

SEMINARIO 13. Inspección, diagnóstico y evaluación de estructuras existentes y corroídas de hormigón
Madrid. 06-06-2012

JUGANDO CON FUEGO. DECISIONES RELATIVAS A LA FIABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS EXISTENTES

Peter Tanner. Ramon Hingorani. Carlos Lara



Contexto

VULNERABILIDAD HUMANA EN ENTORNO NATURAL Y TECNOLÓGICO



CONSECUENCIAS ADVERSAS DE DESASTRES Y ACCIDENTES

- Daños personales
- Daños medioambientales
- Pérdidas económicas
 - Directas: reconstrucción; productividad
 - Indirectas: demora usuarios; impacto sobre crecimiento económico; desempleo



DEMANDA SOCIAL PARA CONTRARRESTAR AMENAZAS

- Proyecto, ejecución y explotación de sistemas técnicos requieren consideración de
 - Seguridad
 - Aspectos medioambientales
 - Aspectos económicos
- **Objetivo: alcance de un nivel de riesgo aceptable**



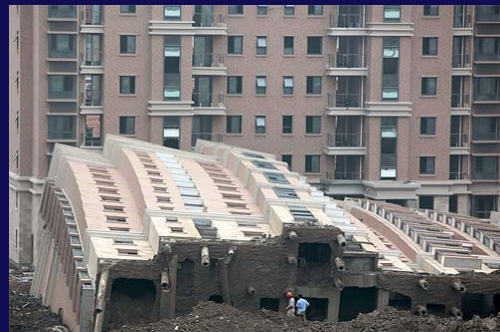
GESTIÓN DE RIESGOS

- Riesgos naturales y tecnológicos se deben reducir a través de medidas adecuadas
- Cualquier medida tiene un coste
- Recursos están limitados
- **Objetivos**
 - Minimización de riesgos
 - Asignación óptima de los recursos naturales y financieros



SEGURIDAD ESTRUCTURAL

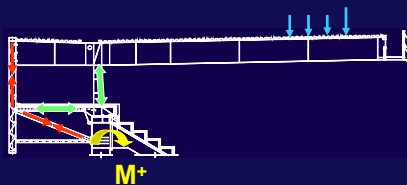
- Ingeniería estructural implica la consideración de aspectos de seguridad



- ¿Qué es suficientemente seguro?
- ¿Qué precio estamos dispuestos a pagar para reducir los niveles de riesgo?

ESTRUCTURAS EXISTENTES

- Necesidad de evaluar una estructura existente puede surgir por diferentes motivos
- Todos relacionados con dudas sobre seguridad estructural



→ ¿Fiabilidad adecuada para uso futuro?

ESTRUCTURAS EXISTENTES

- Problema fundamental consiste en contestar a la pregunta: **¿tiene la estructura una fiabilidad adecuada?**
- Sólo dos posibles respuestas: **si** o **no**
- Consecuencias importantes en caso de decisión equivocada

No hacer nada



Sobreactuación



JUGANDO CON FUEGO. DECISIONES RELATIVAS A LA FIABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS EXISTENTES

- Contexto
- Seguridad y fiabilidad en ingeniería estructural
- Procedimiento de análisis de riesgos
- Enfoque
- Nivel aceptable de los riesgos nominales
- Interpretación
- Conclusiones



Seguridad y fiabilidad en ingeniería estructural

SITUACIÓN ACTUAL

- Tradicionalmente, ingeniería estructural siempre ha sido una disciplina **autorregulada**
- Autorregulación se materializa en **normas**
- Por definición, la **correcta aplicación** de las normas produce estructuras acordes con los objetivos



VALORACIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

- Normas actuales abordan la seguridad de manera implícita
- Criterios de aceptación de riesgos son fruto de autorregulación y se basan en experiencia del pasado
- Reglas normalizadas no se basan en un enfoque racional
- Posibles sobreactuaciones



