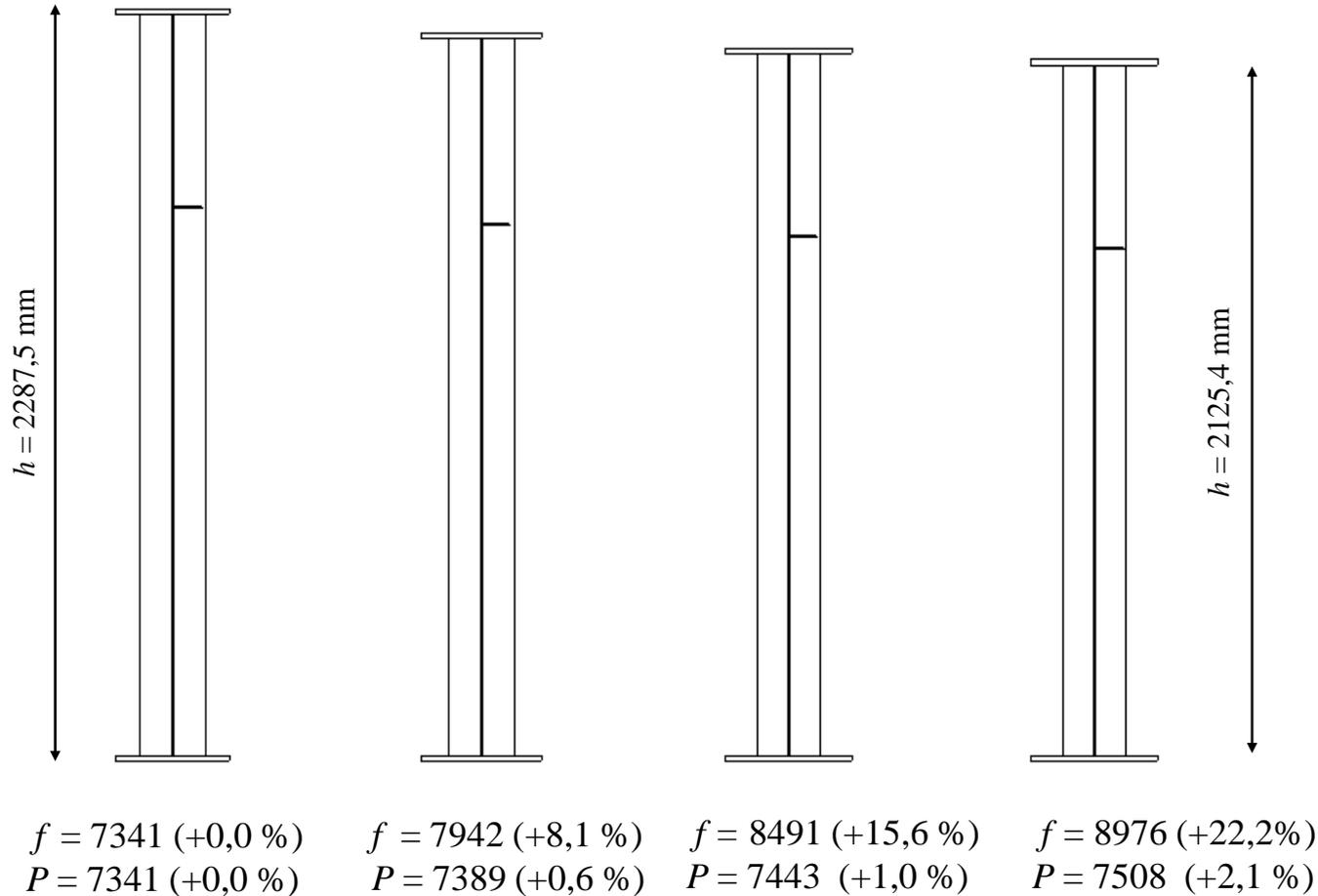
Viga armada con rigidizadores transversales y longitudinal. Resultados variables continuas



