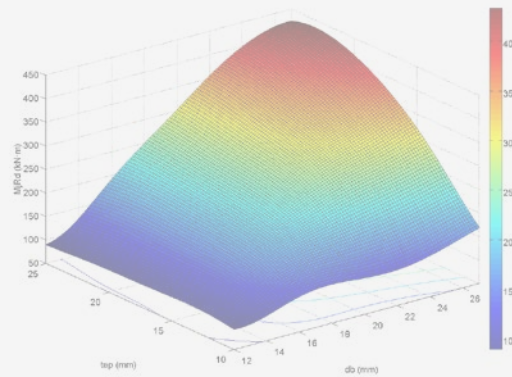
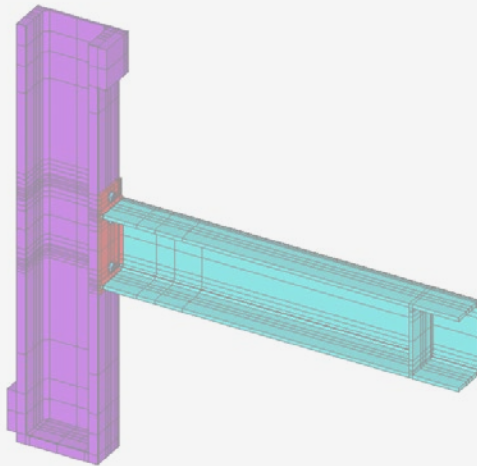
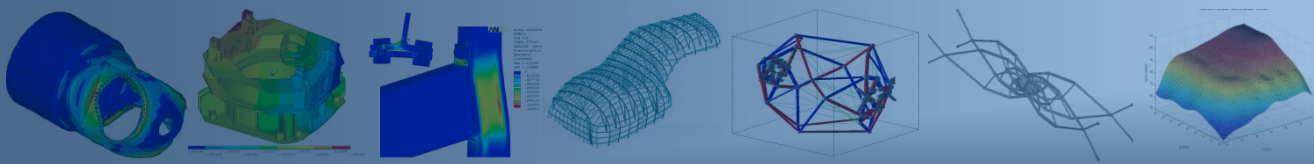


DISEÑO ÓPTIMO PROBABILISTA DE UNIONES SEMIRRÍGIDAS MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA Y MODELOS KRIGING



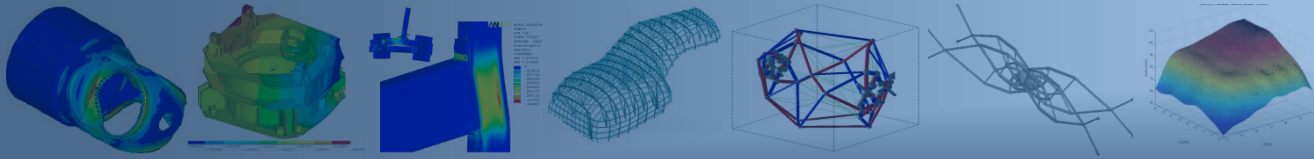
Pascual Martí Montrull
Concepción Díaz Gómez
Jesús Martínez Frutos
Mariano Victoria Nicolás

Universidad Politécnica de Cartagena
Departamento de Estructuras y Construcción



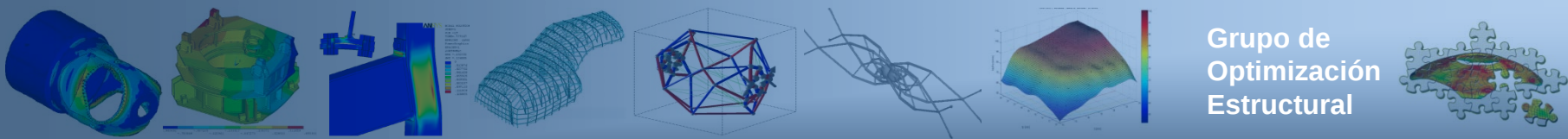
Presentación

- 1** Motivación
- 2** Simulación del comportamiento de uniones semirrígidas mediante Elementos Finitos
- 3** Diseño Óptimo Probabilista de uniones semirrígidas
- 4** Metodología propuesta
- 5** Aplicación numérica
- 6** Conclusiones y trabajos futuros



Motivación (1)

- Los trabajos de optimización de uniones semirrígidas utilizan un **enfoque determinista**, sin tener en cuenta las **incertidumbres** asociadas a los componentes de la unión.
- Las **incertidumbres** asociadas a las propiedades del acero pueden ocasionar **cambios en el modo de fallo previsto** en el diseño de la unión, dando lugar a modos de fallo frágiles.
- Un **diseño óptimo determinista** puede resultar muy **sensible a la incertidumbre** de los parámetros que definen la resistencia, rigidez y ductilidad de la unión.
- La **capacidad de rotación** de la unión tiene una **gran sensibilidad frente a las variaciones de las propiedades** de los materiales de la unión.



Motivación (2)

Obtener diseños óptimos poco sensibles a las incertidumbres en los parámetros de los materiales de la unión, con un coste computacional razonable.