- **Despilfarro** de recursos disponibles para reducir riesgos

VALORACIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

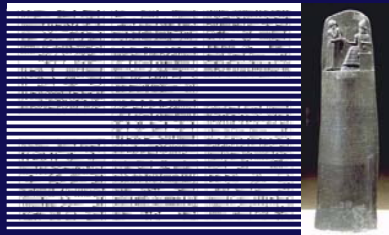
- Reglas implícitas actuales para el tratamiento de la seguridad estructural son **inhibidores**



- Enfoque basado en **prestaciones** se presenta como salvación

ENFOQUE BASADO EN PRESTACIONES

- Idea no es nueva: código *Hammurabi* (6º rey de Babilonia, 1792–50 a.c.) es muy prestacional



229: En caso de que un constructor construye una casa para alguien y no la construye debidamente, de modo que colapsa y mata al propietario, entonces el constructor será castigado con la pena capital.

- Puesta en práctica de un enfoque prestacional resulta difícil

OBJETIVOS

- Establecimiento de una **base racional** para la adopción de decisiones sobre la seguridad estructural
- Desarrollo de herramientas prácticas que faciliten **evaluación / dimensionado** de estructuras (de edificación) basado en **prestaciones**

Grado de “prescriptividad”	Reglas	Normas
Totalmente prestacional	Requisitos	Hammurabi
Totalmente prescriptivo	“Recetas de cocina”	EN, CTE, otras



JUGANDO CON FUEGO. DECISIONES RELATIVAS A LA FIABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS EXISTENTES

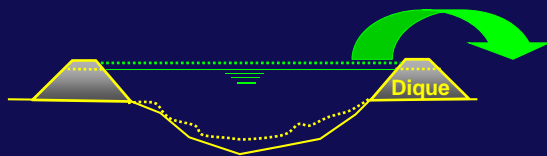
- Contexto
- Seguridad y fiabilidad en ingeniería estructural
- **Procedimiento de análisis de riesgos**
- Enfoque
- Nivel aceptable de los riesgos nominales
- Interpretación
- Conclusiones



Generalidades

RIESGO EN UN CONTEXTO TÉCNICO

- Función de la **frecuencia** de un evento no deseado y de sus **consecuencias**



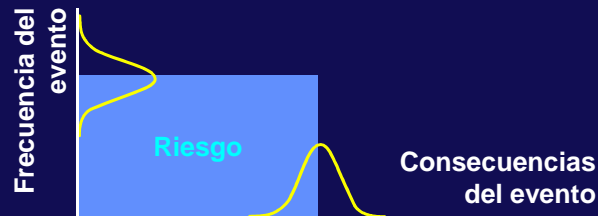
Inundación de

- Campo improductivo
- Cultivos
- Zonas pobladas
- Ciudades
- Parte de un país



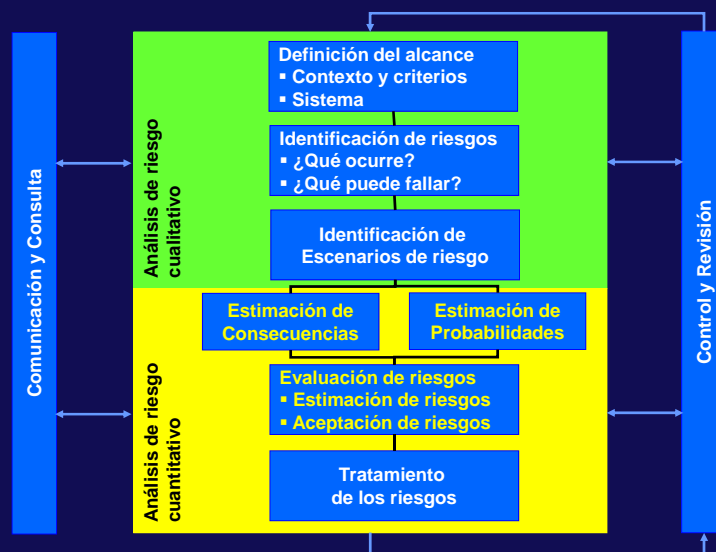
RIESGO EN UN CONTEXTO TÉCNICO

- Función de la **frecuencia** de un evento no deseado y de sus **consecuencias**