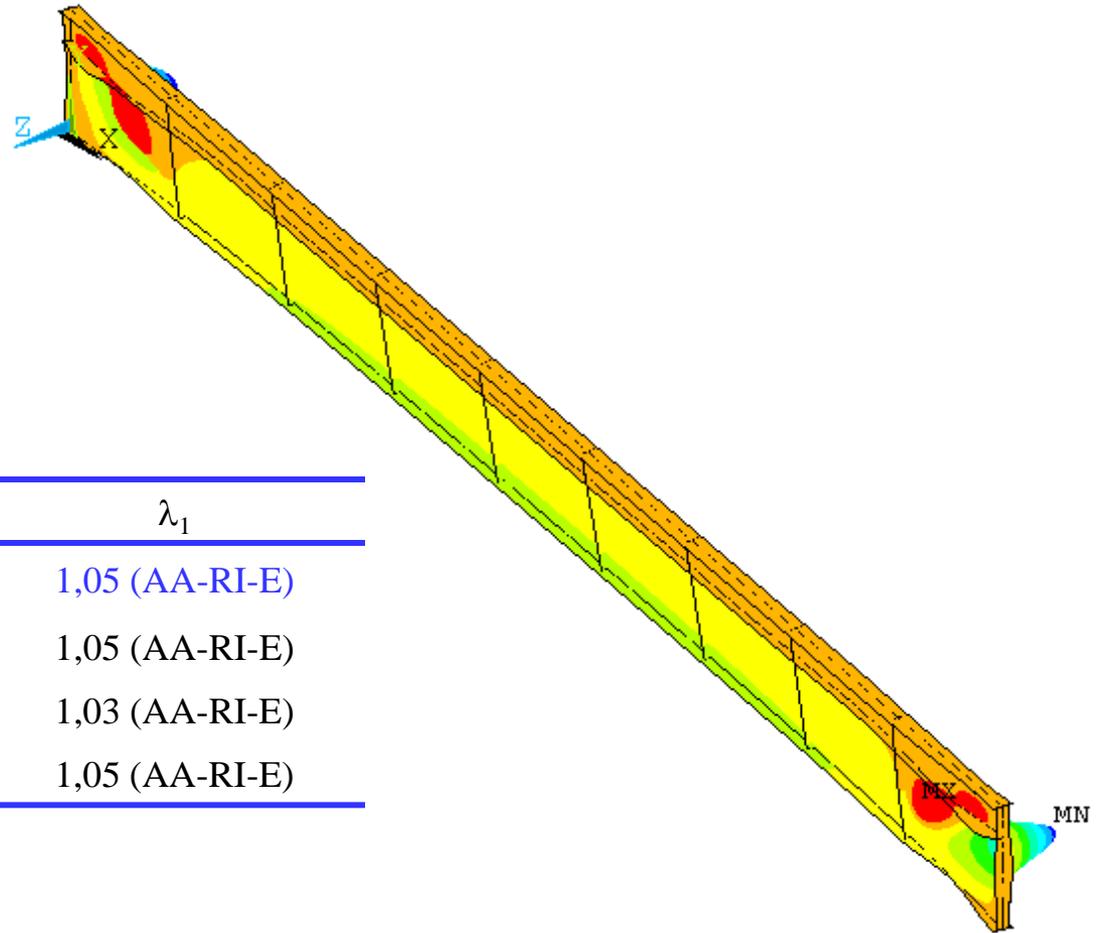
Evolución con el coste relativo
Restricciones R-P-D



Viga armada con rigidizadores transversales y longitudinal. Resultados variables continuas