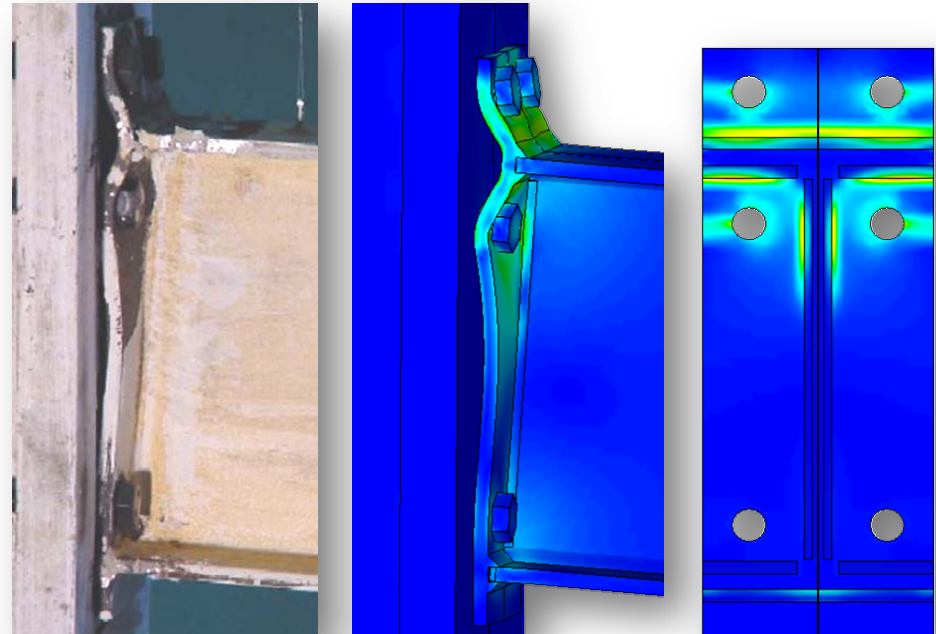
- Análisis de la respuesta estructural de las uniones semirrígidas mediante modelos de elementos finitos, calibrados con resultados de ensayos experimentales, para obtener **resultados precisos**.
- Consideración de la capacidad de rotación de la unión, para **evitar modos de fallo frágiles**.
- Utilización de modelos Kriging, para **reducir el coste computacional** asociado a la resolución del modelo de elementos finitos.
- Utilización de formulaciones de diseño óptimo probabilista, para **tener en cuenta las incertidumbres** en las propiedades de los materiales de la unión.

Simulación de uniones semirrígidas mediante Elementos Finitos (1)

En la actualidad, el método de los elementos finitos está ampliamente aceptado como la técnica más eficaz para obtener soluciones numéricas de problemas estructurales.

Ventajas

- Permite determinar el comportamiento rotacional de la unión.
- Evita la necesidad de realizar muchos ensayos experimentales.
- Generar estudios paramétricos.
- Estudio de efectos locales, difíciles de determinar experimentalmente con suficiente precisión.



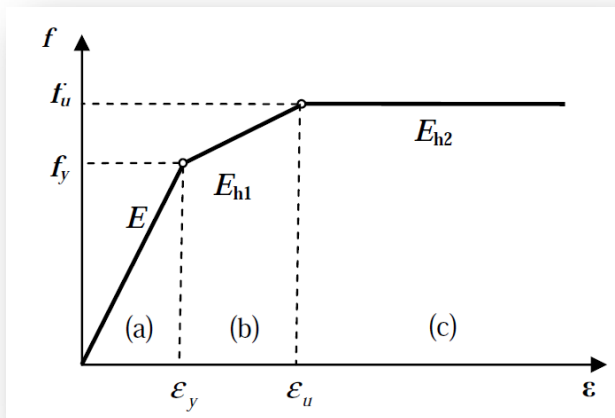
Díaz, Victoria, Martí y Querín, JCSR, 2011.

Simulación de uniones semirrígidas mediante Elementos Finitos (2)

Caracterización de la ductilidad de la unión (Capacidad de rotación)

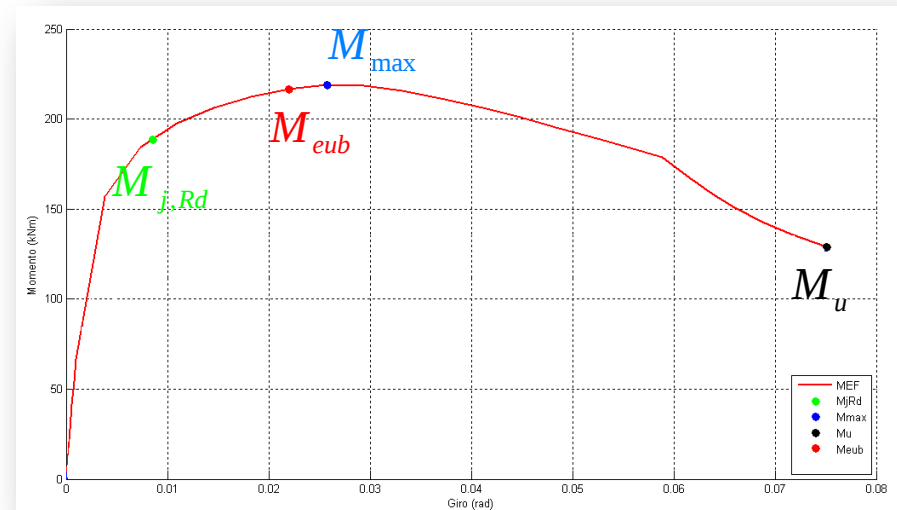
Se considera fallo frágil debido a rotura de los tornillos cuando la deformación media principal alcanza la deformación de rotura ($8f_{yb}/E$)

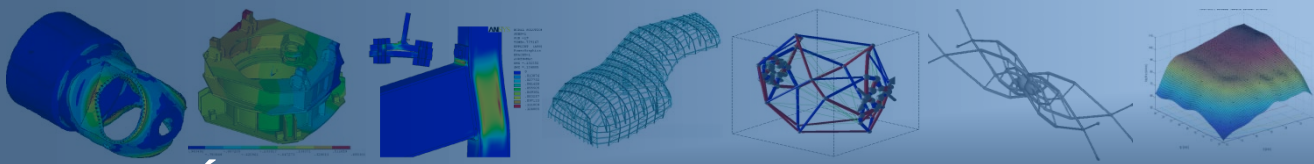
Ley tensión-deformación



Ley trilineal con endurecimiento isotrópico.