- Frecuencia, consecuencias: variables aleatorias
- **Riesgo:** variable aleatoria
- Problema: base estadística insuficiente para eventos poco frecuentes, por ejemplo colapsos de estructuras
- A tener en cuenta en la adopción de decisiones

PROCEDIMIENTO Y DESARROLLOS REQUERIDOS



Consecuencias

SIMPLIFICACIÓN

- Posibles consecuencias incluyen
 - Víctimas mortales; heridos
 - Daños medioambientales
 - Daños económicos
- ¿Comparación de pérdidas directas, indirectas, no monetarias?
 - Enfoques con indicadores sociales, por ejemplo *LQI*
- Riesgos para personas son dominantes en ingeniería civil
 - Aspectos legales
 - Motivos éticos
- Enfoque simplificado
 - Sólo se considera **pérdida de vidas humanas**



Cuantitat.	Cualitativo	Alcance	
		Riesgos	
		Escenario	
	N	P _i	Evaluac.
			Tratam.

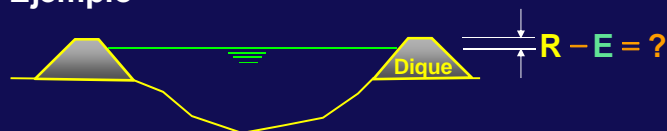
Estimación de probabilidades

EL PROBLEMA R – E

- Muchos problemas de ingeniería se dejan describir comparando dos cantidades
 - E** Intensidad de una acción sobre un sistema (caudal)
 - R** Capacidad del sistema (capacidad del río / canal)



Ejemplo



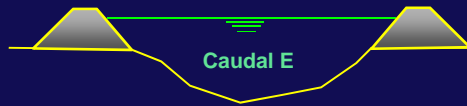
Se espera que, por lo menos, $R = E$



- Seguridad está relacionada con $R - E = ?$

EL PROBLEMA R – E

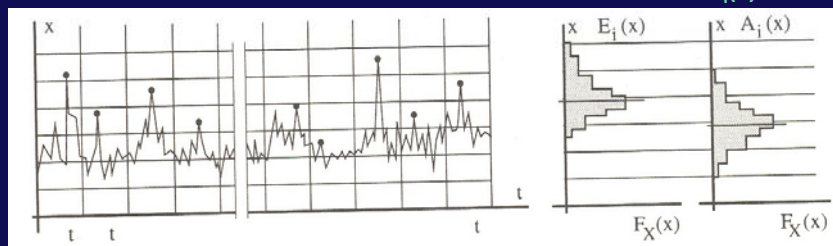
- Incertidumbres asociadas con las cantidades
 $E = ?$



- Registro del caudal E
Proceso estocástico

Histograma de los valores extremos $E_i(x)$ en los intervalos Δt

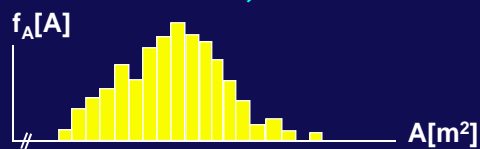
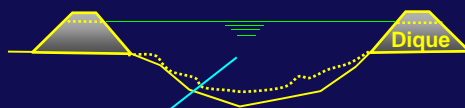
Histograma de los valores instantáneos $A_i(x)$



EL PROBLEMA R – E

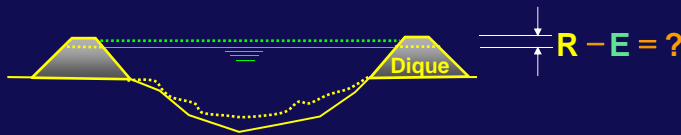
- Incertidumbres asociadas con las cantidades
 $R = ?$

- Área de la sección varía a lo largo del canal y del tiempo



CONSECUENCIAS DE LAS INCERTIDUMBRES

- Parámetros que intervienen en un análisis estructural son **variables** en el espacio y el tiempo
- Seguridad estructural **no es determinista**
- Seguridad estructural se mide en términos de **fiabilidad**
- Fiabilidad se determina mediante **métodos probabilistas** teniendo en cuenta **incertidumbres**



Cuantitat.	Cualitativo	
	Alcance	
	Riesgos	
	Escenario	
	N	P _i
	Evaluac.	
Tratam.		