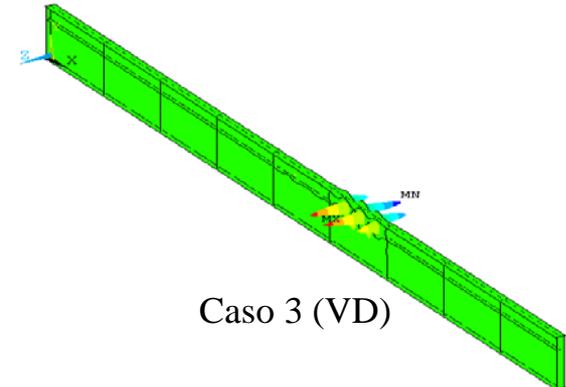
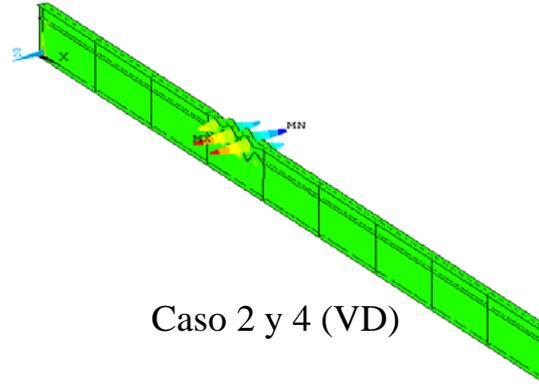
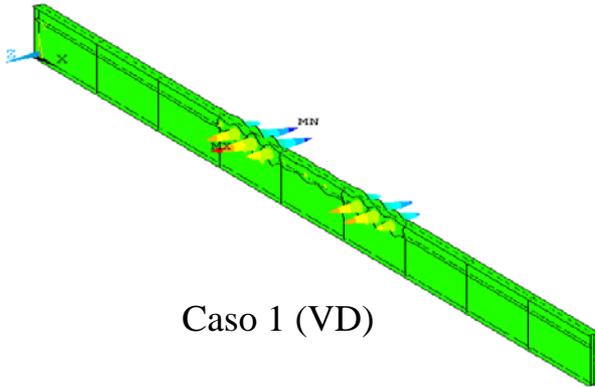


Viga armada con rigidizadores transversales y longitudinal. Comparación de resultados



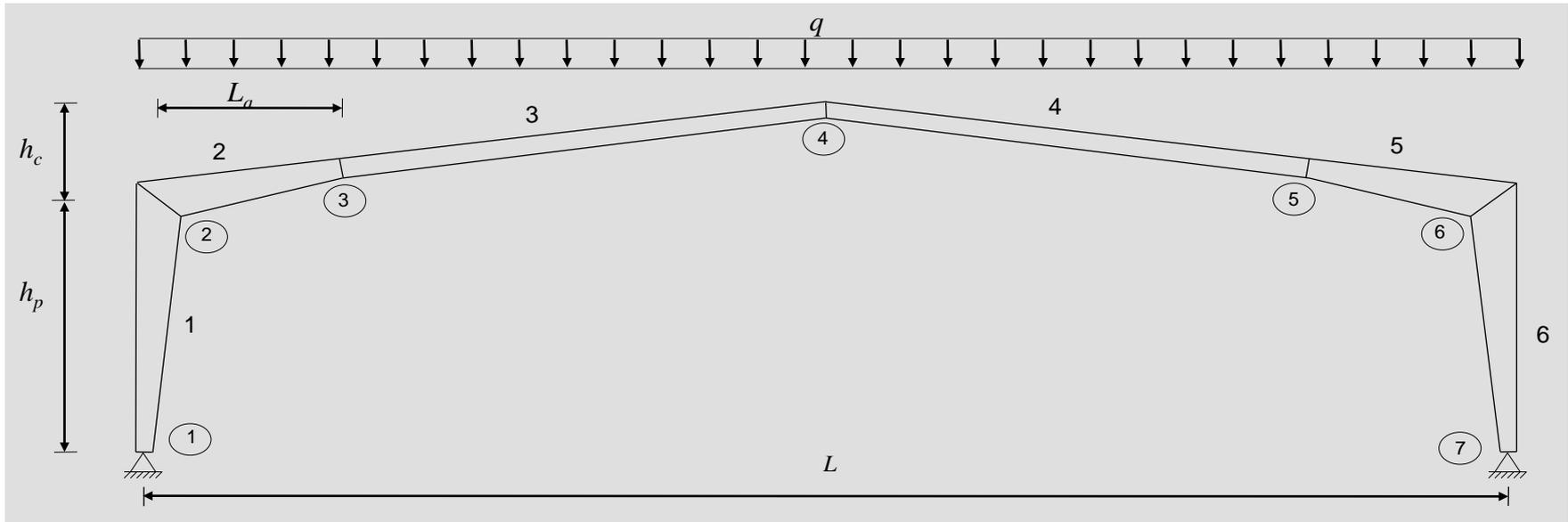
Caso (VD)	f	λ_1
1	7419 (+0,0 %)	1,05 (AA-RI-E)
2	7950 (+7,2 %)	1,05 (AA-RI-E)
3	8495 (+14,5 %)	1,03 (AA-RI-E)
4	9132 (+23 %)	1,05 (AA-RI-E)

