

Tesis Doctoral



**Universidad
de Cantabria**

**Seguridad, Fiabilidad y Análisis de
Sensibilidad en Obras de Ingeniería Civil
Mediante Técnicas de Optimización por
Descomposición. Aplicaciones.**

**Departamento de Matemática
Aplicada y Ciencias de La
Computación**

Autor:

Roberto Mínguez Solana

Director de tesis:

Enrique Castillo Ron

Santander, 2003



**Universidad de
Castilla-La Mancha**

Índice de la Presentación

1.- Estado del conocimiento.

1.1.- Fiabilidad.

1.1.1.- Conceptos fundamentales, región de fallo y ecuación de estado límite.

1.1.2.- Niveles.

1.2.- Diseño ingenieril como problema de optimización.

1.2.1.- Diseño clásico.

1.2.2.- Diseño probabilista.

1.3.- Sensibilidad.

1.3.1.- Motivación y justificación.

1.3.2.- Métodos basados en la dualidad.



Índice de la Presentación

2.- Contribuciones originales de esta tesis.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

- Cálculo de probabilidades de fallo.
- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.
- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.3.- Propuestas al dilema coeficientes de seguridad- probabilidades de fallo.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución de problemas de optimización.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.



PARTE 1: ESTADO DEL CONOCIMIENTO



1.1.1.-Conceptos fundamentales, región de fallo y ecuación de estado límite.

1.- Estado del conocimiento.

1.1.- Fiabilidad.

1.1.1.- Conceptos fundamentales, región de fallo y ecuación de estado límite.

1.1.2.- Niveles.

1.2.- Diseño ingenieril como problema de optimización.

1.2.1.- Diseño clásico.

1.2.2.- Diseño probabilista.

1.3.- Sensibilidad.

1.3.1.- Motivación y justificación.

1.3.2.- Métodos basados en la dualidad.

Conceptos Fundamentales

Sea (X_1, X_2, \dots, X_n) el conjunto de variables de diseño o factores de proyecto (resistencias, sobrecargas, dimensiones,...). Y $g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ la siguiente función:

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{h_R(x_1, x_2, \dots, x_n)}{h_S(x_1, x_2, \dots, x_n)} - 1$$

donde $h_R(x_1, x_2, \dots, x_n)$ y $h_S(x_1, x_2, \dots, x_n)$ son las magnitudes que favorecen la seguridad (normalmente términos asociados a las resistencias) frente al estado límite considerado, y la superación del mismo (usualmente cargas o momentos que actúan), respectivamente.

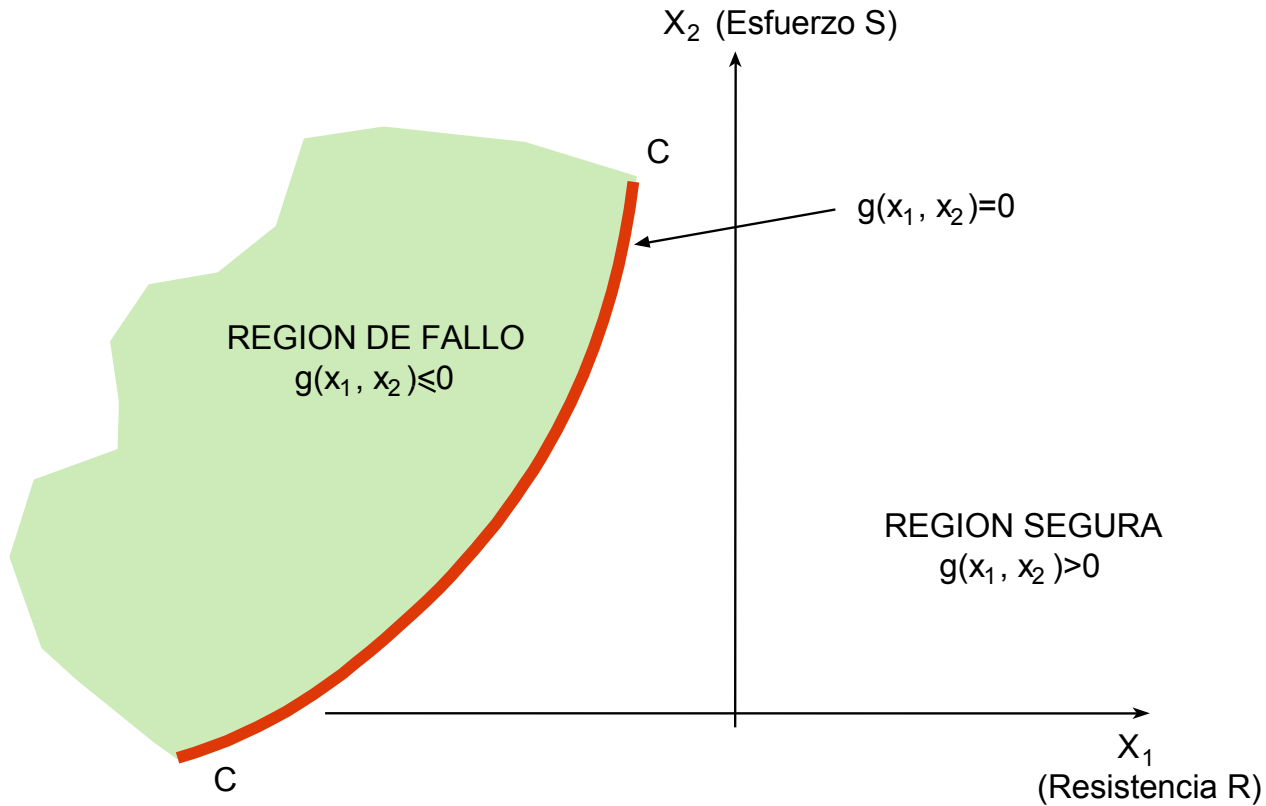
La ecuación de estado límite $g(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ divide el espacio n-dimensional en dos regiones:

Región segura: $\mathcal{S} \equiv \{(x_1, x_2, \dots, x_n) \mid g(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0\}$

Región de fallo: $\mathcal{F} \equiv \{(x_1, x_2, \dots, x_n) \mid g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0\}$

Conceptos Fundamentales

Región segura: $\mathcal{S} \equiv \{(x_1, x_2, \dots, x_n) \mid g(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0\}$



Región de fallo: $\mathcal{F} \equiv \{(x_1, x_2, \dots, x_n) \mid g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0\}$

1.1.2.-Niveles de fiabilidad.

1.- Estado del conocimiento.

1.1.- Fiabilidad.

1.1.1.- Conceptos fundamentales, región de fallo y ecuación de estado límite.

1.1.2.- Niveles de fiabilidad.

1.2.- Diseño ingenieril como problema de optimización.

1.2.1.- Diseño clásico.

1.2.2.- Diseño probabilista.

1.3.- Sensibilidad.

1.3.1.- Motivación y justificación.

1.3.2.- Métodos basados en la dualidad.

Determinación de la Fiabilidad (Nivel I)

Desde los trabajos pioneros de Freudenthal en la década de los cincuenta, en los que comenzó a introducir los conceptos estadísticos para calcular la probabilidad de fallo, se han desarrollado metodologías que nos permiten dividir los métodos para tratar los problemas relativos a la fiabilidad en varios niveles:

- **Nivel 1:** Método clásico basado en coeficientes de seguridad. Las variables se consideran deterministas e iguales a sus valores nominales.

Coef. de
Seguridad
Global

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{h_R(x_1, x_2, \dots, x_n)}{h_S(x_1, x_2, \dots, x_n)} - F > 0$$

donde F es el coeficiente de seguridad ($F > 1$).

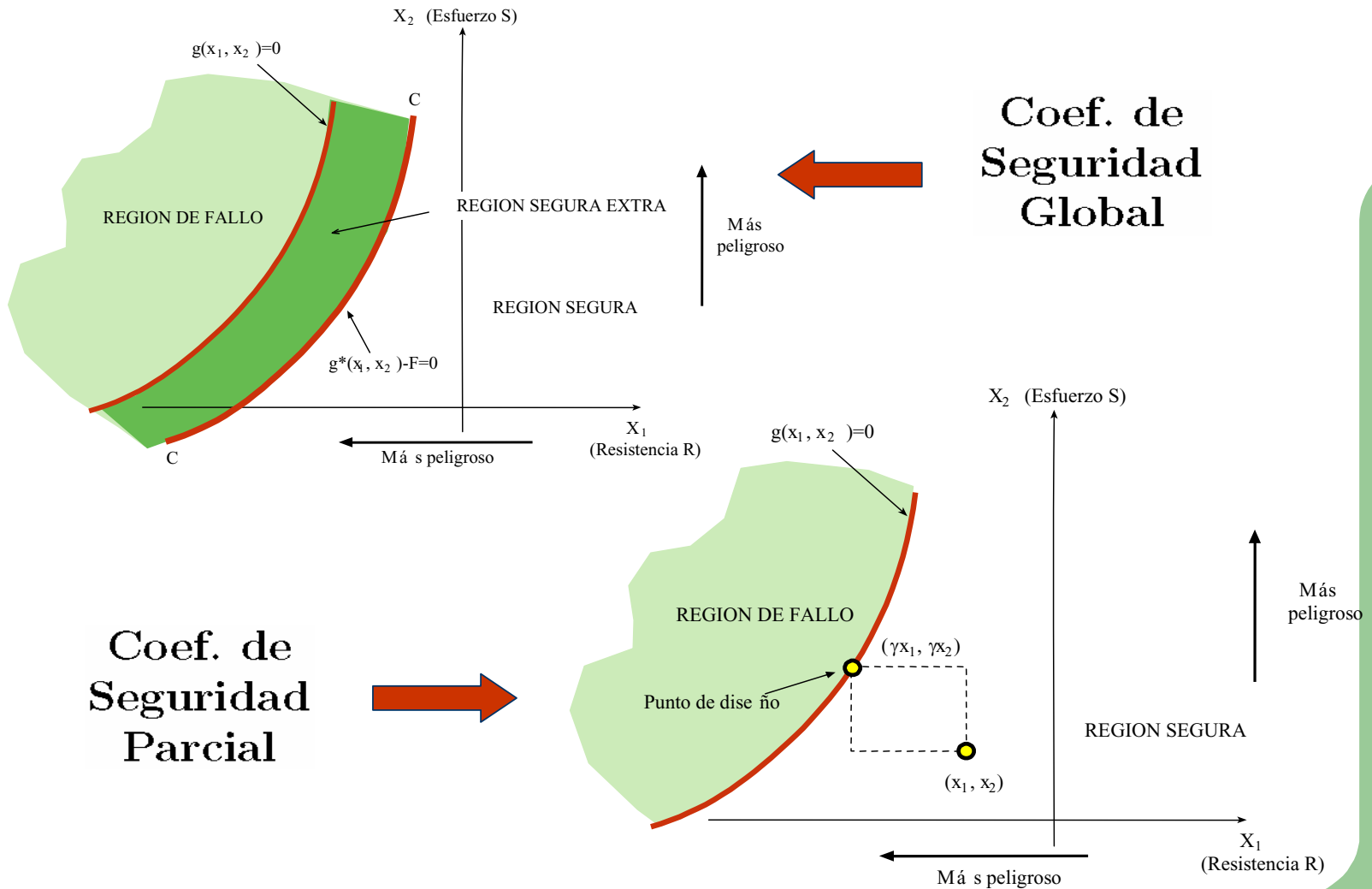
Coef. de
Seguridad
Parcial

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{h_R(\gamma_1 x_1, \gamma_2 x_2, \dots, \gamma_n x_n)}{h_S(\gamma_1 x_1, \gamma_2 x_2, \dots, \gamma_n x_n)} - 1 > 0$$

donde $\gamma_i; i = 1, \dots, n$ son coeficientes parciales de seguridad,
 $\gamma_i < 1$ para variables que favorezcan la seguridad (resistencias)
y $\gamma_i > 1$ para las que favorezcan la inseguridad (cargas).



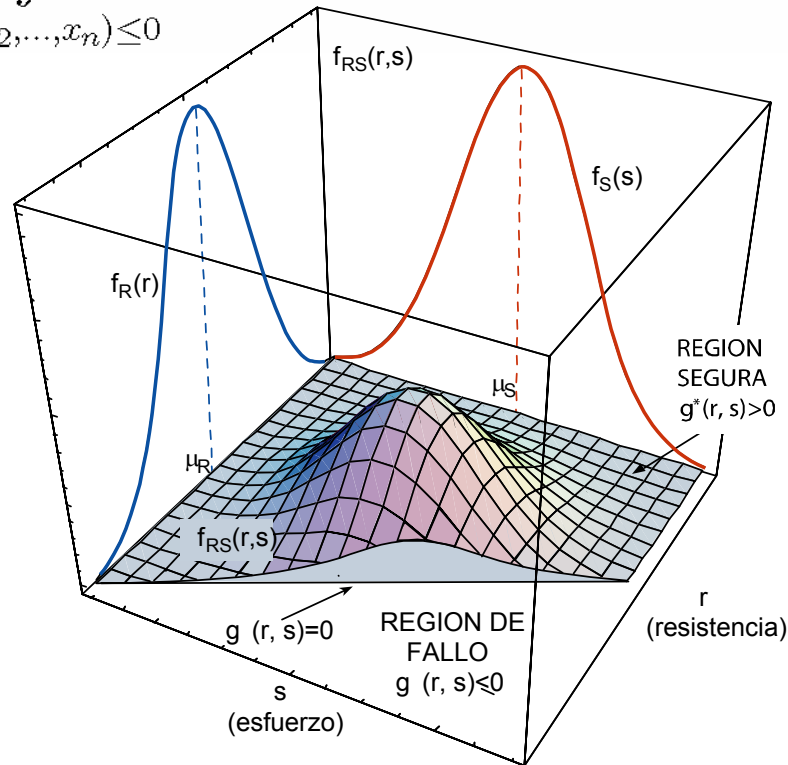
Determinación de la Fiabilidad (Nivel I)



Determinación de la Fiabilidad (Nivel II)

- **Nivel 2:** Método moderno que trabaja con variables aleatorias y que trata de obtener la probabilidad de fallo, p_f , como:

$$p_f(\Theta) = \int_{g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0} f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n; \Theta) dx_1 dx_2 \dots dx_n$$



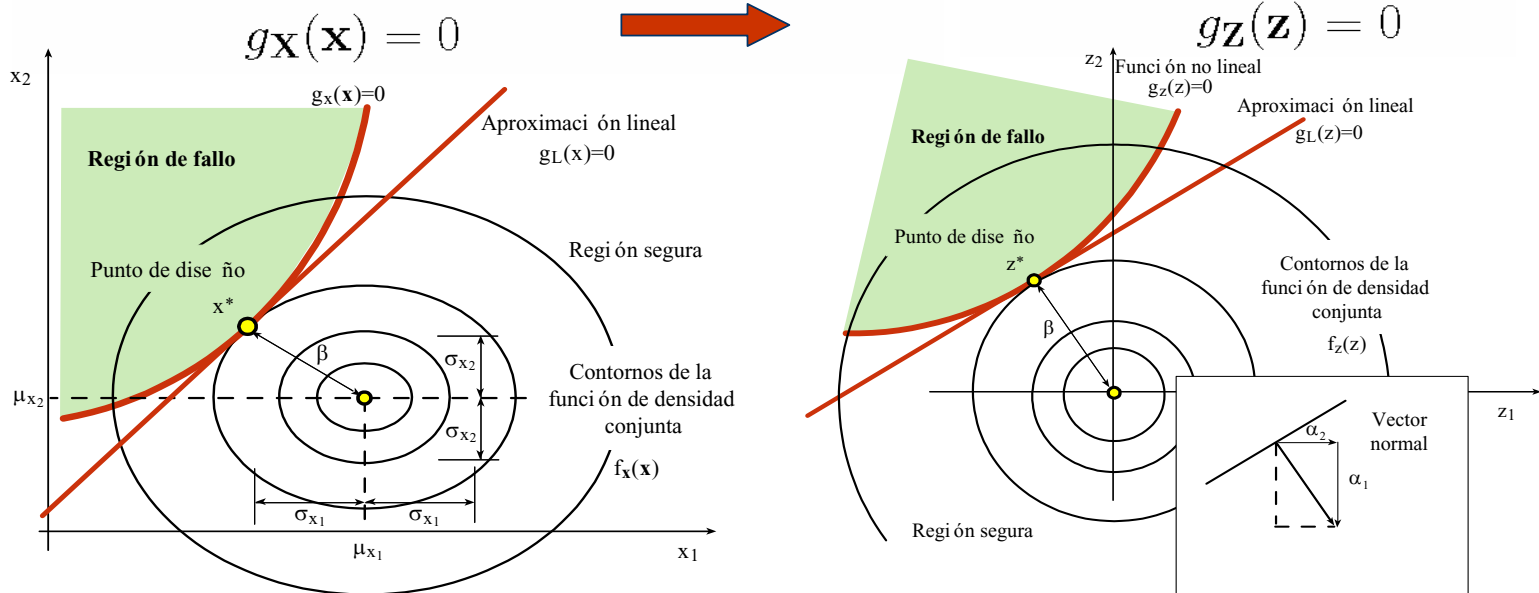
Determinación de la Fiabilidad (Nivel II)