ANÁLISIS PROBABILISTA EXPLÍCITO

- Seguridad estructural expresada en términos de variables básicas a través de la **Función de Estado Límite**
- Seguridad se define mediante el requisito

$$G = R - E \geq 0$$

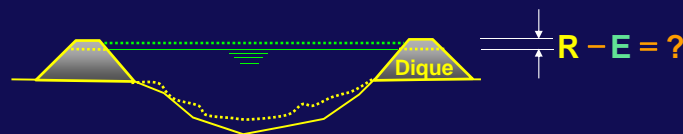
- Probabilidad de fallo

$$P_f = P[E > R] = \sum P[E = x] \cdot P[R < x]$$

Probabilidad de que

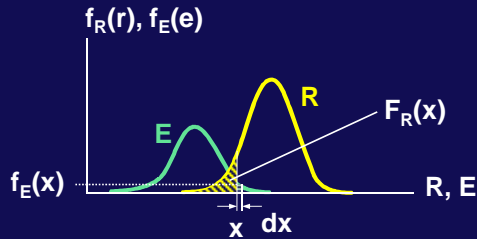
$$E = x \text{ y } R < x$$

para todos los posibles $E(x \in E)$



ANÁLISIS PROBABILISTA EXPLÍCITO

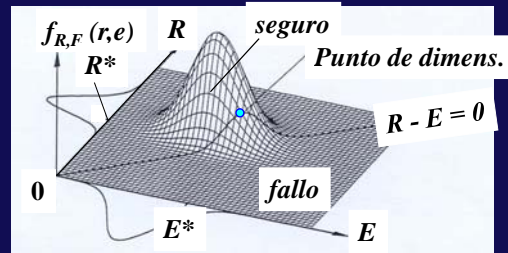
Para distribuciones de probabilidad continuas de **R** y **E**:



$$P_f = \int_{-\infty}^{\infty} f_E(x) \cdot F_R(x) dx$$

Objetivo: calcular volumen de la zona de fallo con respecto a la densidad de probabilidad de $G = R - E$

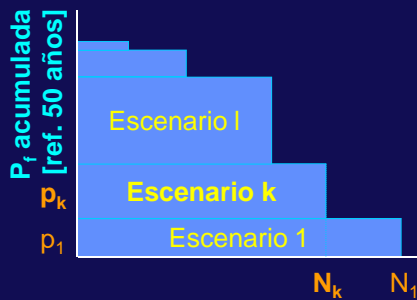
→ Valor nominal



PERFIL DE RIESGOS

Riesgo colectivo para las personas asociado a una estructura es la suma de los riesgos para todos los escenarios relevantes, **j**

$$R = \sum_{j=1}^n R_j \approx \sum_{j=1}^n p_j \cdot N_j$$



Nº esperado de víctimas

Cuantitat.	Alcance
	Riesgos
	Escenario
	N
	Evaluac.
	Tratam.

JUGANDO CON FUEGO. DECISIONES RELATIVAS A LA FIABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS EXISTENTES

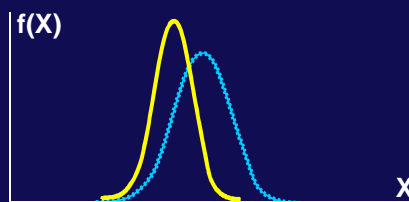
- Contexto
- Seguridad y fiabilidad en ingeniería estructural
- Procedimiento de análisis de riesgos
- **Enfoque**
- Nivel aceptable de los riesgos nominales
- Interpretación
- Conclusiones