Viga armada con rigidizadores transversales y longitudinal. Comparación de resultados



Caso	f	λ_{10}
1	7419 (+0,0 %)	1,30 (AA-RS-P)
2	7950 (+7,2 %)	1,22 (AA-RS-P)
3	8495 (+14,5 %)	1,24 (AA-RS-P)
4	9132 (+23,0 %)	1,58 (AA-RS-P)

Pórtico a dos aguas con perfiles de sección variable. Datos



$$L = 30 \text{ m} \quad L_a = 4,5 \text{ m} \quad h_c = 2,1 \text{ m} \quad h_p = 7,0 \text{ m}$$
$$q = 7,5 \text{ kN/m}$$
$$E = 210 \text{ GPa} \quad G = 81 \text{ GPa} \quad \rho = 78,2 \text{ kN/m}^3 \quad \sigma_e = 260 \text{ MPa}$$

Arriostramientos:

Puntos 1 a 7 $d_z = 0$

Puntos 3 y 5 $g_z = 0$

Pórtico a dos aguas con perfiles de sección variable.

Formulación diseño óptimo

✦ Variables (13)

- ✦ Alturas almas (h_1 a h_4)
- ✦ Espesores almas (e_p, e_a, e_v)
- ✦ Anchos alas (b_p, b_a, b_v)
- ✦ Espesores alas (e_{1p}, e_{1a}, e_{1v})

Espesores: 5, 6, 8, 10, 12, 15, 20 mm

$h, b =$ múltiplos de 5 mm

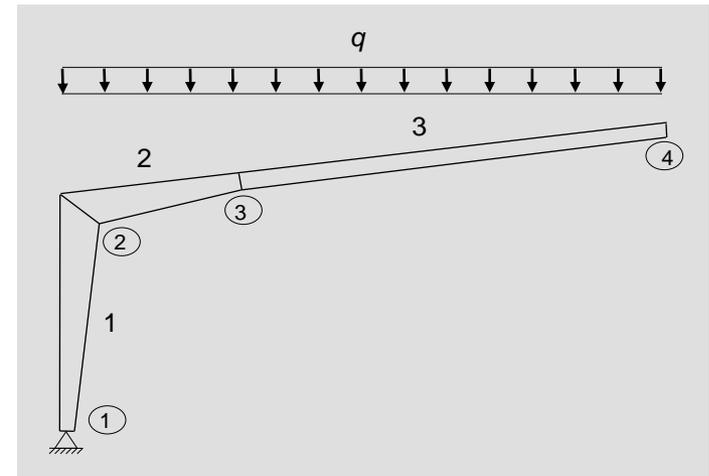
$h_1, h_4 \geq 400$ mm $e_v \geq 5$ mm

✦ Función objetivo

- ✦ Peso total de acero

✦ Restricciones (17)