Teoría lineal de momentos de segundo orden (FOSM, 'First Order Second Moment') en el que se calcula el índice de fiabilidad de Hasofer-Lind (β), medida invariante de la fiabilidad:

$$\beta = \underset{\mathbf{x}}{\text{Mínimo}} \sqrt{(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_X)^T \boldsymbol{\sigma}_X^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_X)}$$

$$\beta = \underset{\mathbf{z}}{\text{Mínimo}} \sqrt{\mathbf{z}^T \mathbf{z}}$$

sometido a **Transformación ortogonal** sometido a

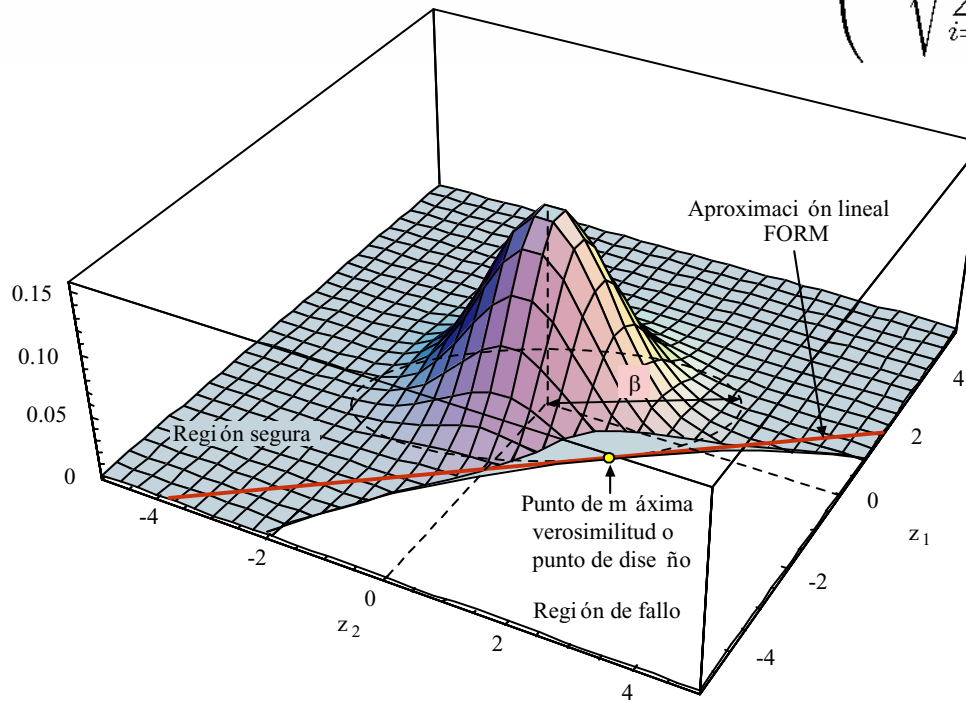


Determinación de la Fiabilidad (Nivel II)

Linealizando la ecuación de estado límite en el punto de diseño

$$G_L(\mathbf{X}) = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + \dots + a_nX_n$$

$$p_f \approx P\left(\sum_{i=1}^n a_i X_i \leq -a_0\right) = F_N\left(\sum_{i=1}^n a_i \mu_{X_i}, \sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_{X_i}^2\right)(-a_0) = \Phi\left(\frac{-a_0 - \sum_{i=1}^n a_i \mu_{X_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n a_i^2 \sigma_{X_i}^2}}\right) = \Phi(-\beta)$$



Determinación de la Fiabilidad (Nivel III)

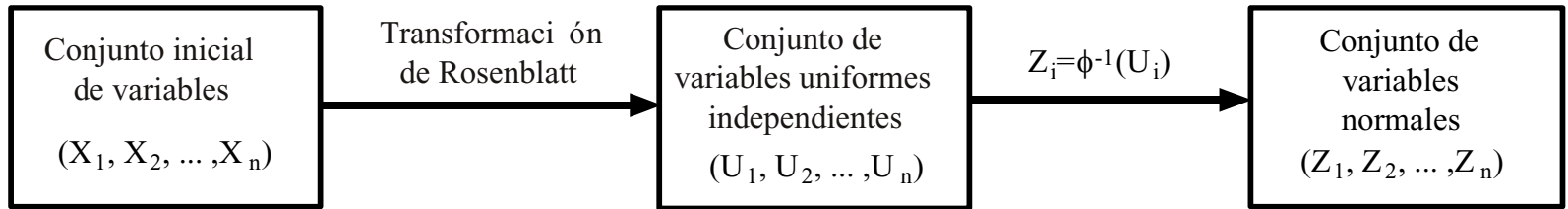
- **Nivel 3:** Para el cálculo de la probabilidad de fallo se utiliza la función de densidad conjunta global, y se trata de calcular la probabilidad de fallo exacta. Estos métodos requieren fórmulas especiales de integración y metodologías específicas.

$$p_f(\Theta) = \int_{g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0} f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n; \Theta) dx_1 dx_2 \dots dx_n$$

1. Métodos de integración.
2. Métodos de simulación.
 - a) Simulación cruda de Monte Carlo.
 - b) Simulación ponderada (Importance Sampling).
 - c) Simulación direccional.
3. Métodos de fiabilidad de primer orden (FORM, 'First Order Reliability Methods').
4. Métodos de segundo orden (SORM, 'Second Order Reliability Methods')

Determinación de la Fiabilidad (FORM)

La metodología FORM es exactamente la misma que en el método FOSM lo único que cambia es la transformación de las variables aleatorias $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ al espacio normal estándar multivariado $\mathbf{Z} = (Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$, que al trabajar con las funciones de densidad exactas requieran métodos de transformación especiales.



Transformación de Rosenblatt

$$\begin{aligned}
 u_1 &= F_1(x_1) \\
 u_2 &= F_2(x_2|x_1) \\
 \vdots & \\
 u_n &= F_n(x_n|x_1, x_2, \dots, x_{n-1})
 \end{aligned}$$



Transformación normal

$$\begin{aligned}
 z_1 &= \Phi^{-1}(u_1) \\
 z_2 &= \Phi^{-1}(u_2) \\
 \vdots & \\
 z_n &= \Phi^{-1}(u_n)
 \end{aligned}$$

Determinación de la Fiabilidad (SORM)

Los métodos de segundo orden tratan de aproximar las ecuaciones de estado límite último por aproximaciones parabólicas o esféricas en el entorno del punto de diseño o de máxima verosimilitud.

Tras una aproximación parabólica de la región de fallo, la integral para calcular la probabilidad de fallo (p_f) puede expresarse de la siguiente manera:

$$R = 1 - p_f = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x_1) \dots \phi(x_{n-1}) \int_{-\infty}^{\beta + \sum_{i=1}^{n-1} k_i x_i^2 / 2} \phi(x_n) dx_n dx_{n-1} \dots dx_1$$

Breitung obtuvo una fórmula asintótica que aproxima la probabilidad exacta de fallo cuando $\beta \rightarrow \infty$:

$$p_f = \Phi(-\beta) \prod_{i=1}^{n-1} (1 + \beta k_i)^{-1/2}$$

donde $\Phi(\cdot)$ es la función de distribución de la variable normal estándar. Esta fórmula es válida sólo si $\beta k_i > -1$ y da buenos resultados con valores altos de β .

1.2.-Diseño ingenieril como problema de optimización.

1.- Estado del conocimiento.

1.1.- Fiabilidad.

1.1.1.- Conceptos fundamentales, región de fallo y ecuación de estado límite.

1.1.2.- Niveles de fiabilidad.

1.2.- Diseño ingenieril como problema de optimización.

1.2.1.- Diseño clásico.

1.2.2.- Diseño probabilista.

1.3.- Sensibilidad.

1.3.1.- Motivación y justificación.

1.3.2.- Métodos basados en la dualidad.

Diseño Ingenieril

Los ingenieros tratando de diseñar estructuras tales como puentes, presas, diques, etc. tienen como objetivo minimizar el coste satisfaciendo las restricciones y requerimientos impuestos. Si no se dispone de herramientas adecuadas, el procedimiento es complicado y requiere de mucha experiencia.

Es entonces cuando surge la optimización estructural, con dos filosofías distintas, íntimamente ligadas a las distintas medidas de la fiabilidad estructural:

1. Optimización estructural determinista (DSO, ‘Deterministic Structural Optimization’) basada en coeficientes de seguridad.
2. Optimización estructural basada en fiabilidad (RBSO, ‘Reliability-Based Structural Optimization’).



1.2.1.-Diseño clásico.

1.- Estado del conocimiento.

1.1.- Fiabilidad.

1.1.1.- Conceptos fundamentales, región de fallo y ecuación de estado límite.

1.1.2.- Niveles de fiabilidad.

1.2.- Diseño ingenieril como problema de optimización.

1.2.1.- Diseño clásico.

1.2.2.- Diseño probabilista.

1.3.- Sensibilidad.

1.3.1.- Motivación y justificación.

1.3.2.- Métodos basados en la dualidad.

Diseño Clásico

Sea (X_1, X_2, \dots, X_n) el conjunto de variables de diseño o factores de proyecto (resistencias, sobrecargas, dimensiones, ...), que pertenecen a un espacio n -dimensional.

Minimizar $c(\tilde{\mathbf{x}})$
 $\tilde{\mathbf{x}}$

sujeto a

$$g_i(\tilde{\mathbf{x}}) \geq F_i^0; \forall i \in I$$

$$r_j(\tilde{\mathbf{x}}) \leq 0; \forall j \in J$$

$$\tilde{\mathbf{x}}^{\text{lo}} \leq \tilde{\mathbf{x}} \leq \tilde{\mathbf{x}}^{\text{up}}$$



1.2.2.-Diseño probabilista.

1.- Estado del conocimiento.

1.1.- Fiabilidad.

1.1.1.- Conceptos fundamentales, región de fallo y ecuación de estado límite.

1.1.2.- Niveles de fiabilidad.

1.2.- Diseño ingenieril como problema de optimización.

1.2.1.- Diseño clásico.

1.2.2.- Diseño probabilista.

1.3.- Sensibilidad.

1.3.1.- Motivación y justificación.

1.3.2.- Métodos basados en la dualidad.

Diseño Probabilista

Sea (X_1, X_2, \dots, X_n) el conjunto de variables de diseño o factores de proyecto (resistencias, sobrecargas, dimensiones, ...), que pertenecen a un espacio n -dimensional.

$$\text{Minimizar } c(\tilde{\mathbf{x}}) + c_{\beta}(\tilde{\mathbf{x}}, \Theta)$$
$$\tilde{\mathbf{x}}$$

sujeto a

$$\beta_i(\tilde{\mathbf{x}}, \Theta) \geq \beta_i^0; \forall i \in I$$

$$r_j(\tilde{\mathbf{x}}) \leq 0; \forall j \in J$$

$$\tilde{\mathbf{x}}^{\text{lo}} \leq \tilde{\mathbf{x}} \leq \tilde{\mathbf{x}}^{\text{up}}$$



1.3.1.-Motivación y Justificación.

1.- Estado del conocimiento.

1.1.- Fiabilidad.

1.1.1.- Conceptos fundamentales, región de fallo y ecuación de estado límite.

1.1.2.- Niveles de fiabilidad.

1.2.- Diseño ingenieril como problema de optimización.

1.2.1.- Diseño clásico.

1.2.2.- Diseño probabilista.

1.3.- Sensibilidad.

1.3.1.- Motivación y justificación.

1.3.2.- Métodos basados en la dualidad.

Sensibilidad

- Hoy en día la gente no se contenta con las soluciones de los problemas, sino que **se exige saber cómo cambian éstas con cambios en los datos e hipótesis**, es decir, un **análisis de sensibilidad**. Esto implica una **importante mejora** en la calidad de estudios y proyectos.
- Desde un punto de vista práctico los análisis de sensibilidad presentan importantes ventajas:
 - Para el **diseñador de códigos**, ya que sabe en todo momento cómo varían el coste y las fiabilidades en función los requerimientos de seguridad y las hipótesis.
 - Para el **proyectista**, ya que conoce cómo influyen todos los parámetros en el coste y en la fiabilidad del sistema.
 - Para el **constructor**, porque conoce qué parámetros influyen más en el coste o en la seguridad.



1.3.2.-Métodos basados en la dualidad.

1.- Estado del conocimiento.

1.1.- Fiabilidad.

1.1.1.- Conceptos fundamentales, región de fallo y ecuación de estado límite.

1.1.2.- Niveles de fiabilidad.

1.2.- Diseño ingenieril como problema de optimización.

1.2.1.- Diseño clásico.

1.2.2.- Diseño probabilista.

1.3.- Sensibilidad.

1.3.1.- Motivación y justificación.

1.3.2.- Métodos basados en la dualidad.

Dualidad en Optimización

Considérese un problema de optimización, denominado *problema primal*:

$$\text{Minimizar } z = f(\mathbf{x})$$

sujeto a

$$\begin{aligned}\mathbf{h}(\mathbf{x}) &= \mathbf{a} \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}) &\leq \mathbf{b}\end{aligned}$$

Todo problema de optimización tiene un problema dual. Para definirlo se necesita la función lagrangiana, que se define como:

$$\mathcal{L}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) = f(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T(\mathbf{h}(\mathbf{x}) - \mathbf{a}) + \boldsymbol{\mu}^T(\mathbf{g}(\mathbf{x}) - \mathbf{b})$$

con lo cual la función dual se define como

$$\begin{aligned}\phi(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) &= \text{Minimum}_{\mathbf{x}} \mathcal{L}(\mathbf{x}, \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \\ &= \text{Minimum}_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{g}(\mathbf{x}) - \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{a} - \boldsymbol{\mu}^T \mathbf{b}\end{aligned}$$

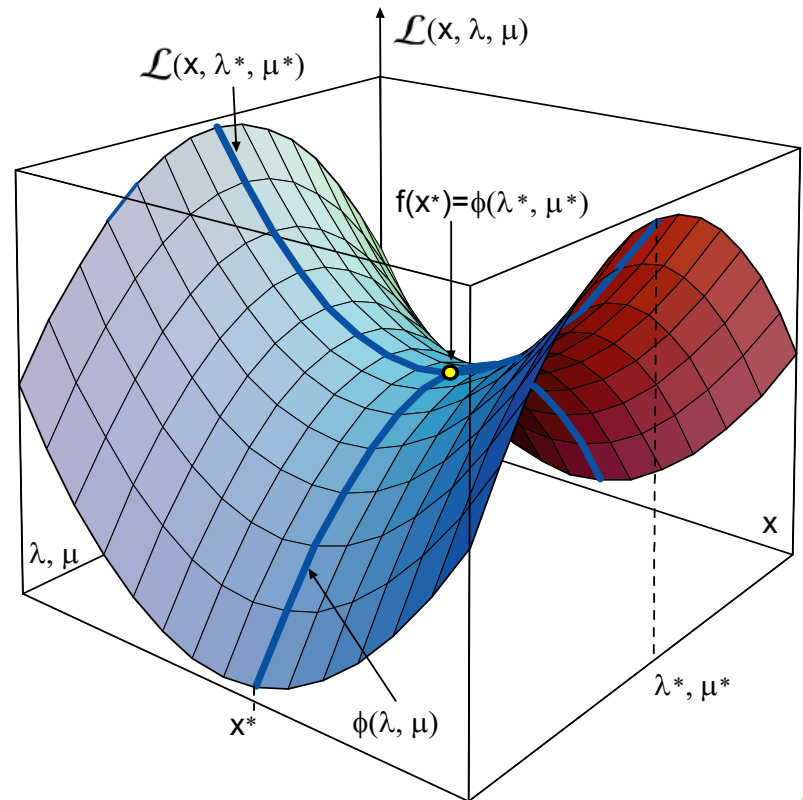
Dualidad en Optimización

El problema dual, por tanto, se define como

$$\begin{aligned} & \text{Maximizar } \phi(\boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}) \\ & \boldsymbol{\lambda}, \boldsymbol{\mu}; \boldsymbol{\mu} \geq 0 \end{aligned}$$

Optimalidad primal y dual

Si $f(\mathbf{x}^) = \phi(\boldsymbol{\lambda}^*, \boldsymbol{\mu}^*)$ para alguna solución factible \mathbf{x}^* del problema primal y para alguna solución factible $(\boldsymbol{\lambda}^*, \boldsymbol{\mu}^*)$ del problema dual, entonces \mathbf{x}^* y $(\boldsymbol{\lambda}^*, \boldsymbol{\mu}^*)$ son las soluciones óptimas del problema primal y dual, respectivamente. Esta solución define un punto de silla del Lagrangiano, que corresponde a un máximo con respecto a $\boldsymbol{\lambda}$ y $\boldsymbol{\mu}$ y a un mínimo con respecto a \mathbf{x} .*



Dualidad en Optimización

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}^*) &= \phi(\boldsymbol{\lambda}^*, \boldsymbol{\mu}^*) = f(\mathbf{x}^*) + \boldsymbol{\lambda}^{*T} \mathbf{h}(\mathbf{x}^*) + \boldsymbol{\mu}^{*T} \mathbf{g}(\mathbf{x}^*) - \boldsymbol{\lambda}^{*T} \mathbf{a} - \boldsymbol{\mu}^{*T} \mathbf{b} \\ &= f(\mathbf{x}^*) + \boldsymbol{\lambda}^{*T} \mathbf{h}(\mathbf{x}^*) + \boldsymbol{\mu}^{*T} \mathbf{g}(\mathbf{x}^*) - \sum_{k=1}^{\ell} \lambda_k^* a_k - \sum_{j=1}^m \mu_j^* b_j \end{aligned}$$

Derivando con respecto a los términos independientes de las restricciones:

$$\left. \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial a_k} \right|_{x^*} = -\lambda_k; \quad \left. \frac{\partial f(\mathbf{x})}{\partial b_j} \right|_{x^*} = -\mu_j,$$

Con lo que se demuestra que las variables duales cambiadas de signo son las sensibilidades de la función objetivo con respecto a los términos independientes de las restricciones.