Curva Momento-Rotación





Diseño Óptimo Probabilista de uniones semirrígidas

Diseño Óptimo Determinista

$$\min_{\mathbf{x}} C_u(\mathbf{x})$$

$$\text{sujeta a : } M_{j,Rd}(\mathbf{x}) \geq M_{j,Rd}^{\min}$$

$$S_{j,ini}(\mathbf{x}) \geq S_{j,ini}^{\min}$$

$$S_{j,ini}(\mathbf{x}) \leq S_{j,ini}^{\max}$$

$$\theta_u(\mathbf{x}) \geq \theta_u^{\min}$$

$$\mathbf{x}^{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{\max}$$

Diseño Óptimo Probabilista

$$\min_{\mathbf{x}} C_u(\mathbf{x})$$

$$\text{sujeta a : } \mu_{M_{j,Rd}(\mathbf{x},\mathbf{z})}(\mathbf{x}) - \beta \sigma_{M_{j,Rd}(\mathbf{x},\mathbf{z})}(\mathbf{x}) \geq M_{j,Rd}^{\min}$$

$$\mu_{S_{j,Rd}(\mathbf{x},\mathbf{z})}(\mathbf{x}) - \beta \sigma_{S_{j,Rd}(\mathbf{x},\mathbf{z})}(\mathbf{x}) \geq S_{ini}^{\min}$$

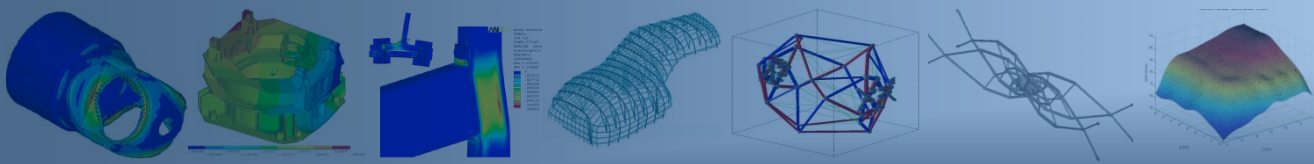
$$\mu_{S_{j,Rd}(\mathbf{x},\mathbf{z})}(\mathbf{x}) + \beta \sigma_{S_{j,Rd}(\mathbf{x},\mathbf{z})}(\mathbf{x}) \leq S_{ini}^{\max}$$

$$\mu_{\theta_u(\mathbf{x},\mathbf{z})}(\mathbf{x}) - \beta \sigma_{\theta_u(\mathbf{x},\mathbf{z})}(\mathbf{x}) \geq \theta_u^{\min}$$

$$\mathbf{x}^{\min} \leq \mathbf{x} \leq \mathbf{x}^{\max}$$

$\mathbf{x}$ variables de diseño

$\mathbf{z}$ parámetros aleatorios



Metodología propuesta. Etapas

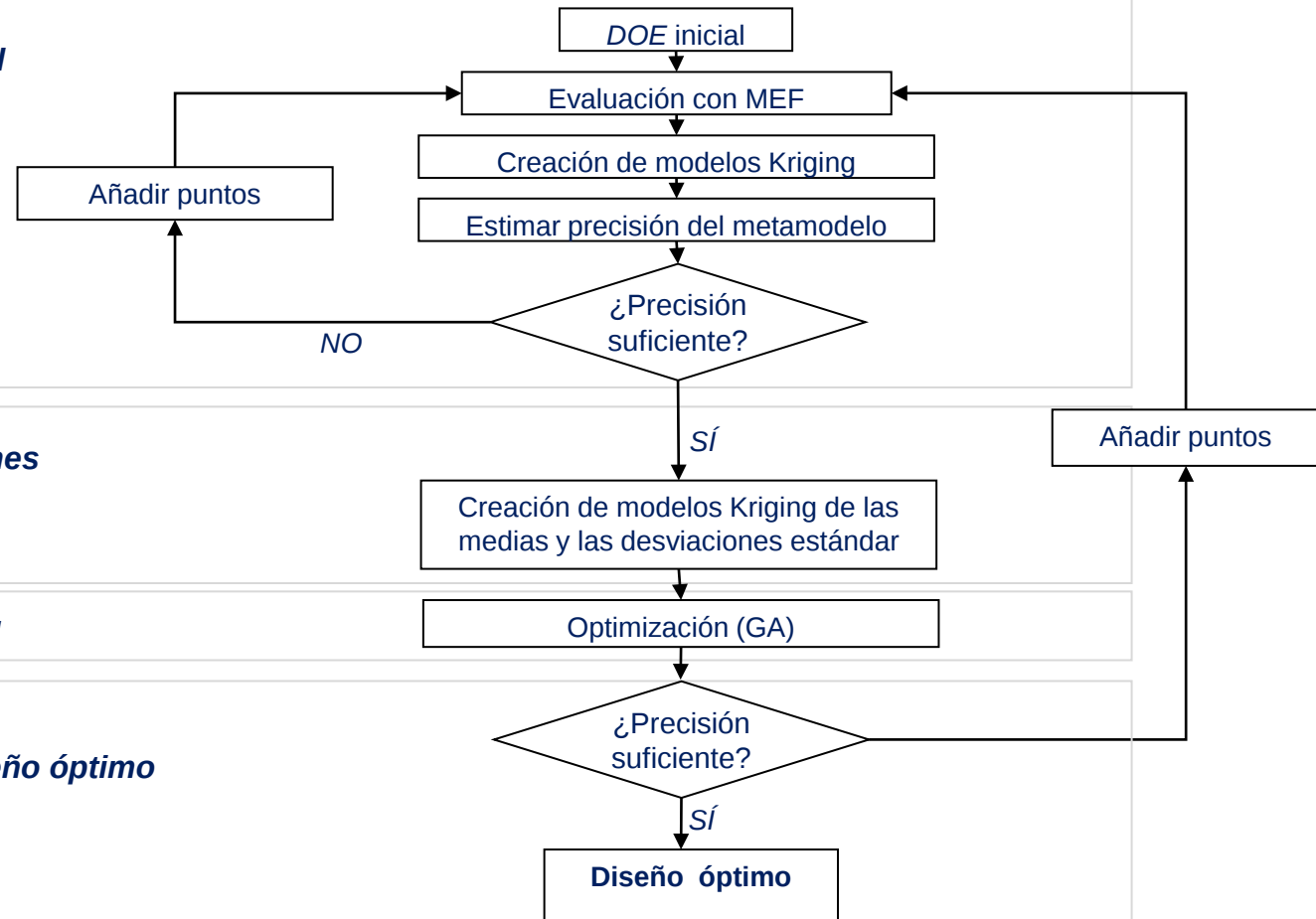
Etapas 1: Construir y calibrar el modelo de elementos finitos