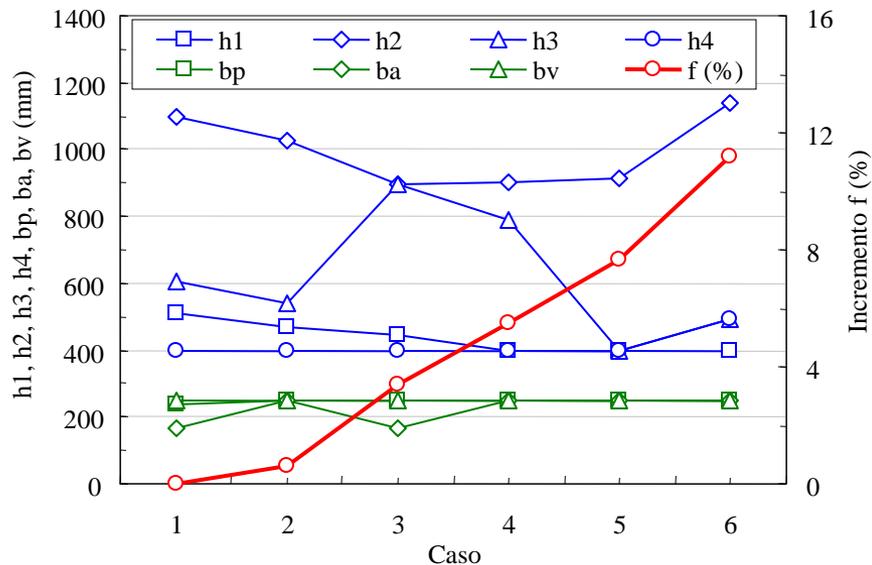
- ✦ Resistencia perfiles (R1 a R3)
- ✦ Abolladura de las almas (R4 a R6)
- ✦ Desplazamiento: $d_h(2) < 20$ mm (R7)
- ✦ Desplazamiento: $d_v(4) < 100$ mm (R8)
- ✦ Pandeo local cordones comprimidos (R9 a R11)
- ✦ Pandeo lateral (R12 a R14)
- ✦ Pandeo en el plano y perpendicular al plano (R15 a R17)



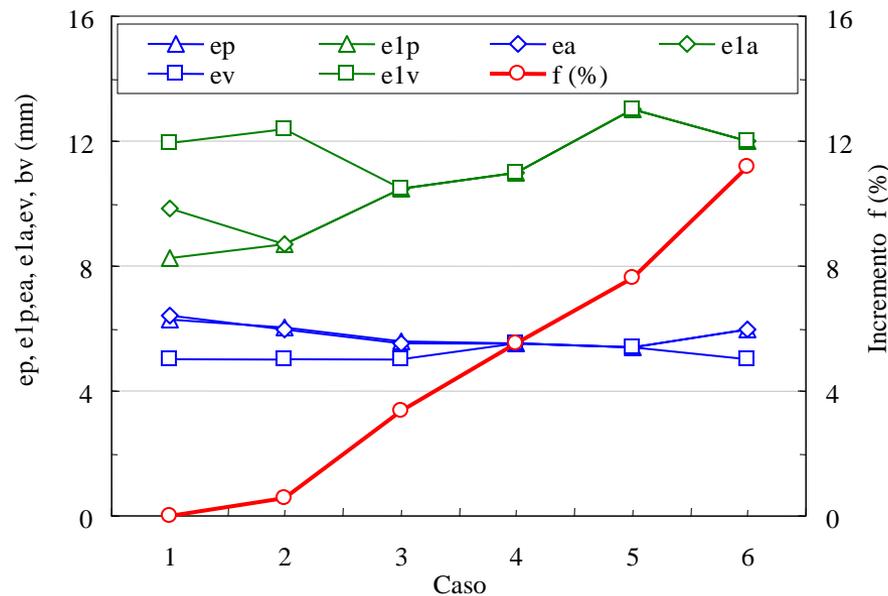
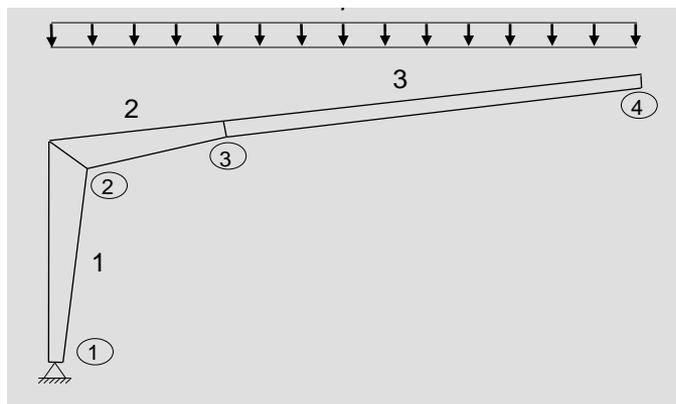
Pórtico a dos aguas con perfiles de sección variable. Resultados