Ejemplo de Programación Lineal

Primal	Dual
Minimizar $z_P = 40x_1 + 56x_2$ x_1, x_2	Maximizar $z_D = 70\mu_1 + 90\mu_2$ μ_1, μ_2
$4x_1 + 4x_2 \geq a_1$	$4\mu_1 + 3\mu_2 \leq b_1$
$3x_1 + 7x_2 \geq a_2$	$4\mu_1 + 7\mu_2 \leq b_2$
$x_1 \geq 0$	$\mu_1 \geq 0$
$x_2 \geq 0$	$\mu_2 \geq 0$
$a_1 = 70; a_2 = 90$	$b_1 = 40; b_2 = 56$
$x_1 = 65/8; x_2 = 75/8; z_P = 850$	$\mu_1 = 7; \mu_2 = 4; z_D = 850$
$\frac{\partial z_P}{\partial a_1} = \mu_1 = 7;$	$\frac{\partial z_P}{\partial a_2} = \mu_2 = 4;$
$\frac{\partial z_D}{\partial b_1} = x_1 = 65/8;$	$\frac{\partial z_D}{\partial b_2} = x_2 = 75/8$

PARTE 2: CONTRIBUCIONES ORIGINALES



2.1.1.-Cálculo de probabilidades de fallo.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema C.S-P.F.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.

Detección de Problemas a Resolver

La resolución de la integral para el cálculo de la probabilidad de fallo de un diseño ingenieril, tiene dos dificultades principales:

$$p_f(\Theta) = \int_{g(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0} f_{X_1, X_2, \dots, X_n}(x_1, x_2, \dots, x_n; \Theta) dx_1 dx_2 \dots dx_n$$

- 1.-La complejidad de la función de densidad conjunta de los factores de proyecto.
- 2.-La complejidad de la ecuación de estado límite.

Pese a existir métodos de integración para un número reducido de variables, no hay métodos fiables para integrales n -dimensionales cuando el número de variables aumenta.

Detección de Problemas a Resolver

2.1.2.-Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema C.S-P.F.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.



Detección de Problemas a Resolver

Actualmente, para la resolución de problemas relacionados con la ingeniería civil hay dos corrientes:

1. **La clásica**, basada en **coeficientes de seguridad**, en la que se tratan los problemas como deterministas. De esta forma evitan la complicación de los métodos probabilistas y el problema de la sensibilidad a las hipótesis en las colas de las distribuciones.
2. **La probabilista**, basada en el cálculo de la **probabilidad de fallo**, que considera las variables como aleatorias. Así, se evita el desconocimiento de si se está cerca o lejos del fallo y la falta de invarianza de los coeficientes de seguridad.



Detección de Problemas a Resolver

2.1.3.-Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema C.S-P.F.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.



Detección de Problemas a Resolver

$$\text{Minimizar } c(\tilde{\mathbf{x}}) + c_{\beta}(\tilde{\mathbf{x}}, \Theta)$$

sujeto a

$$\beta_i(\tilde{\mathbf{x}}, \Theta) \geq \beta_i^0; \forall i \in I$$

$$r_j(\tilde{\mathbf{x}}) \leq 0; \forall j \in J$$

$$\tilde{\mathbf{x}}^{\text{lo}} \leq \tilde{\mathbf{x}} \leq \tilde{\mathbf{x}}^{\text{up}}$$



$$\beta_i(\tilde{\mathbf{x}}, \Theta) = \underset{\mathbf{z}}{\text{Minimo}} \sqrt{\mathbf{z}^T \mathbf{z}}$$

sujeto a

$$g_i(\mathbf{x}) = 1$$

$$\mathbf{T}(\mathbf{x}, \Theta) = \mathbf{z}$$

2.2.1.-Integración mediante politopos.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema C.S-P.F.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.

Cálculo de Probabilidades de Fallo

A continuación se introduce un nuevo método para calcular probabilidades extremas (de fallo p_f) utilizando politopos. La metodología consta de las siguientes etapas:

- **Etapla 1: Transformación de las variables al hipercubo unitario.** El conjunto inicial de variables se transforma en un conjunto de variables uniformes independientes $U(0, 1)$.

$$\begin{aligned}U_1 &= F_1(X_1) \\U_2 &= F_2(X_2|X_1) \\&\vdots \\U_n &= F_n(X_n|X_1, X_2, \dots, X_{n-1}),\end{aligned}$$

Con lo cual la integral de cálculo de la probabilidad de fallo se transforma en:

$$p_f = \int_{g_U(u_1, u_2, \dots, u_n) \leq 0} du_1 du_2 \dots du_n$$

Integración mediante Politopos

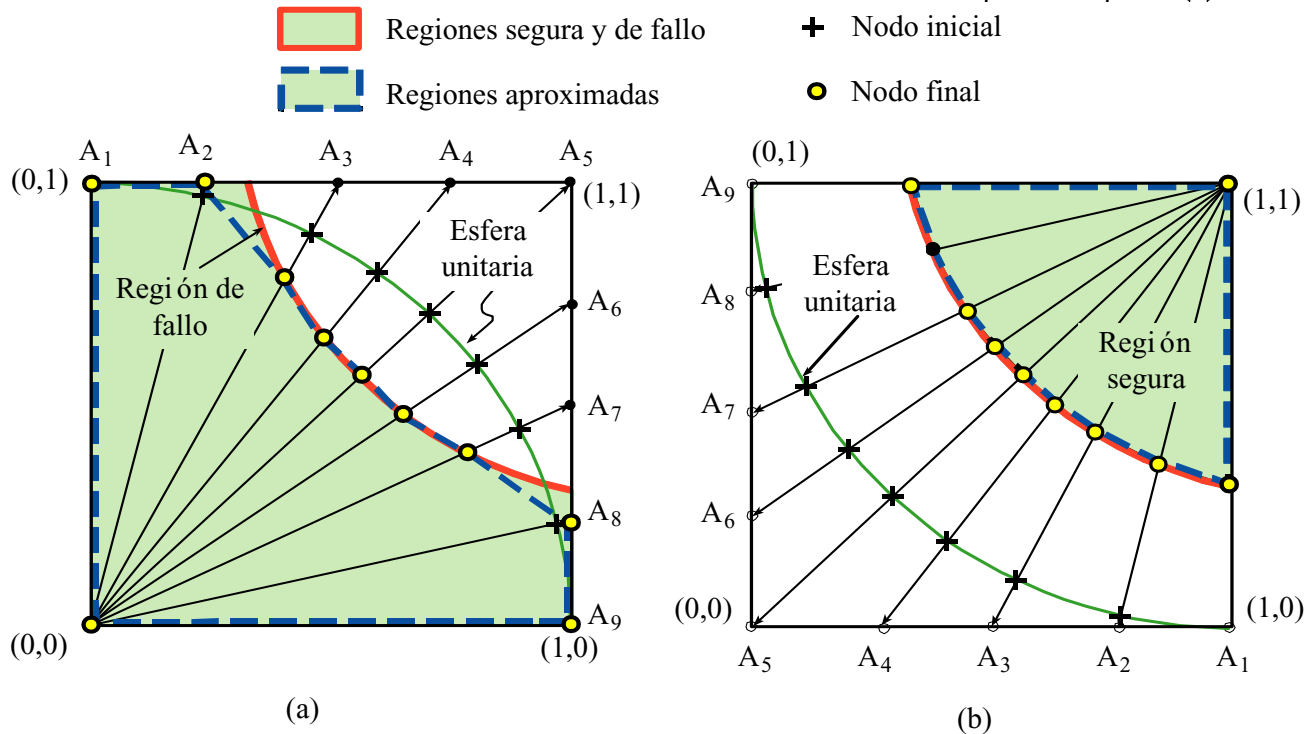
- **Etapa 2: Se fuerza al origen de coordenadas a pertenecer a la región de fallo.** Esto permite ordenar la seguridad de los puntos de diseño contenidos en rayos que parten del origen según su distancia a éste. Cuanto más alejados del origen, más seguros serán.

Sin pérdida de generalidad, se puede asumir que todas las variables aleatorias que intervienen son relevantes, es decir, tales que cualquier cambio en su valor, afecta a la seguridad del sistema en estudio. De otra forma, se podrían eliminar las variables que no tuvieran influencia y disminuir así la dimensión del problema. Esto implica que para cada variable transformada, el peor valor posible es o bien 0 o bien 1. Así, las variables U_k cuyo valor pésimo para la fiabilidad del sistema sea 1, se transformarán a $V_k = 1 - U_k$, así las nuevas variables tendrán sus valores pésimos en el origen de coordenadas. Y consecuentemente, el origen pertenecerá a la región de fallo.



Integración mediante Politopos

- Etapa 3: División de la región de fallo en una serie de **politopos**. Cubriendo la región de fallo por un conjunto de politopos con un vértice común (el origen), y los demás vértices situados en el contorno de la región de fallo, podemos aproximar la probabilidad de fallo como la suma de los volúmenes de todos los politopos generados.



Integración mediante Politopos

- Etapa 4: División de cada politopo en símplexes.** En un espacio n -dimensional, los símplexes son politopos con $n + 1$ vértices. La ventaja de este paso es que no existen fórmulas generales para el cálculo del volumen de un politopo, pero sí para el caso de los símplexes.

	(1, 0, 0)	(1, 1, 0)	(1, 1, 1)
		(1, 0, 1)	(1, 1, 1)
(0, 0, 0)	(0, 1, 0)	(1, 1, 0)	(1, 1, 1)
		(0, 1, 1)	(1, 1, 1)
	(0, 0, 1)	(1, 0, 1)	(1, 1, 1)
		(0, 1, 1)	(1, 1, 1)

Lista de símplexes

$\{(0,0,0), (1,0,0), (1,1,0), (1,1,1)\}$

$\{(0,0,0), (1,0,0), (1,0,1), (1,1,1)\}$

$\{(0,0,0), (0,1,0), (1,1,0), (1,1,1)\}$

$\{(0,0,0), (0,1,0), (0,1,1), (1,1,1)\}$

$\{(0,0,0), (0,0,1), (1,0,1), (1,1,1)\}$

$\{(0,0,0), (0,0,1), (0,1,1), (1,1,1)\}$

Integración mediante Politopos

- **Etapa 5: Evaluación de la integral.** Se evalúa la integral como suma de los volúmenes de los símplexes.

$$\text{Vol}_1 = \frac{1}{n!} \begin{vmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} & 1 \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nn} & 1 \end{vmatrix}; \quad \text{Vol}_2 = \frac{1}{n!} \begin{vmatrix} x_{01} & x_{02} & \dots & x_{0n} & 1 \\ x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} & 1 \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nn} & 1 \end{vmatrix}$$

donde $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})$; $i = 1, 2, \dots, n$ son los vértices correspondientes de los símplexes, y $(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})$ es la intersección del radio vector que pasa por el centro de gravedad del hipercubo considerado. El volumen Vol_2 deberá sumarse o restarse en función de la curvatura de la región de fallo en el punto $(x_{01}, x_{02}, \dots, x_{0n})$.

Ejemplo

Suma de variables normales independientes. En este ejemplo se asume que

$$Z = \sum_{i=1}^n X_i \leq k$$

donde $X_i; i = 1, 2, \dots, n$ son n variables aleatorias normales, independientes e igualmente distribuidas $N(0, 1)$. Esto nos permite comprobar el resultado ya que $Z \sim N(0, 1/\sqrt{n})$, y por tanto, la probabilidad de fallo exacta es p_f :

$$p_f = \Phi\left(\frac{k}{\sqrt{n}}\right),$$

donde $\Phi(\cdot)$ es la función de distribución de la variable normal $N(0, 1)$.

		Método propuesto		Simulación de Monte Carlo		
n	m	Probabilidad aproximada	tiempo de cpu (en ticks)	Número de puntos	Probabilidad Aproximada	tiempo de cpu (en ticks)
		$k = 4$		$k = 4$		
2	2	0.977285	0	10^2	1.000000	0
2	5	0.962304	0	10^3	0.998000	0
2	10	0.993608	0	10^4	0.998200	1
2	20	0.996127	0	10^5	0.997440	10
2	30	0.996875	0	10^6	0.997760	106
2	40	0.997188	0	10^7	0.997640	1051
2	50	0.997346	0	10^8	0.997661	10510
2	∞	0.997433	∞	∞	0.997433	∞
		$k = 5$		$k = 5$		
3	2	0.853527	0	10^2	1.000000	0
3	5	0.910823	0	10^3	1.000000	0
3	10	0.983336	1	10^4	0.998200	1
3	20	0.993683	4	10^5	0.998100	16
3	30	0.995943	7	10^6	0.998040	155
3	40	0.996807	14	10^7	0.998042	1549
3	50	0.997227	22	10^8	0.998054	15494
3	∞	0.997822	∞	∞	0.997822	∞
		$k = 6$		$k = 6$		
4	2	0.609655	0	10^2	1.000000	0
4	5	0.856433	3	10^3	0.999000	0
4	10	0.963625	23	10^4	0.998800	2
4	20	0.988194	185	10^5	0.998730	21
4	30	0.993714	623	10^6	0.998631	205
4	40	0.995799	1469	10^7	0.998644	2055
4	50	0.996777	2867	10^8	0.998721	20540
4	∞	0.998421	∞	∞	0.998421	∞

2.2.2.-Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema C.S-P.F.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.

Integración mediante Gauss-Legendre

A continuación se introduce un nuevo método para calcular probabilidades de fallo p_f mediante las fórmulas de cuadratura de Gauss-Legendre. La metodología consta de las siguientes etapas:

- **Etapla 1: Transformación de las variables al hipercubo unitario.** El conjunto inicial de variables se transforma en un conjunto de variables uniformes independientes $U(0, 1)$.
- **Etapla 2: Se fuerza al origen de coordenadas a pertenecer a la región de fallo.** Así se permite ordenar la seguridad de los puntos de diseño contenidos en rayos que parten del origen según su distancia a éste. Cuanto más alejados del origen, más seguros serán.



Integración mediante Gauss-Legendre

- **Paso 3:** Obtención de las funciones de densidad marginal $f_{V_1, V_2, \dots, V_n}(v_1, v_2, \dots, v_n)$ de las nuevas variables aleatorias y la nueva región de rotura transformada $g_{V_1, V_2, \dots, V_n}(v_1, v_2, \dots, v_n)$.