Etapas 2: Aproximación global

$$\tilde{M}_{j,Rd}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$$

$$\tilde{S}_{j,ini}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$$

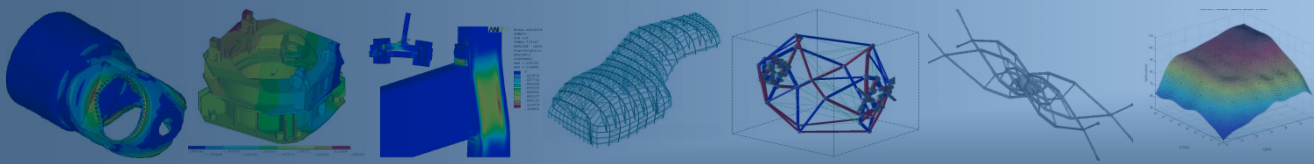
$$\tilde{\theta}_u(\mathbf{x}, \mathbf{z})$$



Etapas 3: Medias y desviaciones estándar

Etapas 4: Optimización global

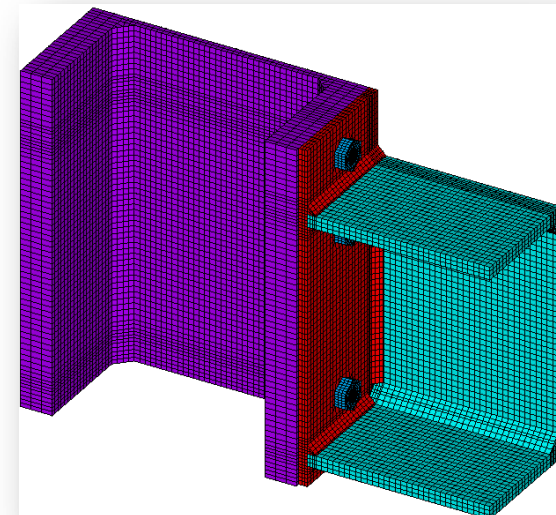
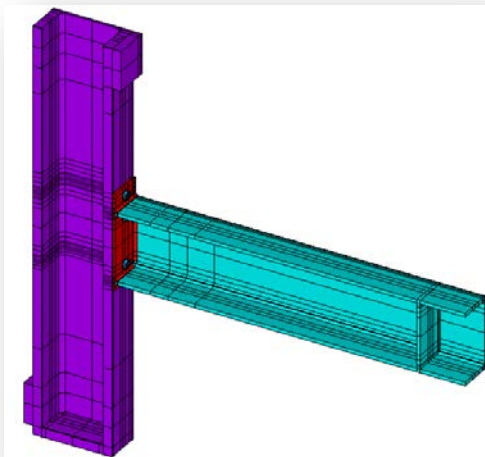
Etapas 5: Análisis (MEF) diseño óptimo

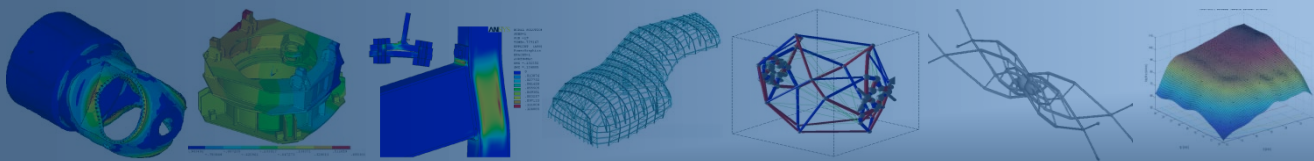


Aplicación numérica. Modelo de Elementos Finitos

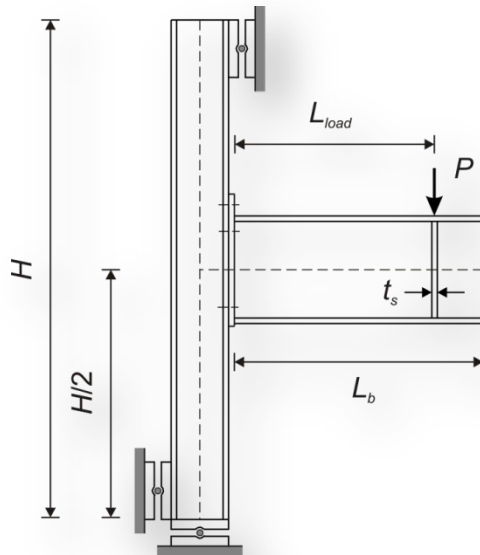
Modelo de elementos finitos. Características del modelo

- Tipo de elemento: sólido lineal.
- Ley de comportamiento del material: trilineal con endurecimiento isotrópico.
- Modelado de tornillos, cordones de soldadura y zonas de contacto.
- Solución con control en desplazamientos.
- Calibración con resultados experimentales (Girão et al, JCSR, 2007).