Enfoque

IDEAS BÁSICAS PARA EL DESARROLLO DE HERRAMIENTAS

- Enfoque más lógico: fijar los **riesgos aceptables** en los niveles aceptados según **práctica habitual**
- Práctica habitual queda reflejada en la **normativa en vigor**
- Riesgos aceptables están asociados con el **nivel de fiabilidad requerido** implícitamente por estas normas
- Nivel de fiabilidad depende del **estado de incertidumbre** asociado a las reglas normalizadas



DIFICULTADES

- Los **modelos probabilistas** de las variables que están detrás de las reglas normalizadas **no se han establecido explícitamente**
- Estado de incertidumbre asociado a las reglas de las normas es desconocido
- Normas actuales **no están totalmente calibradas**
- Se desconoce el nivel de fiabilidad requerido



DESARROLLOS REQUERIDOS

- Desarrollo de **modelos de consecuencias**
- Determinación del **estado de incertidumbre** asociado a las reglas de las normas en vigor
- Deducción del **nivel de fiabilidad requerido implícitamente** por las normas
- Determinación del **nivel aceptable de riesgos** asociados con las estructuras



JUGANDO CON FUEGO. DECISIONES RELATIVAS A LA FIABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS EXISTENTES

- Contexto
- Seguridad y fiabilidad en ingeniería estructural
- Procedimiento de análisis de riesgos
- Enfoque
- **Nivel aceptable de los riesgos nominales**
- Interpretación
- Conclusiones



Modelos de consecuencias

TRABAJO REALIZADO

- Recopilación de datos sobre colapsos de edificios
- Información requerida para cada caso

Edificio

- Ubicación
- Categoría de uso
- Año de la construcción
- Dimensiones: longitud; anchura; altura; superficie total
- Nº de plantas / apartamentos
- Sistema estructural y materiales constitutivos



Incidente

- Año del colapso
- Descripción / motivo del colapso
- Superficie afectada por el colapso
- Nº de personas presentes en el momento del colapso



Modelos de consecuencias

TRABAJO REALIZADO

- Información requerida para cada caso

Consecuencias

- Nº de víctimas mortales
- Nº de heridos
- Nº de desaparecidos
- Daños económicos
- Daños medioambientales

Información adicional

- Referencias
- Observaciones
- Utilidad

- 301 casos de España y otros países occidentales con métodos constructivos asimilables
- Establecimiento de una base de datos

Modelos de consecuencias

TRABAJO REALIZADO

- Para la mayoría de los casos, la información se ha extraído de periódicos y/o internet



- Falta de datos

TRABAJO REALIZADO

- Se completa la base de datos mediante información deducida de las estadísticas del INE
- Por ejemplo, estimación de
 - Nº de personas presentes en el momento del colapso

Tabla 5: Media estimada de la ocupación / vivienda en función de la superficie a de la misma

a [m ²] / Viv	a ≤ 30	31 ≤ a ≤ 45	46 ≤ a ≤ 60	61 ≤ a ≤ 75	76 ≤ a ≤ 90	91 ≤ a ≤ 105	106 ≤ a ≤ 120	121 ≤ a ≤ 150	151 ≤ a ≤ 180	a > 180	Tot.
Ocu / Viv	1,9	2,1	2,4	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	2,9

- Superficie total
- Superficie afectada por el colapso
- etcétera

TRABAJO REALIZADO

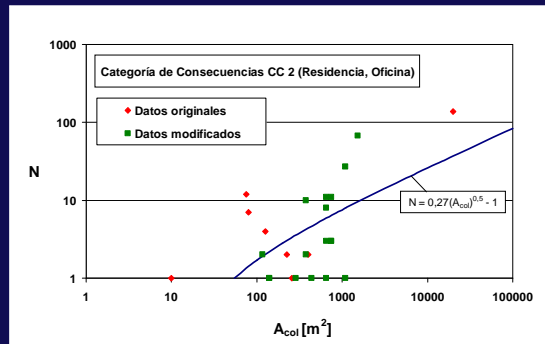
- 109 casos útiles pertenecientes a las categorías de consecuencias CC2 (residencia; oficina) y CC3 (concentración de personas)