Con lo cual la integral de cálculo de la probabilidad de fallo se transforma en:

$$p_f = \int_{g_{\mathbf{V}}(v_1, v_2, \dots, v_n) \leq 0} dv_1 dv_2 \dots dv_n$$

Integración mediante Gauss-Legendre

- **Paso 4:** Obtención de la probabilidad de fallo mediante un procedimiento recursivo, basado en la fórmula de cuadratura de Gauss-Legendre.

$$p_f = \int_0^{b_1} \int_0^{b_2(v_1)} \int_0^{b_3(v_1, v_2)} \dots \int_0^{b_k(v_1, v_2, \dots, v_{k-1})} \dots \int_0^{b_n(v_1, v_2, \dots, v_{n-1})} dv_n dv_{n-1} \dots dv_k \dots dv_1$$

$$g(v_1, v_2, \dots, v_n) = 0 \Leftrightarrow g_k^{-1}(v_1, v_2, \dots, v_{k-1}, 0, v_{k+1}, v_{k+2}, \dots, v_n) = v_k$$

$$b_k(v_1, v_2, \dots, v_{k-1}) = \min(g_k^{-1}(v_1, v_2, \dots, v_{k-1}, 0, 0_{k+1}, 0_{k+2}, \dots, 0_n), 1_k)$$

$$I_k = \text{Integral}(v_1, v_2, \dots, v_{k-1})$$

$$I_k = \text{Integral}(v_1, v_2, \dots, v_{k-1}) \simeq \frac{b_k(v_1, v_2, \dots, v_{k-1})}{2} \times \sum_{i=0}^m w_i \text{Integral}\left(v_1, v_2, \dots, v_{k-1}, \frac{z_i b_k(v_1, v_2, \dots, v_{k-1}) + b_k(v_1, v_2, \dots, v_{k-1})}{2}\right)$$

$$\text{Integral}(v_1, v_2, \dots, v_n) = 1$$

Integración mediante Gauss-Legendre

Suma de variables uniformes $U(0, 1)$ independientes

$$\sum_{i=1}^n X_i \leq n/3 - 1, \quad F(x) = \frac{1}{n!} \sum_{r=0}^{\lfloor x \rfloor} (-1)^r \binom{n}{r} (x-r)^n; \quad 0 < x < n,$$

		Óptimo			Normal		Simulación de Monte Carlo		
n	m	Prob. estimada	tiempo. (ticks)	Prob. exacta	Prob. estimada	tiempo (ticks)	Número de puntos	Prob. estimada	tiempo (ticks)
5	2	0.000129	0	0.001097	0.001067	0	10^3	0.001000	0
5	3	0.001058	0	0.001097	0.001097	0	10^4	0.001400	1
5	4	0.001097	0	0.001097	0.001097	0	10^5	0.001010	5
8	2	0.000451	0	0.001469	0.001271	0	10^3	0.001000	0
8	3	0.001428	0	0.001469	0.001471	3	10^5	0.001370	8
8	4	0.001468	2	0.001469	0.001469	26	10^6	0.001445	81
10	2	0.000652	0	0.001269	0.001096	1	10^4	0.001500	1
10	3	0.001244	1	0.001269	0.001272	32	10^5	0.001240	10
10	4	0.001269	23	0.001269	0.001269	438	10^6	0.001314	101
12	2	0.000523	0	0.001007	0.000869	4	10^4	0.000400	1
12	3	0.000998	8	0.001007	0.001010	307	10^6	0.000979	120
12	4	0.001006	280	0.001007	0.001007	7368	10^7	0.000999	1209
15	2	0.000391	1	0.000659	0.000563	36	10^5	0.000490	16
15	3	0.000650	136	0.000659	0.000659	9016	10^7	0.000663	1497
15	4	0.000658	12843	0.000659	0.000659	-	10^8	0.000659	14963



2.3.1.-Diseño mixto global.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema C.S-P.F.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.

Propuestas al dilema

El conjunto inicial de variables de proyecto (X_1, \dots, X_n) puede dividirse en cinco subconjuntos:

- d :** *Variables de diseño.* Son las variables cuyos valores deben obtenerse del procedimiento de optimización.
- η :** *Parámetros.* Conjunto de parámetros fijo en el diseño global controlados por el proyectista.
- ϕ :** *Agentes.* En este conjunto se englobarán todas las variables aleatorias cuyo valor no depende del proyectista, principalmente engloban este grupo las acciones sobre la estructura, o parámetros experimentales poco conocidos.
- κ :** *Parámetros estadísticos.* Constituyen el conjunto de parámetros que definen la variabilidad y dependencia de las variables aleatorias de los vectores **d** , **η** y **ϕ** .
- ψ :** *Variables auxiliares o no básicas.* Aquellas cuyos valores pueden obtenerse a partir de alguno de los subconjuntos anteriores aplicando alguna fórmula.



Diseño mixto global

Minimizar $c(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi})$
 $\bar{\mathbf{d}}$

sujeto a

$$\begin{aligned} g_i(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi}) &\geq F_i^0; \quad \forall i \in I \\ \beta_i(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi}, \boldsymbol{\kappa}) &\geq \beta_i^0; \quad \forall i \in I \\ r_j(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi}) &\leq 0; \quad \forall j \in J \\ \mathbf{h}(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}) &= \boldsymbol{\psi} \\ \bar{\mathbf{d}}^{\text{lo}} &\leq \bar{\mathbf{d}} \leq \bar{\mathbf{d}}^{\text{up}} \end{aligned}$$

2.3.2.-Diseño mixto parcial.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema C.S-P.F.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.

Diseño mixto parcial

Minimizar $c(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi)$
 $\bar{\mathbf{d}}$

sujeto a

$$g_i(\gamma, \bar{\mathbf{d}}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi) \geq 1; \forall i \in I$$

$$\beta_i(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi, \kappa) \geq \beta_i^0; \forall i \in I$$

$$r_j(\gamma, \bar{\mathbf{d}}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi) \leq 0; \forall j \in J$$

$$\mathbf{h}(\gamma, \bar{\mathbf{d}}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}) = \psi$$

$$\bar{\mathbf{d}}^{\text{lo}} \leq \bar{\mathbf{d}} \leq \bar{\mathbf{d}}^{\text{up}}$$

2.3.3.-Diseño general global.

2.- Contribuciones originales.

- 2.1.- Detección de problemas a resolver.
 - 2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.
 - 2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.
 - 2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.
- 2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.
 - 2.2.1.- Integración mediante politopos.
 - 2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.
- 2.3.- Propuestas al dilema C.S-P.F.
 - 2.3.1.- Diseño mixto global.
 - 2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

- 2.3.4.-Diseño general parcial.
- 2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.
- 2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.
 - 2.5.1.- Método de relajación.
 - 2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.
 - 2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.
 - 2.5.4.- Descomposición de Benders.
- 2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.
- 2.7.- Conclusiones.
- 2.8.- Futuras líneas de investigación.
- 2.9.- Publicaciones.

Diseño general global

$$\text{Minimizar } \bar{d} \quad C_{to}(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi, \kappa) = C_{co}(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi) + C_{\beta}(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi, \kappa)$$

sujeto a

$$g_i(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi) \geq F_i^0; \quad \forall i \in I$$

$$\beta_i(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi, \kappa) \geq \beta_i^0; \quad \forall i \in I$$

$$r_j(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi) \leq 0; \quad \forall j \in J$$

$$\mathbf{h}(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}) = \psi$$

$$\bar{d}^{\text{lo}} \leq \bar{d} \leq \bar{d}^{\text{up}}$$

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema C.S-P.F.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.

Diseño general parcial

$$\text{Minimizar}_{\bar{d}} C_{to}(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi, \kappa) = C_{co}(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi) + C_{\beta}(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi, \kappa)$$

sujeto a

$$g_i(\gamma, \bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi) \geq 1; \forall i \in I$$

$$\beta_i(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi, \kappa) > \beta_i^0; \forall i \in I$$

$$r_j(\gamma, \bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi) \leq 0; \forall j \in J$$

$$\mathbf{h}(\gamma, \bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}) = \psi$$

$$\bar{d}^{\text{lo}} \leq \bar{d} \leq \bar{d}^{\text{up}}$$

2.4.-Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema C.S-P.F.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.

Nuevo Método de Análisis de Sensibilidad

Considérese el siguiente problema de optimización donde η_0 es el vector de datos o parámetros con respecto a los cuales se desea obtener la sensibilidad.

$$\text{Minimizar } f(\mathbf{x}, \eta_0)$$

\mathbf{x}

sujeto a

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}, \eta_0) = 0$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \eta_0) \leq 0$$



$$\text{Minimizar } f(\mathbf{x}, \eta)$$

\mathbf{x}, η

sujeto a

$$\mathbf{h}(\mathbf{x}, \eta) = 0$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}, \eta) \leq 0$$

$$\eta = \eta_0 : \lambda$$

donde los valores de las variables duales λ dan la sensibilidad o derivadas parciales de la función objetivo con respecto a los parámetros η_0 .

2.5.1-Método de relajación.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema C.S-P.F.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.

Propuestas a los métodos de resolución

El método de Relajación se emplea para el tratamiento de las restricciones de complicación (relativas a los índices de fiabilidad)

$$\text{Minimizar } c(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi})$$
$$\bar{\mathbf{d}}$$

sujeto a

$$g_i(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi}) \geq F_i^0; \quad \forall i \in I$$
$$\beta_i(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi}, \boldsymbol{\kappa}) \geq \beta_i^0; \quad \forall i \in I$$
$$r_j(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi}) \leq 0; \quad \forall j \in J$$
$$\mathbf{h}(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}) = \boldsymbol{\psi}$$
$$\bar{\mathbf{d}}^{\text{lo}} \leq \bar{\mathbf{d}} \leq \bar{\mathbf{d}}^{\text{up}}$$

Propuestas a los métodos de resolución

Desafortunadamente, las alternativas en las que se tienen restricciones o funciones de coste asociadas a los índices de fiabilidad β no pueden resolverse directamente mediante procedimientos estándar; ya que implican otros problemas de optimización asociados a cada modo de fallo:

$$\beta_i(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi}, \boldsymbol{\kappa}) = \underset{\mathbf{z}}{\text{Minimo}} \sqrt{\mathbf{z}^T \mathbf{z}}$$

sujeto a

$$\begin{aligned}g_i(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\psi}) &= 1 \\ \mathbf{h}(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\phi}) &= \boldsymbol{\psi} \\ \mathbf{T}(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\kappa}) &= \mathbf{z}\end{aligned}$$

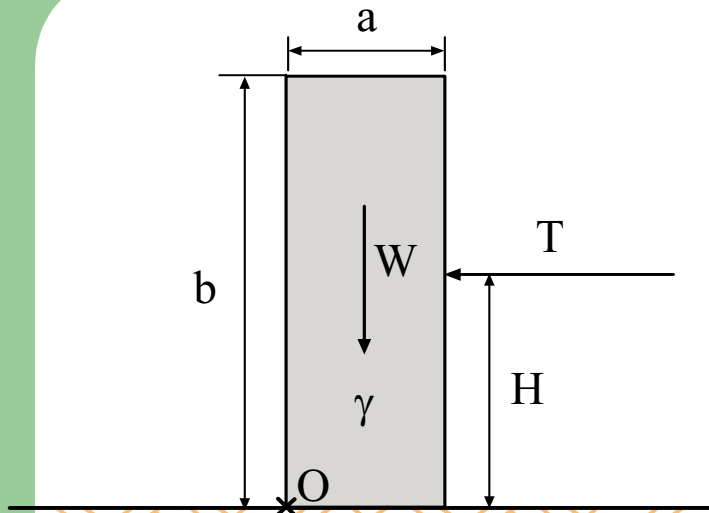
Queda claro, por tanto, que los problemas de optimización basados en fiabilidad se caracterizan por tener dos niveles bien diferenciados:

Nivel 1: Optimización global en las variables \mathbf{d} (problema maestro).

Nivel 2: Estimación de la fiabilidad asociada a cada modo de fallo mediante la resolución del problema anterior (subproblemas).



Propuestas a los métodos de resolución



Variables

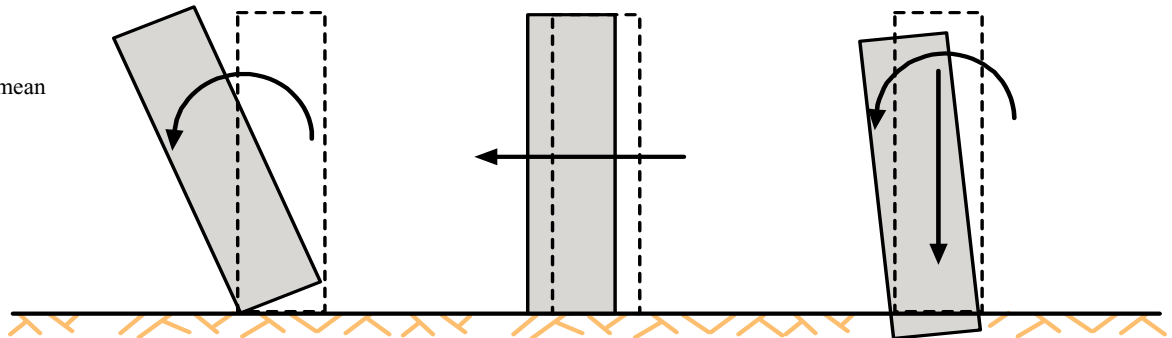
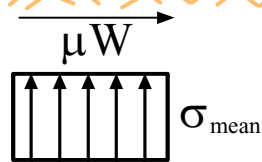
$$d = \{a, b\}$$

$$\eta = \{\gamma\}$$

$$\phi = \{\nu, T, H, S\}$$

$$\kappa = \{\sigma_a, \sigma_b, \sigma_\nu, \sigma_T, \sigma_\gamma, \sigma_H, \sigma_S\}$$

$$\psi = \{W, \sigma_{mean}\}$$



Fallo por
vuelco

Fallo por
deslizamiento

Fallo por
hundimiento

Propuestas a los métodos de resolución

Asumiremos los siguientes modos de fallo:

1. *Fallo por vuelco.*

$$F_o = g_o(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi}) = \frac{W\bar{a}/2}{\tilde{H}\tilde{T}} = \frac{\bar{a}^2\bar{b}\tilde{\gamma}}{2\tilde{H}\tilde{T}} \geq F_o^0$$

2. *Fallo por deslizamiento.*

$$F_s = g_s(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi}) = \frac{\tilde{\nu}W}{\tilde{T}} = \frac{\bar{a}\bar{b}\tilde{\nu}\tilde{\gamma}}{\tilde{T}} \geq F_s^0$$

3. *Fallo por hundimiento de la cimentación.*

$$F_b = g_b(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi}) = \frac{\tilde{S}}{\sigma_{mean}} = \frac{\tilde{S}}{\tilde{\gamma}\bar{b}} \geq F_b^0$$

Lógicamente, el muro será seguro siempre que se cumpla que $F_o, F_s, F_b \geq 1$.

Propuestas a los métodos de resolución

Suponiendo que las variables aleatorias que intervienen son todas normales:

$$a \sim N(\bar{a}, \sigma_a); \quad b \sim N(\bar{b}, \sigma_b); \quad \nu \sim N(\tilde{\nu}, \sigma_\nu);$$

$$T \sim N(\tilde{T}, \sigma_T); \quad \gamma \sim N(\tilde{\gamma}, \sigma_\gamma); \quad H \sim N(\tilde{H}, \sigma_H); \quad S \sim N(\tilde{S}, \sigma_S),$$

La transformación de Rosenblatt particularizada para este ejemplo viene dada por

$$z_1 = \frac{a - \bar{a}}{\sigma_a}; \quad z_2 = \frac{b - \bar{b}}{\sigma_b}; \quad z_3 = \frac{\nu - \tilde{\nu}}{\sigma_\nu}; \quad z_4 = \frac{T - \tilde{T}}{\sigma_T};$$
$$z_5 = \frac{\gamma - \tilde{\gamma}}{\sigma_\gamma}; \quad z_6 = \frac{H - \tilde{H}}{\sigma_H}; \quad z_7 = \frac{S - \tilde{S}}{\sigma_S},$$

El método de relajación consta de los siguientes pasos:

Paso 0: Iniciación.

$$\nu = 1; \quad F_i^{(\nu)} = F_i^0$$

$$\nu = 1;$$

$$F_o^{(1)} = F_o^0$$

$$F_s^{(1)} = F_s^0$$

$$F_b^{(1)} = F_b^0$$

Propuestas a los métodos de resolución

Paso 1: Resolución del problema clásico (maestro).

Minimizar $c(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi)$
 \bar{d}

sujeto a

$$g_i(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi) \geq F_i^{(\nu)} : \forall i \in I$$

$$r_j(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi) \leq 0 : \forall j \in J$$

$$\mathbf{h}(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}) = \psi$$

$$\bar{d}^{\text{lo}} \leq \bar{d} \leq \bar{d}^{\text{up}}$$

Minimizar $\bar{a}\bar{b}$
 \bar{a}, \bar{b}

sujeto a

$$\frac{\bar{a}^2 \bar{b} \tilde{\gamma}}{2\tilde{H}\tilde{T}} \geq F_o^{(\nu)}$$

$$\frac{\bar{a}\bar{b}\bar{\nu}\tilde{\gamma}}{\tilde{T}} \geq F_s^{(\nu)}$$

$$\frac{\tilde{S}}{\tilde{\gamma}\bar{b}} \geq F_b^{(\nu)}$$

$$\bar{b} = 2\bar{a};$$

Propuestas a los métodos de resolución

Paso 2: Evaluación de los índices de fiabilidad (subproblemas).