Aplicación numérica. Variables de diseño

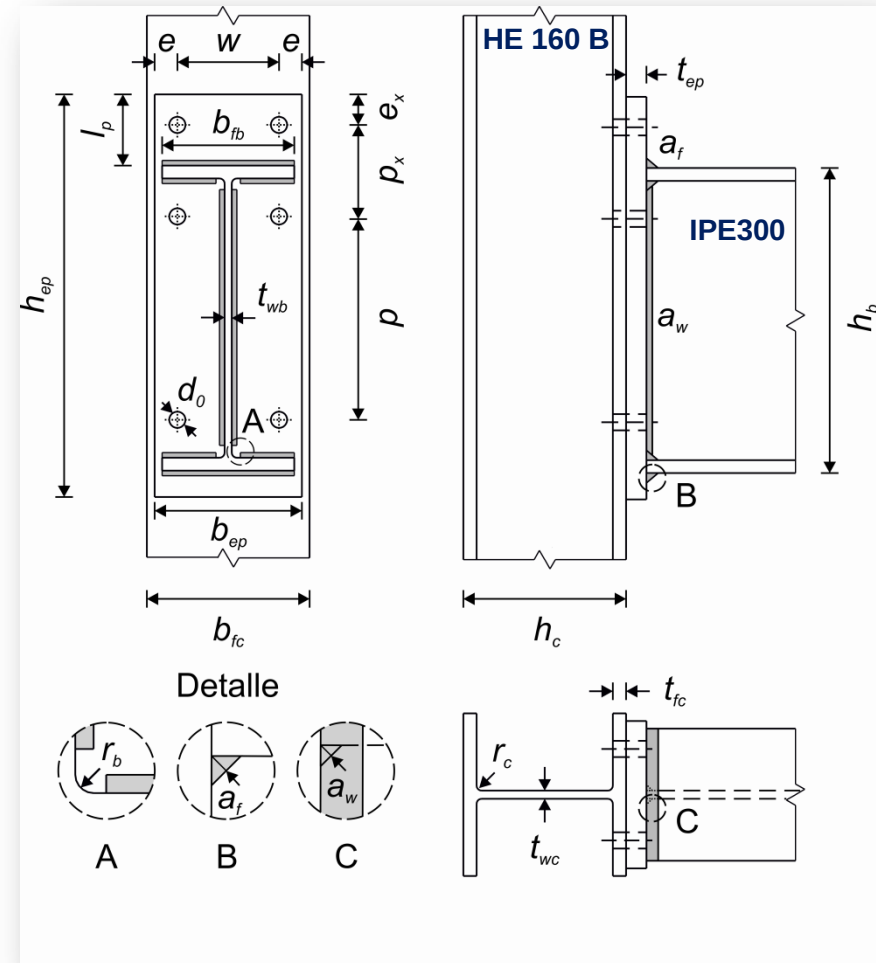


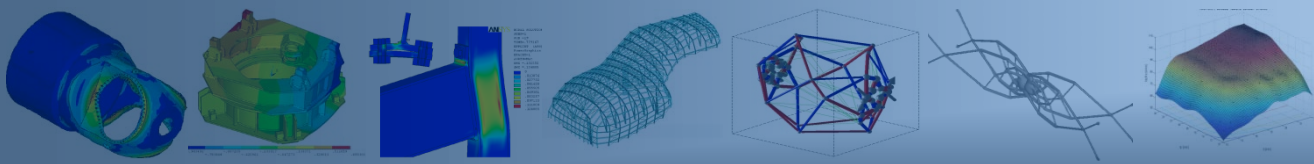
Variables de diseño:

$$12 \text{ mm} \leq d_b \leq 27 \text{ mm}$$

$$10 \text{ mm} \leq t_{ep} \leq 25 \text{ mm}$$

$$85 \text{ mm} \leq p_x \leq 150 \text{ mm}$$





Aplicación numérica. Función objetivo

Función objetivo: coste de la unión

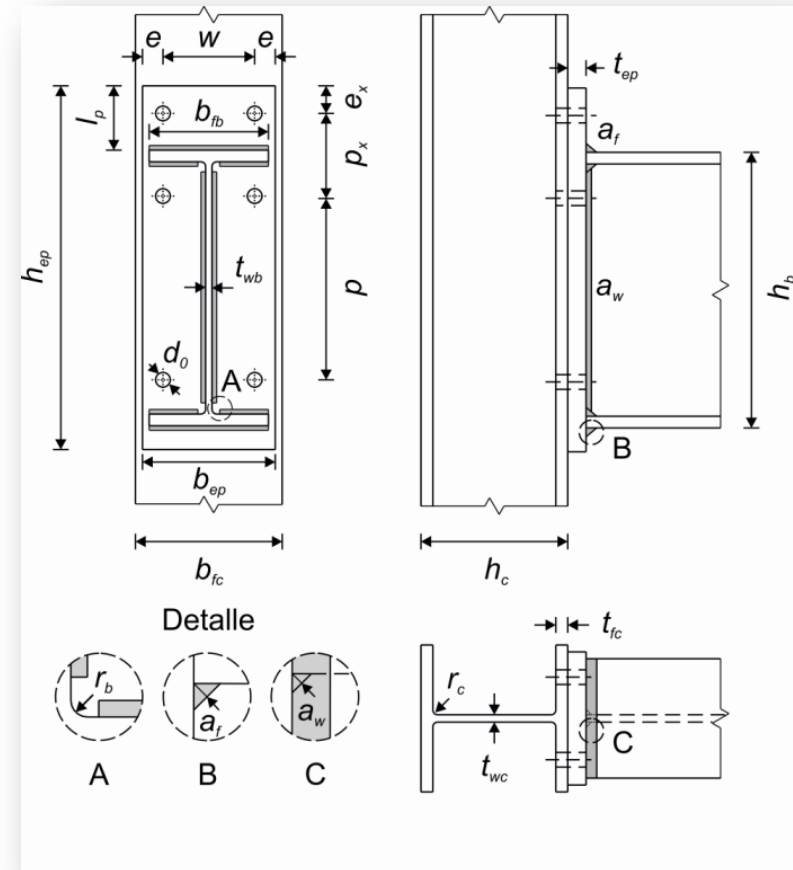
$$C_u = C_p + C_t + C_s + C_m$$

$$C_p = 1.1(b_p h_p t_p) \rho_A$$

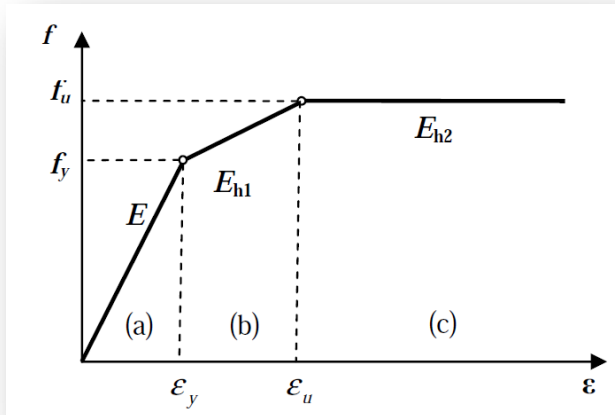
$$C_t = 5 \left[\frac{6\pi d_b^2}{4} (0.65d_b + t_p + t_{fc} + 0.80d_b + 0.5d_b) \right] \rho_A$$

$$C_m = 0.60(b_m h_m t_m) \rho_A$$

$$C_s = 7.30 \left[a_{fp}^2 (2b_{fp} + 2(b_{fp} - 2r_b - t_{wb})) + 2a_{wp}^2 (hb - 2t_{fb} - 2r_b) \right] \rho_A$$