Variabes (mm)	Caso 1 (VC)	Caso 2 (C1 + b iguales)	Caso 3 (C2 + e ₁ iguales)	Caso 4 (C3 + e iguales)	Caso 5 (C4 + h ₃ = h ₄)	Caso 6 (C5 + VD y 5 mm)
h_1	508,8	468,8	447,7	399,9	399,9	400,0
h_2	1095,0	1029,2	894,7	904,0	911,0	1140,0
h_3	607,6	542,6	894,6	788,0	399,8	495,0
h_4	400,0	400,0	400,0	400,0	399,8	495,0
e_p	6,3	6,0	5,6	5,5	5,3	6,0
e_{1p}	8,2	8,6	10,4	10,9	13,0	12,0
b_p	237,2	250,0	249,9	249,9	249,9	250,0
e_a	6,4	5,9	5,5	5,5	5,3	6,0
e_{1a}	9,8	8,6	10,4	10,9	13,0	12,0
b_a	165,5	250,0	165,5	249,9	249,9	250,0
e_v	5,0	5,0	5,0	5,5	5,3	5,0
e_{1v}	11,9	12,3	10,4	10,9	13,0	12,0
b_v	250,0	250,0	250,0	249,9	249,9	250,0
f (kp)	3023 (+0,0 %)	3041 (+0,6 %)	3124 (+3,4 %)	3189 (+5,5 %)	3254 (+7,6 %)	3360 (+11,2 %)
Restricciones activas	4, 5, 8, 9,12, 13, 14 (AA,DV,PLCC,PL)	4, 5, 9, 10,12, 14	4, 5, 12, 14	4, 14	4, 14	14