$\forall i:$

$$\beta_i^{(\nu)} = \underset{\mathbf{z}}{\text{Mínimo}} \sqrt{\mathbf{z}^T \mathbf{z}}$$

sujeto a

$$\begin{aligned} g_i(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}, \phi, \boldsymbol{\psi}) &= 1 \\ \mathbf{h}(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}, \phi) &= \boldsymbol{\psi} \\ \mathbf{T}(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}, \phi, \boldsymbol{\kappa}) &= \mathbf{z} \end{aligned}$$

Para $i = 1, 2, 3:$

$$\beta_i^{(\nu)} = \underset{a, b, \nu, T, \gamma, H, S}{\text{Mínimo}} \sqrt{\sum_{i=1}^7 z_i^2}$$

sujeto a Rosenblatt y

$$\begin{aligned} \frac{a^2 b \gamma}{2HT} &= 1 \\ &\text{ó} \\ \frac{ab\nu\gamma}{T} &= 1 \\ &\text{ó} \\ \frac{S}{\gamma b} &= 1 \end{aligned}$$

Propuestas a los métodos de resolución

Paso 3: Comprobación de la convergencia: Si $\|\beta^{(\nu)} - \beta^{(\nu-1)}\| < \epsilon$ y $\beta^{(\nu)} > \beta^0$ entonces, parar. Si no, ir al paso 4.

Paso 4: Actualizar los coeficientes de seguridad:

$$F_i^{(\nu+1)} = \max \left(F_i^{(\nu)} + \rho(\beta_i^0 - \beta^{(\nu)}), F_i^0 \right)$$

Aumentar ν en una unidad $\nu = \nu + 1$ e ir al paso 1.

Usando los datos siguientes datos:

$$F_o^0 = 1,5; \quad F_s^0 = 1,6; \quad F_b^0 = 1,5; \quad \beta_o^0 = 3; \quad \beta_s^0 = 3; \quad \beta_b^0 = 3,$$

	Variable x						
	a (m)	b (m)	ν	T (kN)	γ (kN/m ³)	H (m)	S (kN/m ²)
$\bar{x} \circ \tilde{x}$	\bar{a}	b	0,3	50	23	3	220
σ_x	0,01	0,01	0,05	1	0,46	0,2	16

Propuestas a los métodos de resolución

t	$cost$	a	b	Límites actuales			Valores reales			Valores reales		
				F_o^0	F_s^0	F_b^0	F_o	F_s	F_b	β_o	β_s	β_b
1	11.594	2.408	4.816	1.500	1.600	1.500	2.140	1.600	1.986	3.456	1.491	6.763
2	20.332	3.189	6.377	1.500	2.807	1.500	4.970	2.806	1.500	10.132	3.245	4.508
3	18.918	3.076	6.152	1.500	2.611	1.500	4.461	2.611	1.555	9.084	3.042	4.832
4	18.672	3.056	6.112	1.500	2.577	1.500	4.374	2.577	1.565	8.900	3.005	4.890
5	18.645	3.054	6.107	1.500	2.573	1.500	4.365	2.573	1.566	8.879	3.000	4.897
6	18.642	3.053	6.107	1.500	2.573	1.500	4.364	2.573	1.566	8.877	3.000	4.897

El procedimiento converge en sólo 6 iteraciones, y la única restricción activa es la asociada a β_s , las demás (F_o , F_s , F_b , β_o y β_b) son inactivas. Esto significa que la restricción del índice de fiabilidad al deslizamiento es tan restrictiva que implica que se cumplan todas las demás.

Nótese que los valores del coeficiente de seguridad al vuelco (4,364) y de su índice de fiabilidad (8,877) son muy altos, lo que implica que es muy poco probable que falle por vuelco.

Método de Relajación (Sensibilidad)

Problema inicial

Minimizar $\bar{a}\bar{b}$
 \bar{a}, \bar{b}

sujeto a

$$\begin{aligned} \frac{\bar{a}^2 \bar{b} \tilde{\gamma}}{2\tilde{H}\tilde{T}} &\geq F_o^{(\nu)} \\ \frac{\bar{a}\bar{b}\tilde{\nu}\tilde{\gamma}}{\tilde{T}} &\geq F_s^{(\nu)} \\ \frac{\tilde{S}}{\tilde{\gamma}\bar{b}} &\geq F_b^{(\nu)} \\ \bar{b} &= 2\bar{a}; \end{aligned}$$

Problema equivalente

Minimizar $\bar{a}\bar{b}$
 $\bar{a}, \bar{b}, \tilde{\nu}^*, \tilde{T}^*, \tilde{\gamma}^*, \tilde{H}^*, \tilde{S}^*$

sujeto a

$$\begin{aligned} \frac{\bar{a}^2 \bar{b} \tilde{\gamma}^*}{2\tilde{H}^* \tilde{T}^*} &\geq F_o^{(\nu)} \\ \frac{\bar{a}\bar{b}\tilde{\nu}^* \tilde{\gamma}^*}{\tilde{T}^*} &\geq F_s^{(\nu)} \\ \frac{\tilde{S}^*}{\tilde{\gamma}^* \bar{b}} &\geq F_b^{(\nu)} \\ \bar{b} &= 2\bar{a} \end{aligned}$$

$$\{\tilde{\nu}^*, \tilde{T}^*, \tilde{\gamma}^*, \tilde{H}^*, \tilde{S}^*\} = \{\tilde{\nu}, \tilde{T}, \tilde{\gamma}, \tilde{H}, \tilde{S}\}$$

Método de Relajación (Sensibilidad)

Problema inicial

Problema equivalente

Para $i = 1, 2, 3$:

$$\beta_i^{(\nu)} = \underset{a, b, \nu, T, \gamma, H, S}{\text{Mínimo}} \sqrt{\sum_{i=1}^7 z_i^2}$$

sujeto a **Rosenblatt** y

$$\begin{aligned} \frac{a^2 b \gamma}{2HT} &= 1 \\ &\text{ó} \\ \frac{ab \nu \gamma}{T} &= 1 \\ &\text{ó} \\ \frac{S}{\gamma b} &= 1 \end{aligned}$$

Mínimo $d, \eta, \phi, \tilde{d}^*, \tilde{\eta}^*, \tilde{\phi}^*, \kappa$ $\sqrt{\sum_{i=1}^7 z_i^2}$

sujeto a **Rosenblatt** y

$$\begin{aligned} \frac{a^2 b \gamma}{2HT} &= 1 \\ &\text{ó} \\ \frac{ab \nu \gamma}{T} &= 1 \\ &\text{ó} \\ \frac{S}{\gamma b} &= 1 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \{\bar{a}^*, \bar{b}^*\} &= \{\bar{a}, \bar{b}\} \\ \tilde{\gamma}^* &= \tilde{\gamma} \\ \{\tilde{\nu}^*, \tilde{T}^*, \tilde{H}^*, \tilde{S}^*\} &= \{\tilde{\nu}, \tilde{T}, \tilde{H}, \tilde{S}\} \\ \{\sigma_a^*, \sigma_b^*, \sigma_\nu^*, \sigma_T^*, \sigma_\gamma^*, \sigma_H^*, \sigma_S^*\} &= \\ &= \{\sigma_a, \sigma_b, \sigma_\nu, \sigma_T, \sigma_\gamma, \sigma_H, \sigma_S\} \end{aligned}$$

Método de Relajación (Sensibilidad)

x	$\frac{\partial c}{\partial x}$	$\frac{\partial \beta_t}{\partial x}$	$\frac{\partial \beta_s}{\partial x}$	$\frac{\partial \beta_b}{\partial x}$
\bar{a}	---	6,095	0,950	0,000
\bar{b}	---	1,521	0,475	-1,440
\bar{v}	-105.047	0,000	16,339	0,000
\bar{T}	0.246	-0,057	-0,038	0,000
$\bar{\gamma}$	-0.813	0,418	0,127	-0,376
\bar{H}	0.000	-2,409	0,000	0,000
\bar{S}	0.000	0,000	0,000	0,062
σ_a	---	-3,294	-0,027	0,000
σ_b	---	-0,205	-0,007	-0,101
σ_v	---	0,000	-40,045	0,000
σ_T	---	-0,430	-0,066	0,000
σ_γ	---	-0,713	-0,022	-0,318
σ_H	---	-10,295	0,000	0,000
σ_S	---	0,000	0,000	-0,297
F_o	0.000	---	---	---
F_s	0.000	---	---	---
F_b	0.000	---	---	---

2.5.2-Mejora de convergencia y sensibilidad.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.

Propuestas a los métodos de resolución

Coeficiente de relajación

$$\Delta F_i^{(\nu)} = \rho(\beta_i^0 - \beta_i^{(\nu)}); \quad i \in I$$



Propuestas a los métodos de resolución

Sólo se puede utilizar cuando se empleen coeficientes de seguridad globales, por tanto el diseño mixto parcial y general parcial no se pueden resolver con este método.



Propuestas a los métodos de resolución

x	$\frac{\partial c}{\partial x}$	$\frac{\partial \beta_t}{\partial x}$	$\frac{\partial \beta_s}{\partial x}$	$\frac{\partial \beta_b}{\partial x}$
\bar{a}	---	6,095	0,950	0,000
\bar{b}	---	1,521	0,475	-1,440
\bar{v}	-105.047	0,000	16,339	0,000
\bar{T}	0.246	-0,057	-0,038	0,000
$\bar{\gamma}$	-0.813	0,418	0,127	-0,376
\bar{H}	0.000	-2,409	0,000	0,000
\bar{S}	0.000	0,000	0,000	0,062
σ_a	---	-3,294	-0,027	0,000
σ_b	---	-0,205	-0,007	-0,101
σ_v	---	0,000	-40,045	0,000
σ_T	---	-0,430	-0,066	0,000
σ_γ	---	-0,713	-0,022	-0,318
σ_H	---	-10,295	0,000	0,000
σ_S	---	0,000	0,000	-0,297
F_o	0.000	---	---	---
F_s	0.000	---	---	---
F_b	0.000	---	---	---

2.5.3-Método de aproximación por hiperplanos.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.

Propuestas a los métodos de resolución

Con el fin de mejorar la convergencia y obtener la sensibilidad del coste con respecto a los índices de fiabilidad se presenta el método de la aproximación por hiperplanos:

$$\text{Minimizar } c(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi})$$

$$\bar{\mathbf{d}}$$

sujeto a

$$g_i(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi}) \geq F_i^0 : \forall i \in I$$

$$\mathbf{h}(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}) = \boldsymbol{\psi}$$

$$\bar{\mathbf{d}}^{\text{lo}} \leq \bar{\mathbf{d}} \leq \bar{\mathbf{d}}^{\text{up}}$$

$$r_j(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi}) \leq 0 : \forall j \in J$$

$$\beta_i^{(s)} + \boldsymbol{\lambda}_i^{(s)T} (\bar{\mathbf{d}} - \bar{\mathbf{d}}^{(s)}) \geq \beta_i^0 : \forall i \in I$$

$$s = 1, 2, \dots, \nu - 1$$

$$\beta_i^{(\nu)} = \text{Mínimo}_{\mathbf{z}, \bar{\mathbf{d}}} \sqrt{\mathbf{z}^T \mathbf{z}}$$

sujeto a

$$g_i(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\psi}) = 1$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\phi}) = \boldsymbol{\psi}$$

$$\mathbf{T}(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\kappa}) = \mathbf{z}$$

$$\bar{\mathbf{d}} = \bar{\mathbf{d}}^{(\nu)} : \boldsymbol{\lambda}_i^{(\nu)}$$

Aproximación por Hiperplanos (Sensibilidad)

x	$\frac{\partial c}{\partial x}$	$\frac{\partial \beta_t}{\partial x}$	$\frac{\partial \beta_s}{\partial x}$	$\frac{\partial \beta_b}{\partial x}$
\bar{a}	---	6,095	0,950	0,000
\bar{b}	---	1,521	0,475	-1,440
\bar{v}	-105.047	0,000	16,339	0,000
\bar{T}	0.246	-0,057	-0,038	0,000
$\bar{\gamma}$	-0.813	0,418	0,127	-0,376
\bar{H}	0.000	-2,409	0,000	0,000
\bar{S}	0.000	0,000	0,000	0,062
σ_a	0.174	-3,294	-0,027	0,000
σ_b	0.043	-0,205	-0,007	-0,101
σ_v	257.455	0,000	-40,045	0,000
σ_T	0.423	-0,430	-0,066	0,000
σ_γ	0.142	-0,713	-0,022	-0,318
σ_H	0.000	-10,295	0,000	0,000
σ_S	0.000	0,000	0,000	-0,297
F_o	0.000	---	---	---
F_s	0.000	---	---	---
F_b	0.000	---	---	---
β_0	0.000	---	---	---
β_s	6.429	---	---	---
β_b	0.000	---	---	---

2.5.4-Descomposición de Benders.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.

Propuestas a los métodos de resolución

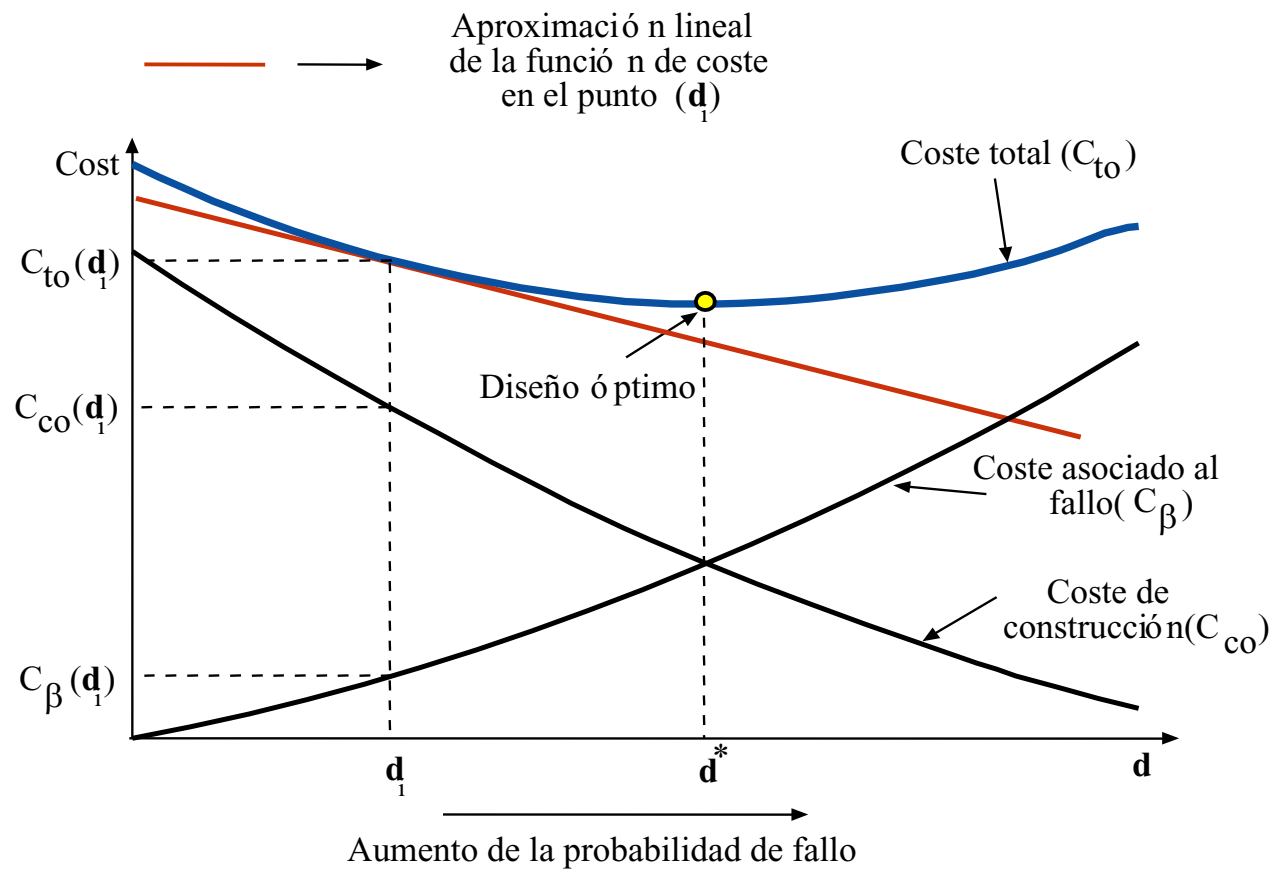
La descomposición de Benders se emplea para el tratamiento de funciones de coste que dependen del índice de fiabilidad β o de la probabilidad de fallo.

$$\text{Minimizar}_{\bar{d}} C_{to}(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi, \kappa) = C_{co}(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi) + C_{\beta}(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi, \kappa)$$

sujeto a

$$\begin{aligned} g_i(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi) &\geq F_i^0; \quad \forall i \in I \\ r_j(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi) &\leq 0; \quad \forall j \in J \\ \mathbf{h}(\bar{d}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}) &= \psi \\ \bar{d}^{\text{lo}} &\leq \bar{d} \leq \bar{d}^{\text{up}} \end{aligned}$$

Propuestas a los métodos de resolución



Propuestas a los métodos de resolución

El algoritmo de la descomposición de Benders procedería de la siguiente manera:

Paso 0: Iniciación de las variables. Se fijan los valores iniciales de las variables de diseño $\bar{\mathbf{d}}_0$. Se hace $\nu = 1$, $\bar{\mathbf{d}}^{(\nu)} = \bar{\mathbf{d}}_0$ y $C_{lo}^{(\nu)} = -\infty$.