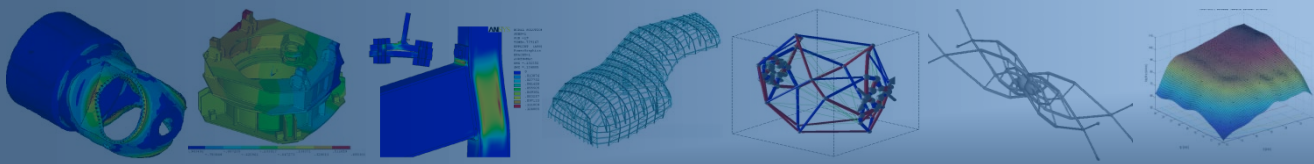
Aplicación numérica. Parámetros aleatorios



- Región (a): módulo de Young del acero (E).
- Región (b): endurecimiento por deformación.
- Región (c): $E_{h2} = 0.0$.

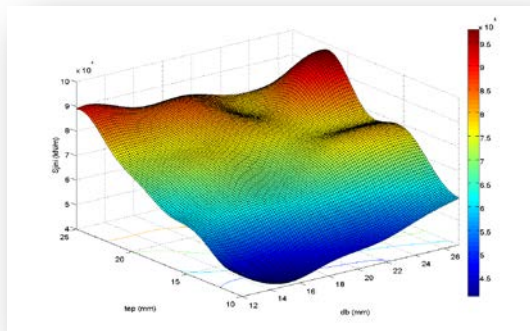
	Nominal (MPa)	Media (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Distribución
$f_{y,ep}$ (placa de testa)	275	306.280	15.630	normal
$f_{y,wb}$ (alma viga)	275	312.142	21.850	normal
$f_{y,fb}$ (ala viga)	275	296.325	20.743	normal
$f_{y,wc}$ (alma columna)	275	312.142	21.850	normal
$f_{y,fc}$ (ala columna)	275	296.325	20.743	normal

L. Simões da Silva et al., JCSR, 2009.

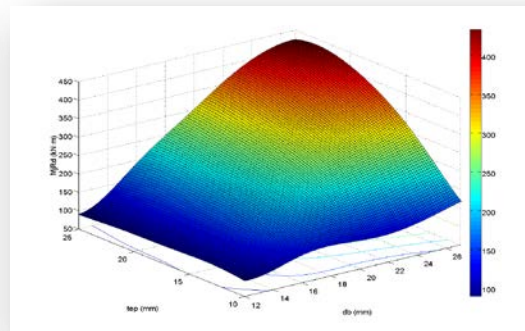


Aplicación numérica. Modelos Kriging

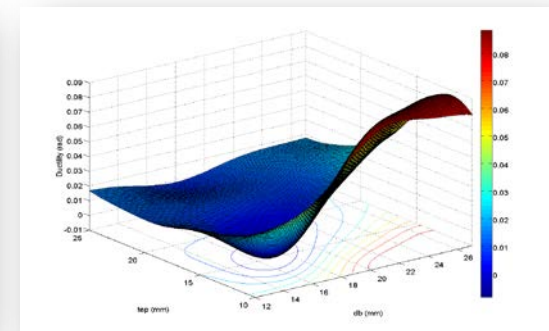
Tamaño de la muestra inicial = 200. Hipercubo Latino (max min(d_{ij}))
Modelos Kriging (regresión lineal y funciones de correlación gaussianas)



$\tilde{M}_{j,Rd}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$

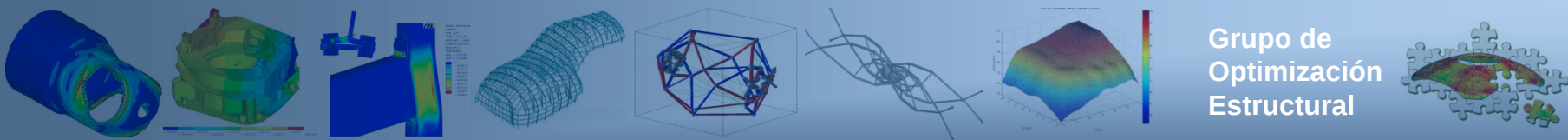


$\tilde{S}_{j,ini}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$



$\tilde{\theta}_u(\mathbf{x}, \mathbf{z})$

	$\tilde{M}_{j,Rd}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$	$\tilde{S}_{j,ini}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$	$\tilde{\theta}_u(\mathbf{x}, \mathbf{z})$	$\tilde{C}_u(\mathbf{x})$
$\text{PRESS}_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{n_s} \sum_{i=1}^{n_s} (y_i - \hat{y}_{i-1})^2}$	11.301	9156.875	0.010	0.357
R^2_{pred}	0.987	0.936	0.909	0.999