Pórtico a dos aguas con perfiles de sección variable. Resultados



Evolución diseños óptimos para 6 casos

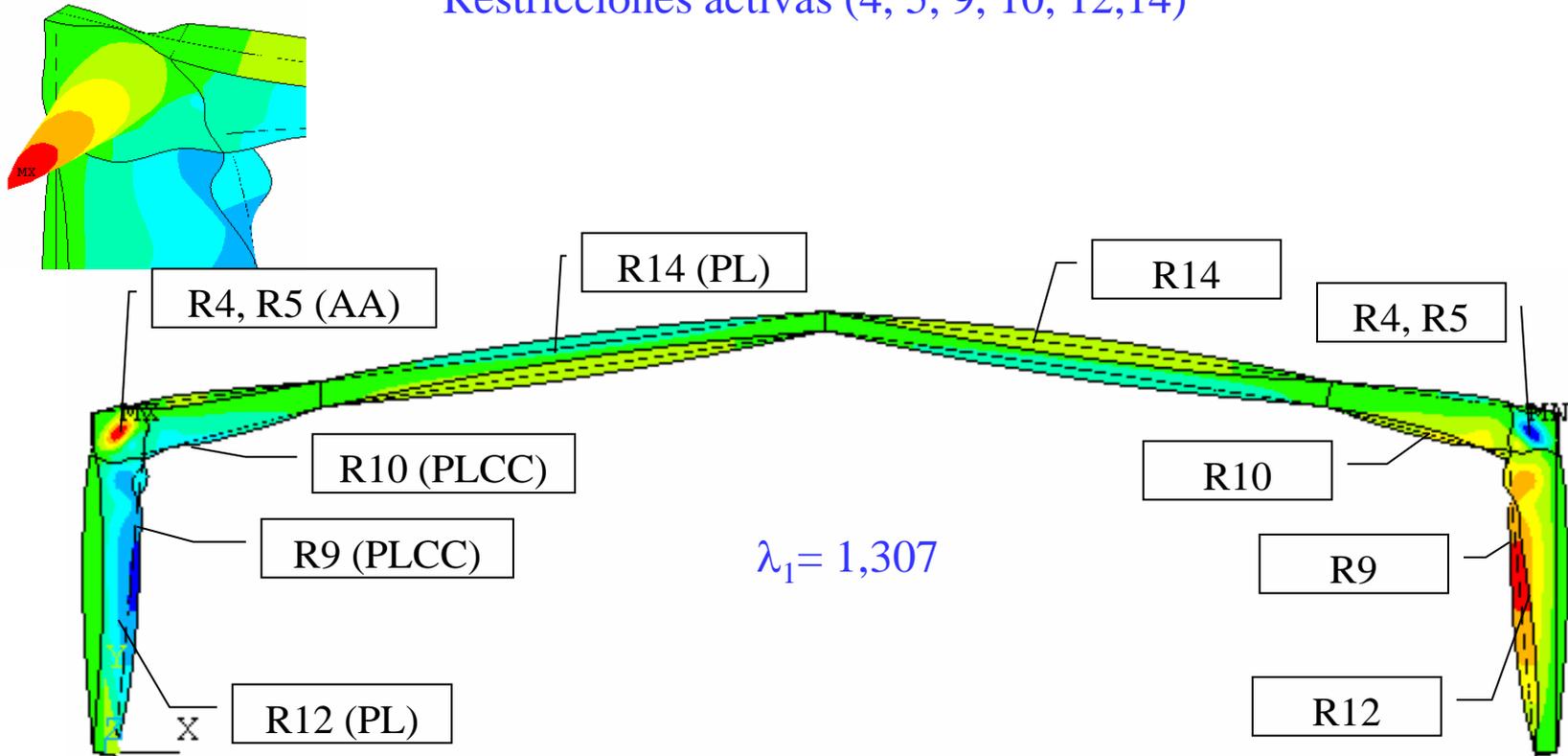


Pórtico a dos aguas con perfiles de sección variable.

Comparación de resultados

Modelo tridimensional. Caso 2.

Restricciones activas (4, 5, 9, 10, 12,14)



Conclusiones

- ⊕ Se ha formulado e implementado una estrategia para el diseño óptimo de estructuras de acero realizadas con perfiles armados rigidizados de sección variable.
- ⊕ Se han presentado dos ejemplos que muestran la **utilidad de las técnicas de optimización** para manejar el alto número de variables y restricciones que es necesario considerar para obtener el diseño óptimo de este tipo de estructuras.
- ⊕ Se obtienen **diseños óptimos** en los que se producen, **simultáneamente, varios modos de fallo**.
- ⊕ La normativa utilizada (NBE EA-95, EC3 y DB SE-A) tiene algunas **lagunas para la formulación completa de este tipo de problemas**. En este trabajo estas lagunas se han resuelto de forma aproximada, por lo que es necesaria una mayor investigación para resolverlas de forma más precisa.



Grupo de Optimización Estructural

GOE

Optimización de estructuras de acero
realizadas con perfiles armados rigidizados
de sección variable

Pascual Martí y Concepción Díaz
Departamento de Estructuras y Construcción
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

CEA 2004. Congreso de la Estructura de Acero
A Coruña, 22 - 24 de Septiembre de 2004