Paso 1: Resolución del subproblema. Evaluación de los índices de fiabilidad $\forall i$:

$$\beta_i^{(\nu)} = \underset{\mathbf{z}, \bar{\mathbf{d}}}{\text{Mínimo}} \sqrt{\mathbf{z}^T \mathbf{z}}$$

sujeto a

$$g_i(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\psi}) = 1$$

$$\mathbf{h}(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\phi}) = \boldsymbol{\psi}$$

$$\mathbf{T}(\mathbf{d}, \boldsymbol{\eta}, \boldsymbol{\phi}, \boldsymbol{\kappa}) = \mathbf{z}$$

$$\bar{\mathbf{d}} = \bar{\mathbf{d}}^{(\nu)} : \lambda_i^{(\nu)}$$

Propuestas a los métodos de resolución

Evaluación de la función de coste:

$$C_{to}(\bar{\mathbf{d}}^{(\nu)}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi, \kappa) = C_{co}(\bar{\mathbf{d}}^{(\nu)}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi) + C_{\beta}(\bar{\mathbf{d}}^{(\nu)}, \tilde{\eta}, \tilde{\phi}, \psi, \kappa)$$

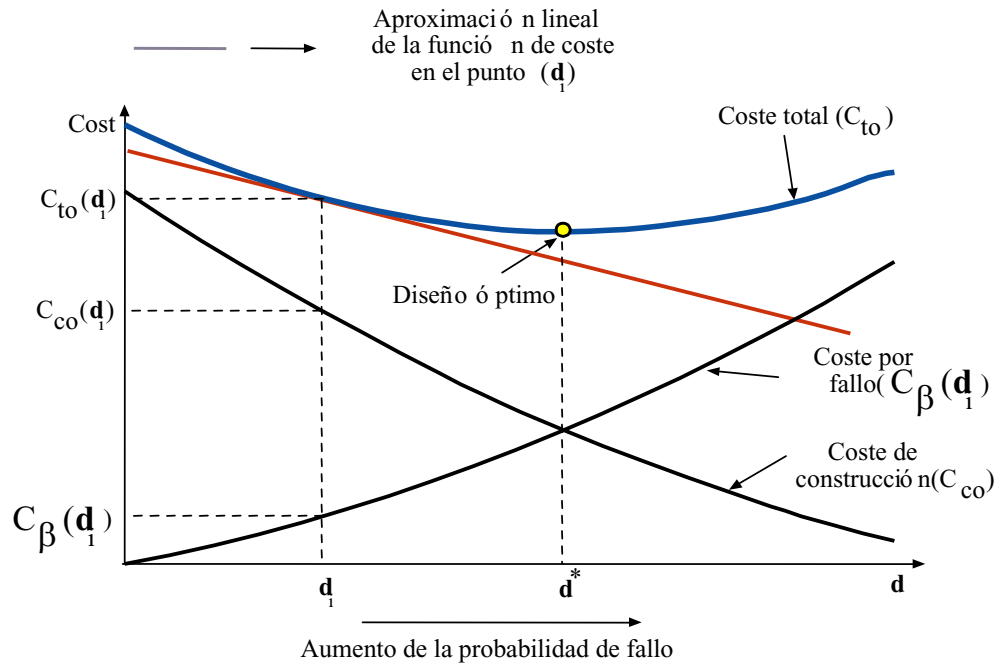
Obtención de las derivadas del coste total con respecto a las variables de diseño:

$$\Omega^{(\nu)} = \frac{\partial C_{to}^{(\nu)}}{\partial \mathbf{d}^{(\nu)}} = \frac{\partial C_{co}}{\partial \mathbf{d}^{(\nu)}} + \frac{\partial C_{\beta}}{\partial \mathbf{d}^{(\nu)}} = \frac{\partial C_{co}}{\partial \mathbf{d}^{(\nu)}} + \sum_{\forall i} \frac{\partial C_{\beta}}{\partial \beta_i^{(\nu)}} \frac{\partial \beta_i^{(\nu)}}{\partial \mathbf{d}^{(\nu)}} \rightarrow \lambda_i^{(\nu)}$$

Actualización del límite superior del valor óptimo del coste a $C_{up}^{(\nu)} = C_{to}^{(\nu)}$.



Propuestas a los métodos de resolución



Paso 2. Comprobación de la convergencia.

Si $|C_{up}^{(\nu)} - C_{lo}^{(\nu)}| / |C_{up}^{(\nu)}| \leq \varepsilon$,

$$C_{to}^* = C_{to}^{(\nu)}; \quad d^* = d^{(\nu)}.$$

En otro caso, hacer $\nu \leftarrow \nu + 1$ e ir al paso 3.

Propuestas a los métodos de resolución

Paso 3. Resolución del problema maestro.

$$\text{Minimizar } \alpha$$

$$\bar{\mathbf{d}}, \alpha$$

sujeto a

$$\alpha \geq C_{to}^{(\nu)} + \Omega^{(i)T} (\bar{\mathbf{d}} - \bar{\mathbf{d}}^{(i)}); \quad \forall i = 1, \dots, \nu - 1$$

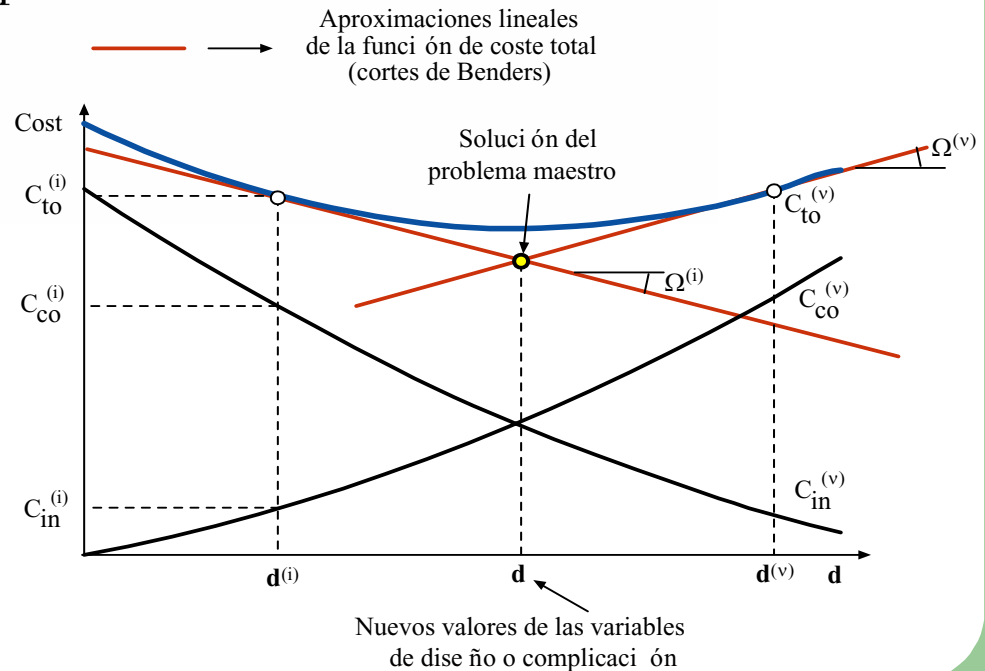
$$g_i(\bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi}) \geq F_i^0; \quad \forall i \in I$$

$$r_j(\boldsymbol{\gamma} \bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}, \boldsymbol{\psi}) \leq 0; \quad \forall j \in J$$

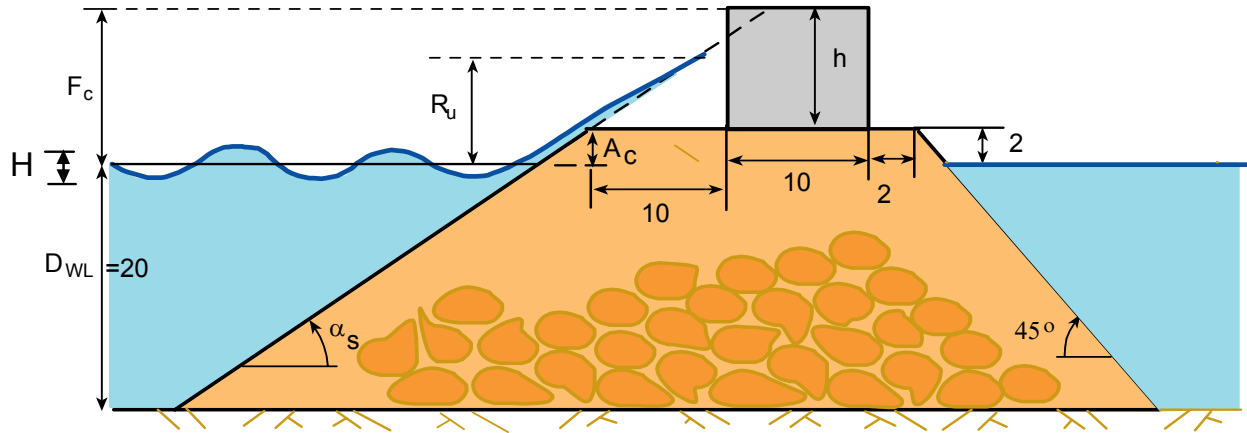
$$\mathbf{h}(\boldsymbol{\gamma} \bar{\mathbf{d}}, \tilde{\boldsymbol{\eta}}, \tilde{\boldsymbol{\phi}}) = \boldsymbol{\psi}$$

$$\bar{\mathbf{d}}^{\text{lo}} \leq \bar{\mathbf{d}} \leq \bar{\mathbf{d}}^{\text{up}}$$

Se obtiene $\mathbf{d}^{(\nu)}$ para la iteración ν . y $C_{\text{lo}}^{(\nu)} = \alpha_{\text{cost}}$ e ir al paso 1.



Propuestas a los métodos de resolución



Variables

$$d = \{F_c, \tan \alpha_s\}$$

$$\eta = \{A_u, B_u, D_{wl}, c_c, c_a\}$$

$$\phi = \{H, T\}$$

$$\kappa = \{H_s, \bar{T}, d_{st}\}$$

$$\psi = \{I_r, v_a, v_c, C_{co}, C_{in}, R_u, L, h\}$$

Función objetivo (costes)

$$C_{co} = c_c v_c + c_a v_a$$

$$C_{in} = 5000 + 1,25 \times 10^6 P_f^{D^2}$$

Hipótesis estadísticas

$$F_H(H) = 1 - e^{-2(H/H_s)^2}; \quad H \geq 0$$

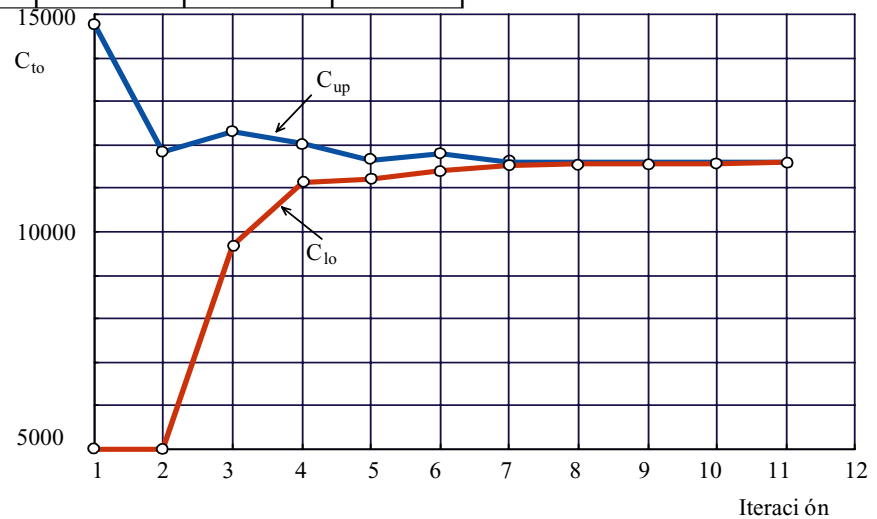
$$F_T(T) = 1 - e^{-0,675(T/\bar{T})^4}; \quad T \geq 0$$

Propuestas a los métodos de resolución

ν	F_c	$\tan \alpha_s$	C_{co}	C_{in}	C_{to}	C_{lo}	C_{up}	error
1	7.00	0.33	6484.8	8297.8	14782.6	5000.0	14782.6	1.9565
2	5.65	0.20	6836.4	5000.0	11836.4	5000.0	11836.4	1.3673
3	9.32	0.50	7296.0	5000.0	12296.0	9682.5	12296.0	0.2699
4	6.52	0.29	6489.7	5542.8	12032.5	11116.5	12032.5	0.0824
5	6.66	0.29	6571.1	5077.2	11648.3	11197.9	11648.3	0.0402
6	7.02	0.29	6786.8	5000.0	11786.8	11413.5	11786.8	0.0327
7	5.98	0.24	6598.6	5007.5	11606.1	11521.9	11606.1	0.0073
8	6.40	0.26	6583.4	5021.2	11604.5	11570.4	11604.5	0.0030
9	6.00	0.24	6553.6	5033.9	11587.5	11571.8	11587.5	0.0014
10	5.67	0.22	6578.7	5020.4	11599.1	11584.6	11599.1	0.0013
11	5.88	0.23	6571.3	5019.8	11591.1	11585.8	11591.1	0.0005

$$\beta = 4,738$$

$$p_f^D = 0,000398$$



2.6.-Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

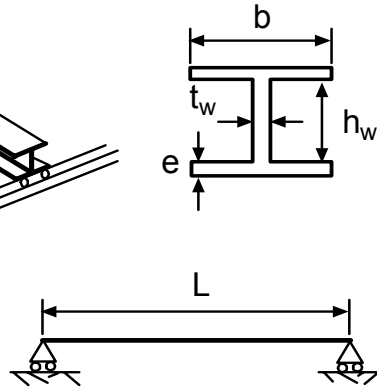
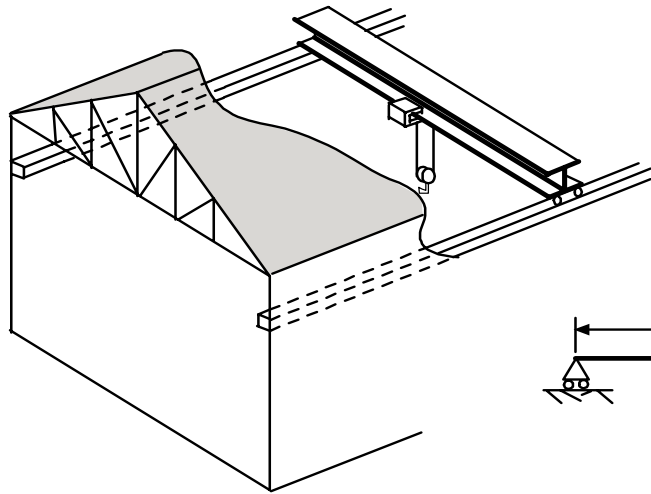
2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.