Aplicación numérica. Formulaciones

Diseño Óptimo Determinista con restricciones de ductilidad (DOD+D)

$$\min_{\mathbf{x}} C_u(\mathbf{x})$$

$$\text{sujeito a : } \tilde{M}_{j,Rd}(\mathbf{x}) \geq 180 \text{ kNm}$$

$$\tilde{S}_{j,ini}(\mathbf{x}) \leq 66000 \text{ kNm/rad}$$

$$\tilde{S}_{j,ini}(\mathbf{x}) \geq 54000 \text{ kNm/rad}$$

$$\tilde{\theta}_u(\mathbf{x}) \geq 0.040 \text{ rad}$$

$$12 \text{ mm} \leq d_b \leq 27 \text{ mm}$$

$$10 \text{ mm} \leq t_{ep} \leq 25 \text{ mm}$$

$$85 \text{ mm} \leq p_x \leq 150 \text{ mm}$$

Diseño Óptimo Probabilista con restricciones de ductilidad (DOP+D)

$$\min_{\mathbf{x}} C_u(\mathbf{x})$$

$$\text{sujeito a : } \tilde{\mu}_{\tilde{M}_{j,Rd}(\mathbf{x},\mathbf{z})}(\mathbf{x}) - 3\tilde{\sigma}_{\tilde{M}_{j,Rd}(\mathbf{x},\mathbf{z})}(\mathbf{x}) \geq 180 \text{ kNm}$$

$$\tilde{\mu}_{\tilde{S}_{j,Rd}(\mathbf{x},\mathbf{z})}(\mathbf{x}) + 3\tilde{\sigma}_{\tilde{S}_{j,Rd}(\mathbf{x},\mathbf{z})}(\mathbf{x}) \leq 66000 \text{ kNm/rad}$$

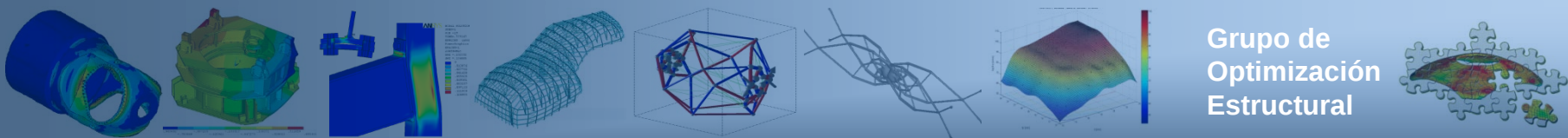
$$\tilde{\mu}_{\tilde{S}_{j,Rd}(\mathbf{x},\mathbf{z})}(\mathbf{x}) - 3\tilde{\sigma}_{\tilde{S}_{j,Rd}(\mathbf{x},\mathbf{z})}(\mathbf{x}) \geq 54000 \text{ kNm/rad}$$

$$\tilde{\mu}_{\tilde{\theta}_u(\mathbf{x},\mathbf{z})}(\mathbf{x}) - 3\tilde{\sigma}_{\tilde{\theta}_u(\mathbf{x},\mathbf{z})}(\mathbf{x}) \geq 0.040 \text{ rad}$$

$$12 \text{ mm} \leq d_b \leq 27 \text{ mm}$$

$$10 \text{ mm} \leq t_{ep} \leq 25 \text{ mm}$$

$$85 \text{ mm} \leq p_x \leq 150 \text{ mm}$$



Aplicación numérica. Verificación de los diseños óptimos

	DOD			DOD+D			DOP+D		
	Kriging	MEF	Dif. (%)	Kriging	MEF	Dif. (%)	Kriging	MEF	Dif. (%)
$\tilde{M}_{j,Rd}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$	180.000	188.835	4.908	180.020	182.351	-1.295	186.101	192.062	-3.203
$\tilde{C}_u(\mathbf{x})$	36.824	37.156	0.902	41.787	42.0532	-0.637	47.132	47.117	0.032
$\tilde{S}_{j,ini}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$	61041	66531	8.994	60735	65694	-8.165	59233	57691	2.604
$\tilde{\theta}_u(\mathbf{x}, \mathbf{z})$	0.024	0.022	8.333	0.040	0.044	10.000	0.044	0.049	11.364

Aplicación numérica. Comparación DOD vs DOD+D

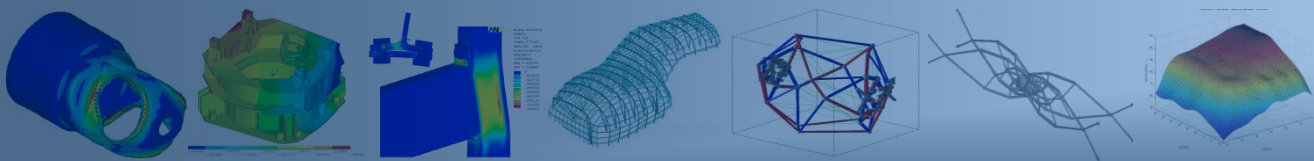
		DOD			DOD+D		
		d_b	t_{ep}	p_x	d_b	t_{ep}	p_x
		17.924	11.161	85.000	20.452	10.698	91.983
$\tilde{M}_{j,Rd}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$	(kNm)		180.000*			180.020*	
$\tilde{C}_u(\mathbf{x})$	(uc)		36.824			41.787 (+13.5 %)	
$\tilde{S}_{j,ini}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$	(kNm/rad)		61041			60735	
$\tilde{\theta}_u(\mathbf{x}, \mathbf{z})$	(rad)		0.024 (-40 %)			0.040*	
(*) restricciones activas. Dimensiones en mm.							

La formulación del problema de diseño óptimo determinista con restricciones de ductilidad (DOD+D) proporciona diseños óptimos con capacidad de rotación suficiente, con un incremento de coste de un 12 % frente al diseño óptimo determinista sin restricciones de ductilidad (DOD).

Aplicación numérica. Comparación DOD+D vs DOP+D

		DOD+D			DOP+D			
		d_b	t_{ep}	p_x	d_b	t_{ep}	p_x	
		20.452	10.698	91.983	19.654	12.904	120.658	$\mu - 3\sigma$
$\tilde{M}_{j,Rd}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$	(kNm)	180.020*			186.101			186.006*
$\tilde{C}_u(\mathbf{x})$	(uc)	41.787			47.132 (+12.8 %)			
$\tilde{S}_{j,ini}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$	(kNm/rad)	60735			59233			58344
$\tilde{\theta}_u(\mathbf{x}, \mathbf{z})$	(rad)	0.040*			0.044			0.040*
(*) restricciones activas.								
Dimensiones en mm.								

La formulación del problema de diseño óptimo probabilista con restricciones de ductilidad (DOP+D) proporciona diseños óptimos fiables, con un incremento de coste de un 12,8 % frente al diseño óptimo determinista con restricciones de ductilidad (DOD+D).



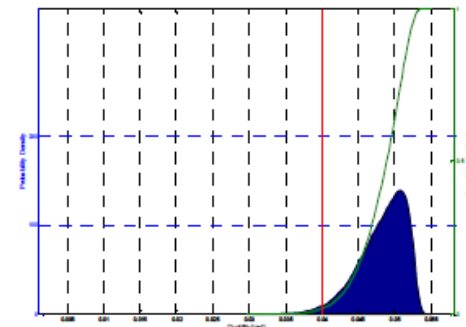
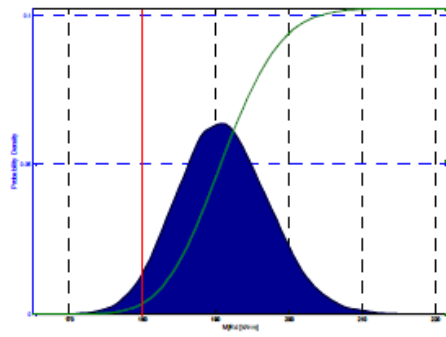
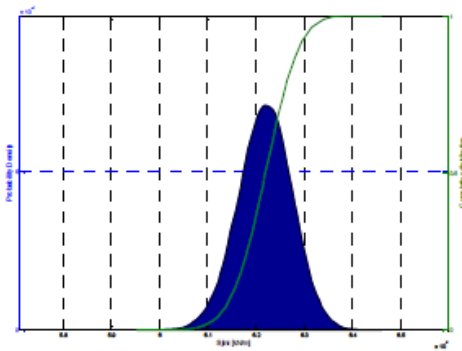
Aplicación numérica. Comparación de diseños óptimos

$$\tilde{S}_{j,ini}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$$

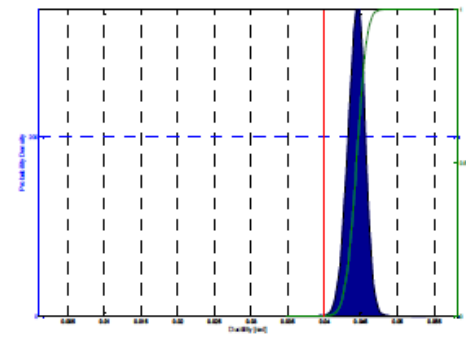
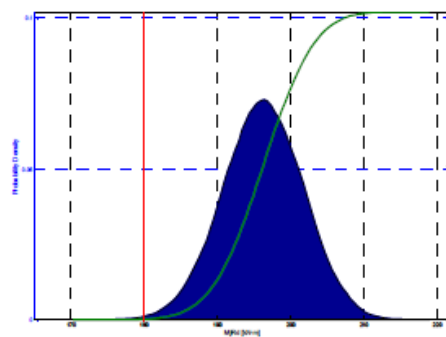
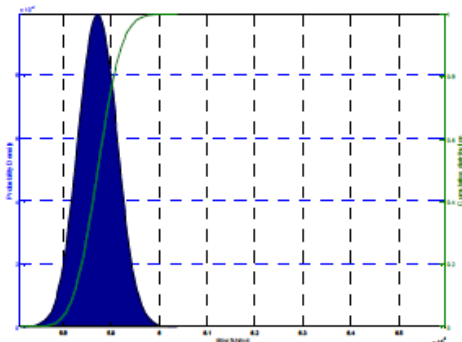
$$\tilde{M}_{j,Rd}(\mathbf{x}, \mathbf{z})$$

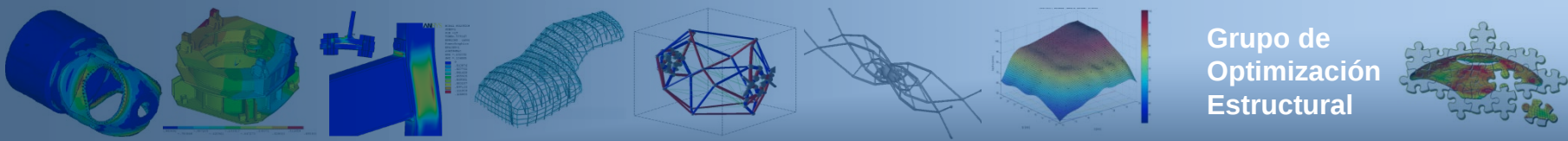
$$\tilde{\theta}_u(\mathbf{x}, \mathbf{z})$$

DOD+D



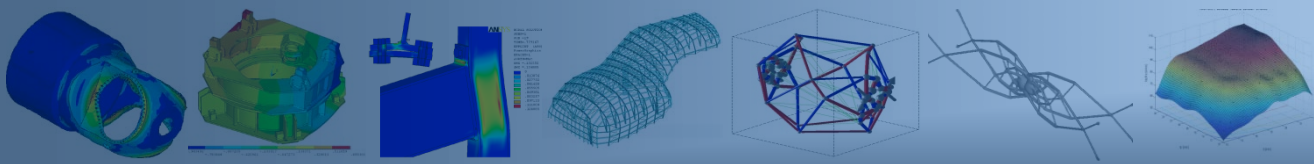
DOP+D





Conclusiones y trabajos futuros

- La metodología propuesta es muy prometedora, tanto para el diseño óptimo probabilista de las uniones semirrígidas como para el estudio del comportamiento de las mismas.
- Los resultados obtenidos muestran la necesidad de imponer condiciones de capacidad de rotación de la unión, con el fin de que los diseños óptimos obtenidos tengan suficiente ductilidad.
- La utilización de diseños óptimos deterministas puede dar lugar a diseños óptimos cuya ductilidad real sea muy inferior a la esperada.
- Es necesario realizar una mayor experimentación numérica, considerando diferentes uniones con diferentes modos de fallo.



Gracias por su atención
Obrigado pela atenção
Thanks for your attention