Aplicaciones (Puentes Grúa)



Variables

$$d = \{b, e, t_w, h_w\}$$

$$\eta = \{f_y, L, \gamma_y, E, \nu, c_y\}$$

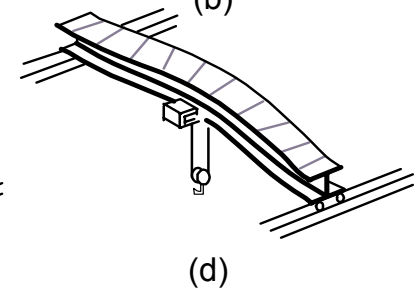
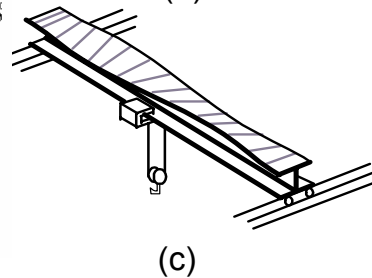
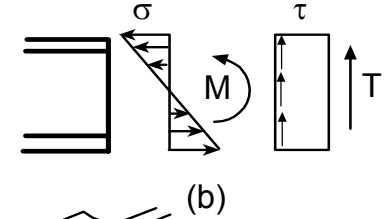
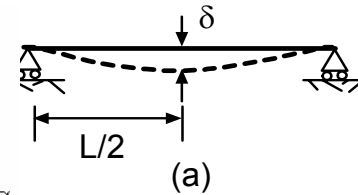
$$\phi = \{P\}$$

$$\kappa = \{\sigma_{f_y}, \sigma_P, \sigma_L, \sigma_{\gamma_y}\}$$

$$\psi = \{W, I_{xx}, I_{yy}, I_t, G, \sigma, \tau, M_{cr}, \delta\}$$

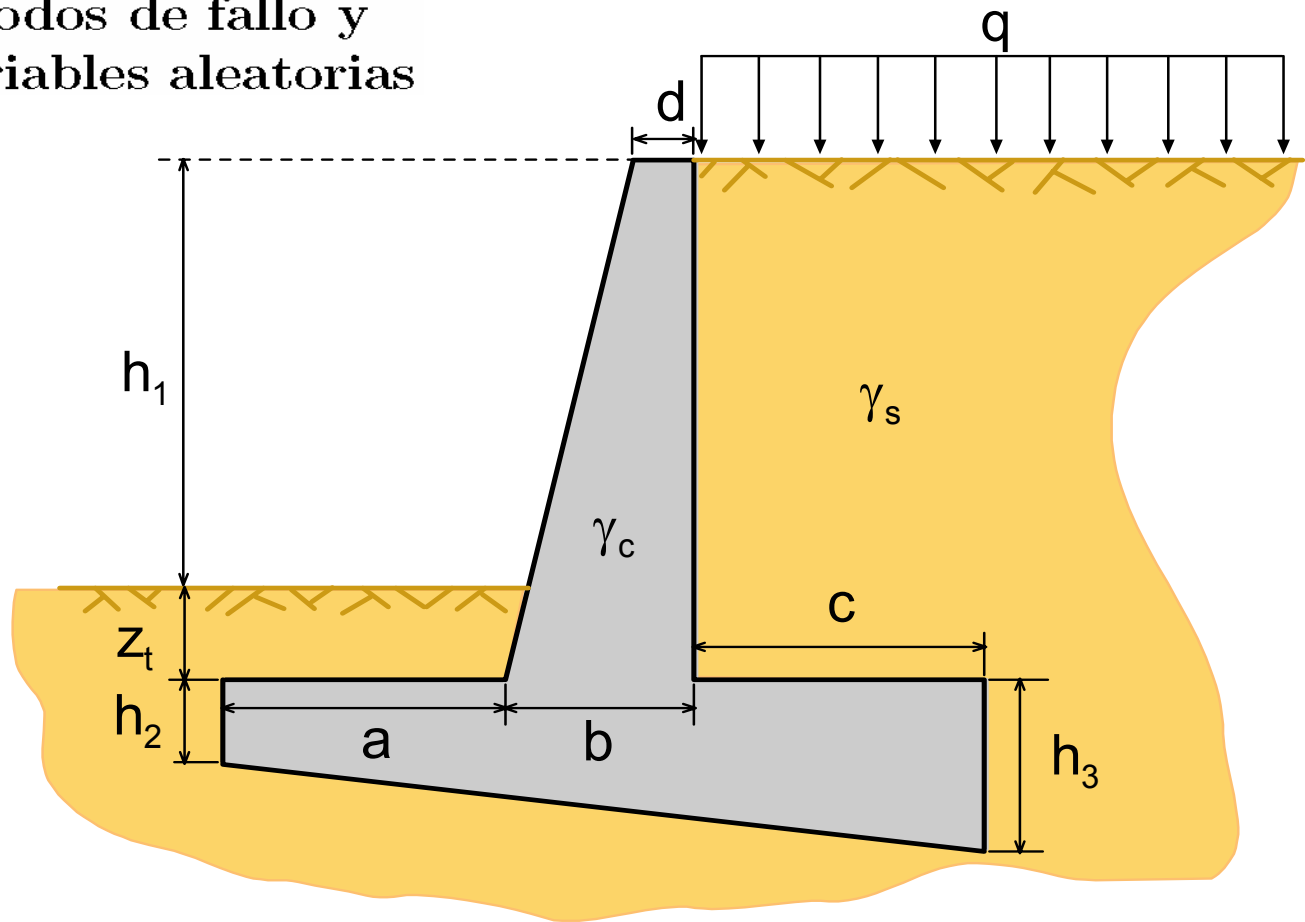
4 modos de fallo

1. Máxima flecha.
2. Máxima tensión en las fibras superior e inferior.
3. Rotura del alma.
4. Pandeo lateral.

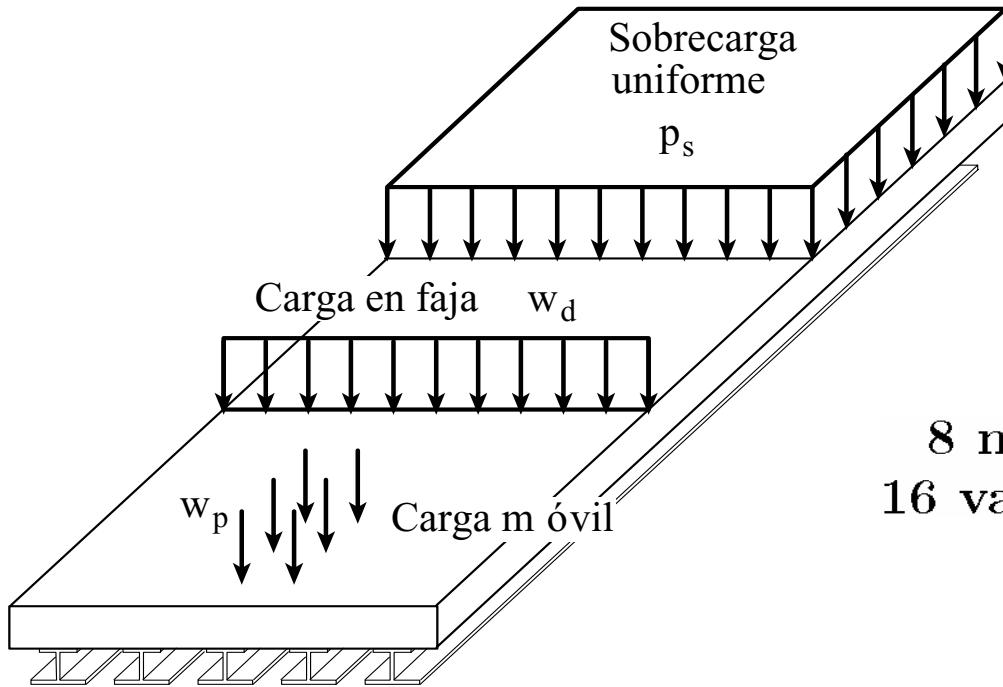


Aplicaciones (Muros de Contención)

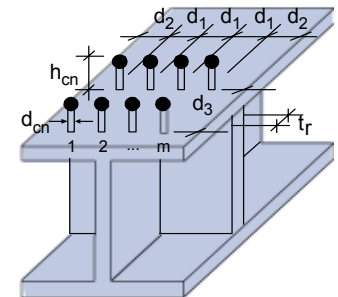
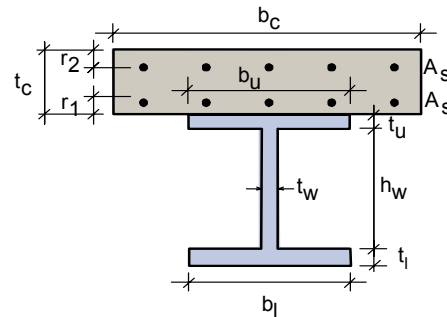
9 modos de fallo y
22 variables aleatorias



Aplicaciones (Puente mixto)



8 modos de fallo y
16 variables aleatorias



Aplicaciones (Diques de Escollera)

$$\kappa = (D, v_{Ar}, v_{Br}, v_{Cf}, \mu_{Ar}, \mu_{Br}, \mu_{Au}, \mu_{Bu}, \mu_{Cf}, \mu_{\mu_c}, \mu_{h_1}, \mu_{h_2}, \sigma_{Au}, \sigma_{Bu}, \sigma_{\mu_c}, \sigma_{h_1}, \sigma_{h_2})$$

$$\psi = (A_c, F_h, F_v, I_r, I_{r0}, L, \ell, \ell_e, P_{S_0}, R, R_u, S_0, V_c, V_1, V_2, V_3, W, W_1, W_f, \alpha, \lambda, \phi_e)$$

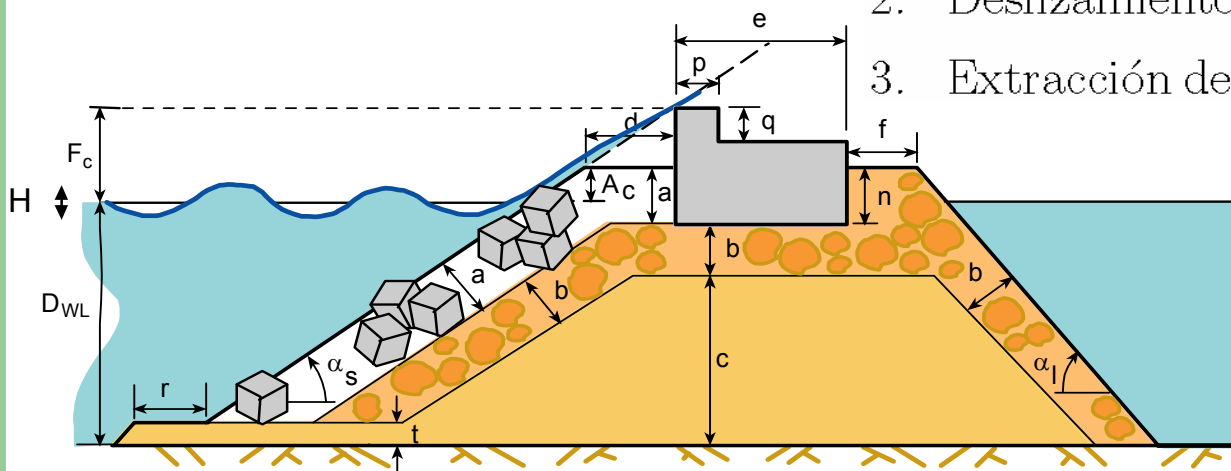
$$\mathbf{d} = (a, b, c, d, e, F_c, f, n, p, q, r, s, t, \alpha_\ell, \alpha_s)$$

$$\phi = (H_s, A_r, A_u, B_r, B_u, C_f, H, T, \mu_c, h_1, h_2)$$

$$\eta = (C_{al}, C_c, C_{co}, C_{ul}, D_{WL}, g, \gamma_c, \gamma_s, \gamma_w)$$

3 modos de fallo

1. Rebase.
2. Deslizamiento del espaldón.
3. Extracción de piezas del manto.



Aplicaciones (Estabilidad de Taludes)

A continuación se presentan tres contribuciones: (a) una aproximación variacional al problema de la estabilidad de taludes, que evita la necesidad de utilizar familias paramétricas particulares, (b) un nuevo método que combina coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo, y (c) herramientas potentes para el estudio de sensibilidad.

$$F = \frac{\int_{x_1}^{x_{n+1}} \left[\frac{c}{\gamma} + (\bar{y}(x) - y(x)) \tan \phi \right] (1 + y'^2(x))}{1 + \frac{y'(x) \tan \phi}{F}} dx$$

$$\int_{x_1}^{x_{n+1}} (\bar{y}(x) - y(x)) y'(x) dx$$



$$\left\{ F, N = \frac{c}{\gamma H}, \psi = \tan \phi \right\}$$

$$u = \frac{x}{H}$$

$$z(u) = \frac{y(uH)}{H}$$

$$\bar{z}(u) = \frac{\bar{y}(uH)}{H}$$



$$F = \frac{\int_{u_1}^{u_{n+1}} \left[N + (\bar{z}(u) - z(u)) \psi \right] (1 + z'^2(u))}{1 + \frac{\psi z'(u)}{F}} du$$

$$\int_{u_1}^{u_{n+1}} (\bar{z}(u) - z(u)) z'(u) du$$



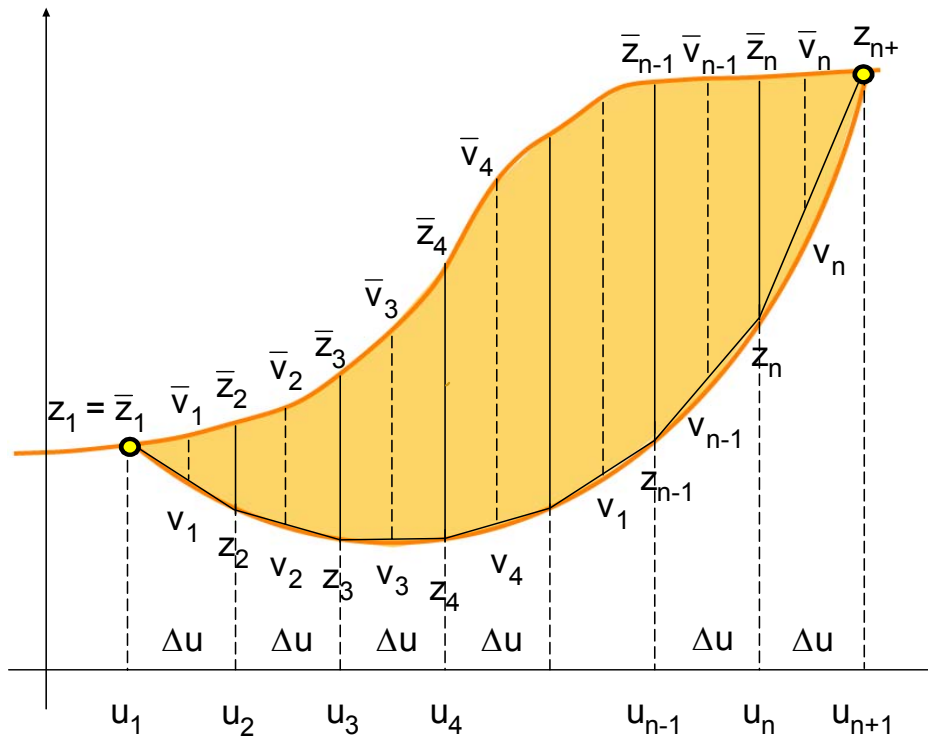
$$F = H(N, \psi)$$

$$kF = kH(N, \psi) = H(kN, k\psi)$$



Aplicaciones (Estabilidad de Taludes)

Discretización del problema



$$\Delta u = \frac{u_{n+1} - u_1}{n}$$

$$u_i = u_1 + (i - 1)\Delta u$$

$$v_i = \frac{z_{i+1} + z_i}{2}$$

$$v'_i = \frac{z_{i+1} - z_i}{\Delta u}$$

$$\bar{v}_i = \bar{z}(u_i + \Delta u/2)$$

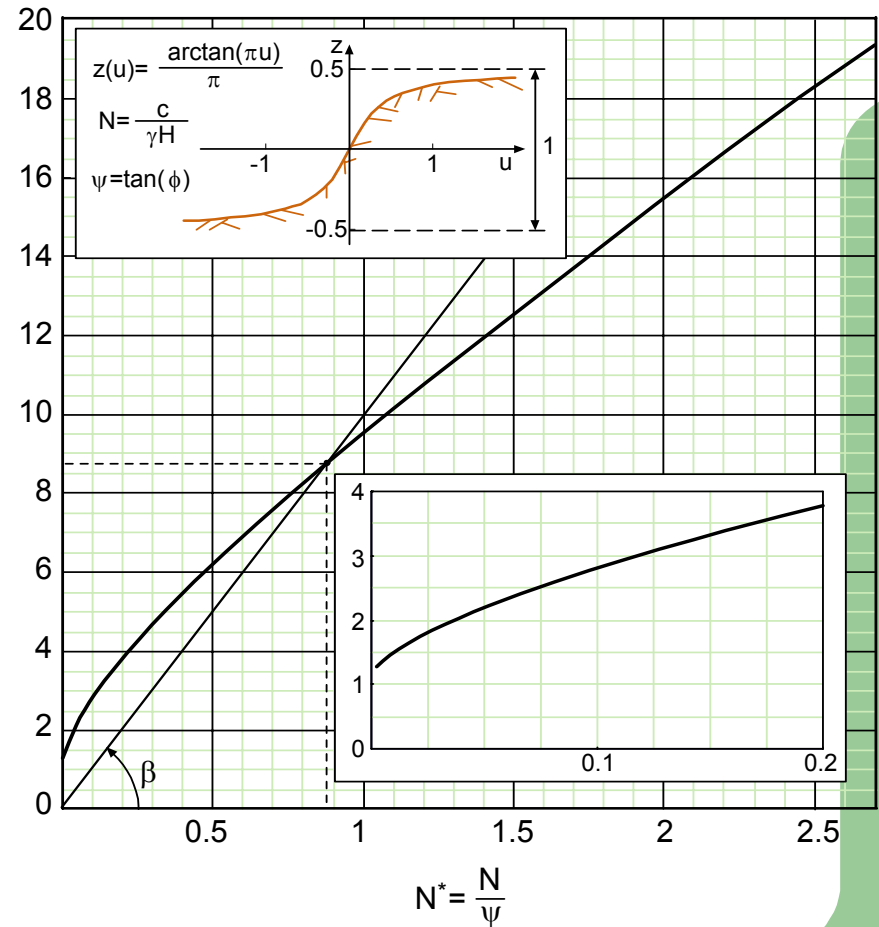
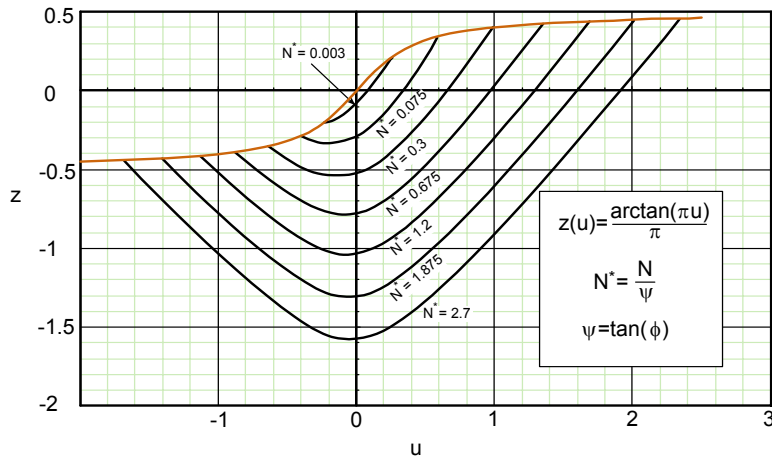
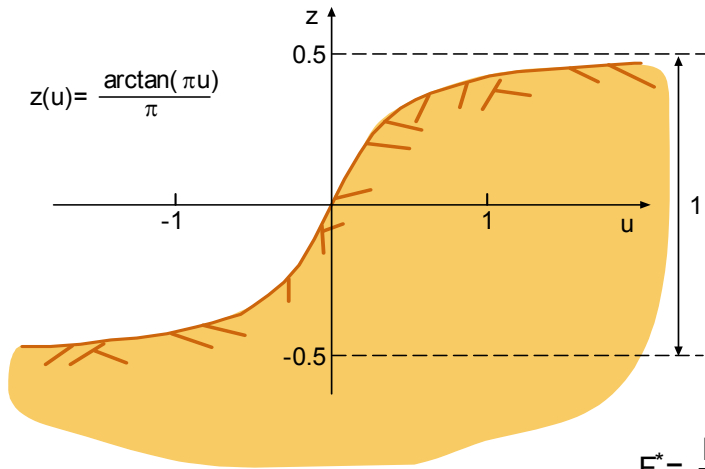
Aplicaciones (Estabilidad de Taludes)

Entonces, el análisis de la estabilidad de un talud se reduce a

Minimizar F^*
 $u_0, u_{n+1}, z_i : i = 2, \dots, n$
sujeto a

$$\sum_{i=1}^n \left[(\bar{v}_i - v_i) v_i' - \frac{[N^* + (\bar{v}_i - v_i)](1 + v_i'^2)}{F^* + v_i'} \right] = 0$$
$$\bar{z}_j = z_j; \quad j = 1, n + 1$$
$$N^* = N_0^* = c/(\gamma H \psi)$$

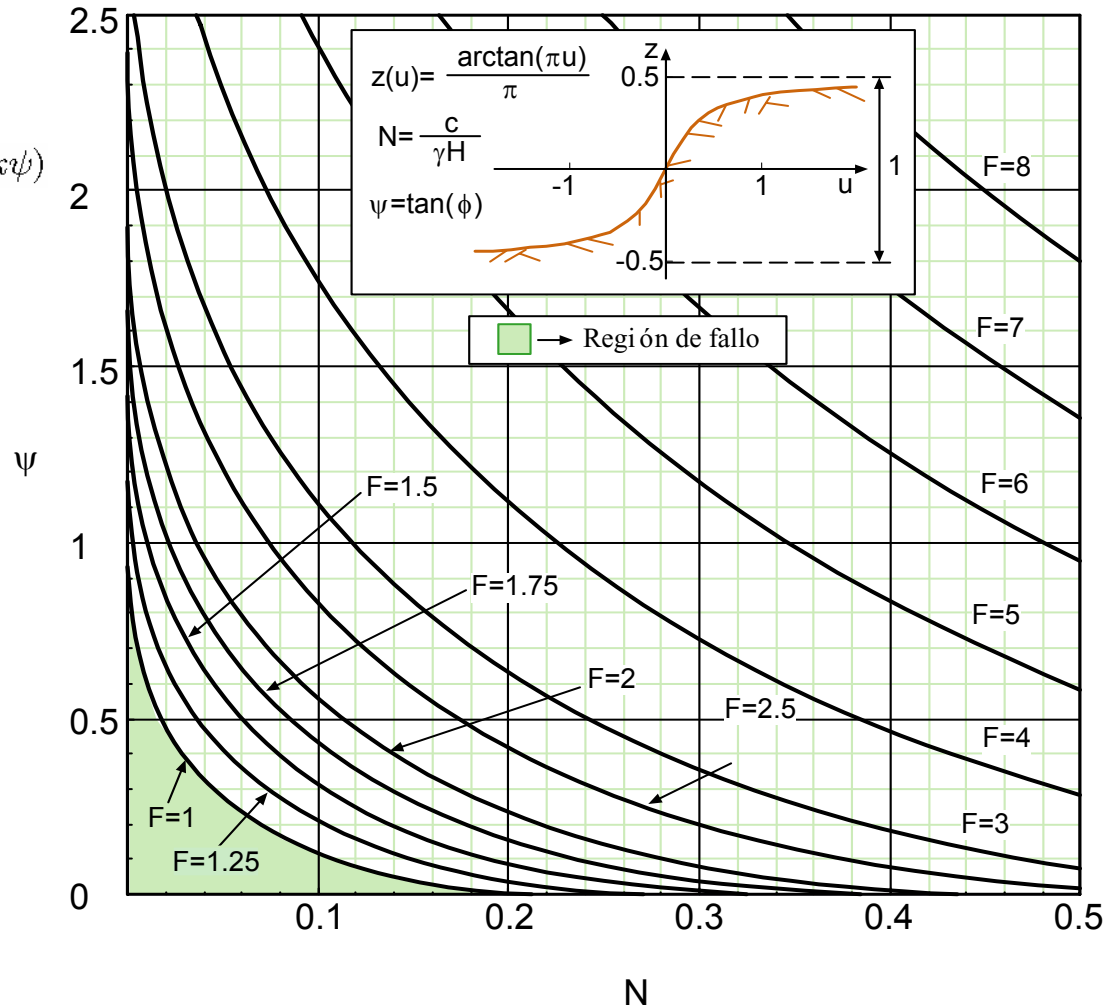
Aplicaciones (Estabilidad de Taludes)



Aplicaciones (Estabilidad de Taludes)

$$F = H(N, \psi)$$

$$kF = kH(N, \psi) = H(kN, k\psi)$$



Aplicaciones (Estabilidad de Taludes)

Posiblemente uno esté tentado en trabajar con c, γ, ϕ y H , y hacer ciertas hipótesis sobre la función de densidad conjunta. Sin embargo, dado que el problema depende sólo de dos variables, el resultado final dependerá sólo de la función de densidad conjunta de las variables (F^+, N^*) ó (ψ, N) , y sin pérdida de generalidad, se puede trabajar sólo con ellas.

Así, el cálculo de índice de fiabilidad β se reduce a:

$$\text{Minimizar } \beta = \sqrt{Z_{F^+}^2 + Z_{N^*}^2}$$
$$Z_{F^+}, Z_{N^*}$$

sujeto a

$$Z_{F^+} = \frac{F^+ - \mu_{F^+}}{\sigma_{F^+}} = \frac{F^+ - \mu_{F^+}}{v_{F^+} \mu_{F^+}}$$

$$Z_{N^*} = \frac{N^* - \mu_{N^*} - \beta_0(F^+ - \mu_{F^+})}{\sigma_{N^*|F^+}} = \frac{N^* - \mu_{N^*} - \beta_0(F^+ - \mu_{F^+})}{v_{N^*|F^+} \mu_{N^*}}$$

$$F^+ = h(N^*)$$



2.7.-Conclusiones.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.

Conclusiones

- Tras una revisión exhaustiva del material expuesto en la tesis se puede llegar a las siguientes conclusiones:
 - 1.- La respuesta al dilema **coeficientes de seguridad-probabilidades de fallo** no es determinante con el **método mixto**.
 - 2.- El **método mixto** proporciona una poderosa herramienta para resolver de forma óptima multitud de problemas ingenieriles con un doble control de la seguridad.
 - 3.- Los métodos de optimización por descomposición permiten abordar problemas de optimización a largo plazo incluyendo costes de reparación, mantenimiento, etc.
 - 4.- Los métodos de optimización por descomposición tienen las siguientes ventajas adicionales:
 - a) Evitan la utilización de complicados algoritmos anidados para el tratamiento de las restricciones probabilistas.
 - b) Aprovechan la potencia de los paquetes de optimización estándar, ampliamente contrastados en otras aplicaciones .



Conclusiones

- c) Se pueden añadir tantas restricciones como se quiera para poder simplificar el modelo.
- d) No es necesario invertir la transformación de Rosenblatt.
- e) Las restricciones se pueden escribir de forma implícita o explícita.
- f) No es necesario escribir la región de fallo en función de las variables normales estándar independientes.
- g) Son una herramienta muy útil para la calibración de códigos.
- h) Los diseños obtenidos son automáticos, óptimos e independientes del diseñador.

5.- El uso de rutinas implementadas por especialistas en optimización permite abordar problemas de grandes dimensiones.

6.- El método general de sensibilidad es una herramienta muy útil, con las siguientes ventajas:

- a) Dado que los paquetes de optimización calculan la solución del problema dual son muy sencillas de obtener.



Conclusiones

- b) Como se aborda en el punto óptimo, la convergencia está asegurada.
- c) Se obtienen todas las sensibilidades posibles de la función objetivo del problema.
- d) Se obtienen las sensibilidades con respecto a la fiabilidad del diseño.

7.- La metodología empleada para el cálculo de estabilidad de taludes presenta las siguientes ventajas:

- a) El tratamiento adimensional y funcional permiten establecer los parámetros de los que depende el problema y resolver infinitos taludes.
- b) Permite resolver el problema de forma clásica, moderna o combinada.
- c) Asocia a cada conjunto de parámetros una línea de deslizamiento pésima.
- d) La aproximación moderna sólo requiere dos variables aleatorias.
- e) Puede aplicarse a cualquier terreno.



2.8.-Futuras líneas de investigación.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.

Futuras Líneas de Investigación

- Respecto a las futuras líneas de investigación, algunas de las propuestas son las siguientes:
 - 1.- Puesto que el trabajo expuesto se ha limitado a fiabilidad temporalmente invariante, habría que añadir la variabilidad temporal.
 - 2.- Se podrían tratar de mejorar las aproximaciones de las fiabilidades mediante métodos SORM.
 - 3.- Consideración de los diseños como sistemas que interactúan. Ya sea sistemas en serie o en paralelo.
 - 4.- Aplicación a la elaboración de códigos, o a su calibrado.
 - 5.- Respecto a la estabilidad de taludes se podría mejorar la fiabilidad combinando los resultados de esta tesis con los métodos existentes.
 - 6.- Tratar de abordar problemas de elementos finitos con probabilidades de fallo.



2.9.-Publicaciones.

2.- Contribuciones originales.

2.1.- Detección de problemas a resolver.

2.1.1.- Cálculo de probabilidades de fallo.

2.1.2.- Dilema entre coeficientes de seguridad y probabilidades de fallo.

2.1.3.- Dificultades de la optimización basada en fiabilidad.

2.2.- Propuestas para el cálculo de las probabilidades de fallo.

2.2.1.- Integración mediante politopos.

2.2.2.- Integración recursiva por Gauss-Legendre.

2.3.- Propuestas al dilema.

2.3.1.- Diseño mixto global.

2.3.2.- Diseño mixto parcial.

2.3.3.-Diseño general global.

2.3.4.-Diseño general parcial.

2.4.- Nuevo método de análisis de sensibilidad.

2.5.- Propuestas a los métodos de resolución.

2.5.1.- Método de relajación.

2.5.2.- Mejora de convergencia y de sensibilidad.

2.5.3.- Método de aproximación por hiperplanos.

2.5.4.- Descomposición de Benders.

2.6.- Aplicaciones a la ingeniería civil.

2.7.- Conclusiones.

2.8.- Futuras líneas de investigación.

2.9.- Publicaciones.

ARTICULOS (CONGRESOS)

- [1] E. CASTILLO, A. FERNÁNDEZ-CANTELI, AND R. MÍNGUEZ. Approximating Extreme Probabilities in Reliability Analyses using Polytopes In *Proceedings Third International Symposium on Sensitivity Analyses of Model Output (SAMO)* (Madrid, 2001), pp. 27–30, España.
- [2] E. CASTILLO, A. FERNÁNDEZ-CANTELI, AND R. MÍNGUEZ. Approximating Extreme Probabilities in Reliability Analyses In *European Safety & Reliability International Conference (ESREL)* (Torino, 2001), poster, Italia.
- [3] E. CASTILLO AND R. MÍNGUEZ. A new Slope Stability Approach using Calculus of Variations, and Safety and Sensitivity Analysis In *R. J. Krizek Commemorative Symposium* (Evanston, Illinois 2002), USA.
- [4] C. CASTILLO, M. A. LOSADA, E. CASTILLO, AND R. MÍNGUEZ. Técnicas de Optimización Aplicadas al Diseño de Obras Marítimas. In *VII Jornadas de Ingeniería de Costas y Puertos* (Almería, 2003), pp. 27–30, España.



Publicaciones

ARTICULOS (REVISTAS)

CASTILLO, E., FERNÁNDEZ-CANTELI, A., AND MÍNGUEZ, R. Computing failure probabilities. Applications to reliability analysis. *Reliability Engineering and System Safety*, 77 (2002), 131–141.

CASTILLO, E., CONEJO, A., AND MÍNGUEZ, R. An alternative approach for addressing the failure probability-safety factor method with sensitivity analysis *Reliability Engineering and System Safety* (2003). Accepted.

CASTILLO, E., LOSADA, M., MÍNGUEZ, R., CASTILLO, C., AND BAQUERIZO, A. An optimal engineering design method that combines safety factors and failures probabilities. Application to rubblemound breakwaters. *Journal of Waterways, Ports, Coastal and Ocean Engineering, ASCE* (2003). Accepted.

CASTILLO, E., MÍNGUEZ, R., RUIZ, A., AND FERNÁNDEZ-CANTELI, A. Design and sensitivity analysis using the probability-safety-factor method. An application to retaining walls. *Structural Safety* (2003). Accepted.

CASTILLO, E., MÍNGUEZ, R., RUIZ, A., AND FERNÁNDEZ-CANTELI, A. Design of a composite beam using the probability-safety-factor method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* (2003). In review.

CASTILLO, C., MÍNGUEZ, R., LOSADA, M., AND CASTILLO, E. An optimal engineering design method with failure rate constraints and sensitivity analysis. Application to vertical breakwaters. *Coastal Engineering* (2003). In review.



Publicaciones

PROYECTOS DE INVESTIGACION

- El método combinado de Probabilidades de Fallo-Coeficientes de Seguridad con Análisis de Sensibilidad. Aplicaciones a la Ingeniería Civil. Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica 2000-2003 (Proyectos Integrados). Proyecto DPI2002-04172-C04-02. (Investigador)

Libros

- Antonio J. Conejo, Enrique Castillo, Roberto Mínguez and Raquel García-Bertrand. Decomposition Techniques in Mathematical Programming. Engineering and Science Applications. In review, 2003.



Fin



Futuras Líneas de Investigación

Respecto a las futuras líneas de investigación es indudable, pese a que el avance ha sido grande, que quedan muchas cosas por hacer, pero desde la certeza de que los métodos de optimización propuestos son el camino adecuado. Algunas de las propuestas son:

1. Todo el trabajo expuesto se ha limitado a fiabilidad temporalmente invariante, pero el problema real es aún más complicado, dado que muchos de los parámetros que intervienen en el diseño son variables aleatorias que evolucionan con el tiempo, y se han de determinar métodos que permitan tener en cuenta su influencia en la fiabilidad, y por consiguiente, en la optimización a largo plazo.
2. Las probabilidades de fallo empleadas son aproximaciones FOSM y FORM, para incluir aproximaciones de la región de fallo de segundo orden se podrían emplear métodos SORM lo que sería una mejora. Éstos requieren el cálculo de las curvaturas o derivadas segundas de las ecuaciones de estado límite en el punto de diseño o máxima verosimilitud, sin embargo, al emplearse algoritmos de optimización estándar, que ya requieren el cálculo de las derivadas segundas para obtener el hessiano, éstas podrían determinarse sin excesiva complicación. Más dificultosa sería la obtención de las derivadas de los índices de fiabilidad con respecto a las variables de complicación o de diseño, necesarias para que el procedimiento de optimización global converga.
3. Otro aspecto en el que hay que ahondar es en la aplicación de las técnicas de optimización considerando las obras como sistemas, es decir, no sólo tener en cuenta modos independientes de fallo con su probabilidad asociada, como se ha hecho en este trabajo, sino también considerar la correlación entre modos de fallo para poder llegar a calcular la probabilidad de fallo del sistema global. Existen en la literatura muchos trabajos relacionados con estos aspectos, que tratan la probabilidad de sistemas tanto en serie, como en paralelo, e incluso