- Análisis estadísticos de regresión
- Modelo más adecuado: $N(A_{col})$
- Dispersión importante
- Resultados se emplean a efectos comparativos
- No se requiere una gran precisión

NÚMERO DE VÍCTIMAS EN FUNCIÓN DEL ÁREA DE COLAPSO

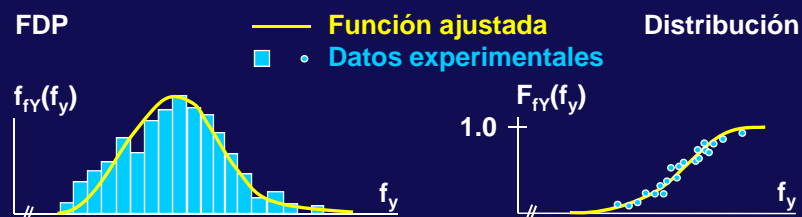
- Categoría de consecuencias CC2 (residencia, oficina)
 - Situaciones persistentes $N = 0,27 \cdot A_{col}^{0,5} - 1 \geq 0$



- Categoría de consecuencias CC3 (concentración personas)
 - Situaciones persistentes $N = 0,59 \cdot A_{col}^{0,56} - 1 \geq 0$

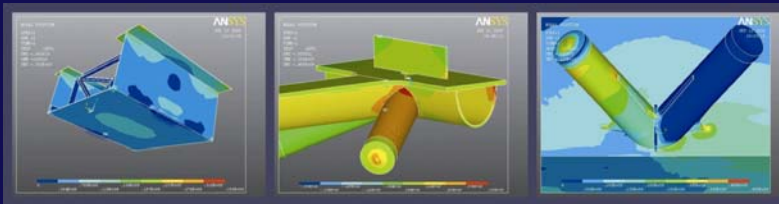
ALEATORIEDAD DE VARIABLES BÁSICAS

- Variables que intervienen en un análisis son **aleatorias**
 - no se pueden fijar de manera determinista
- Ejemplo: variabilidad del límite elástico del acero estructural
 - Muestra de n resultados experimentales → estadística
 - Probabilidad de que variable X sea inferior o igual a un determinado valor, x → **Función de Distribución: $F_X(x)$**
 - Intensidad de probabilidad correspondiente a valor x → **FDP: $f_X(x)$**



FUENTES DE INCERTIDUMBRE RELEVANTES

- Variabilidad natural (por ejemplo: límite elástico del acero)
- Errores de estimación debidos a datos estadísticos incompletos
- Imperfecciones de los modelos
 - Falta de conocimiento de ciertos fenómenos
 - Modelos simplificados

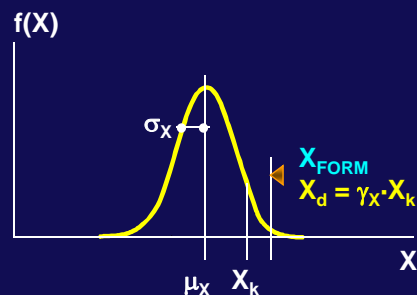
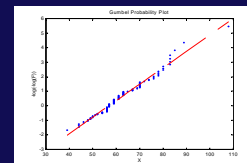


- Errores humanos

REQUISITOS PARA LOS MODELOS PROBABILISTAS A DESARROLLAR

- Representación de una realidad física
- Consistencia con *JCSS Model Code*
- Representación del estado de incertidumbre asociado a las reglas de las normas
- Representación de las incertidumbres en términos de variables aleatorias, aptas para aplicaciones prácticas:

$$X_i = \text{Tipo}(\mu_{X_i}; \sigma_{X_i})$$



EJEMPLO

– Resistencia a flexión de vigas de acero estructural

$$M_R = \xi_{R,M} \cdot f_y \cdot W$$



- Resistencia del material (datos deducidos de la literatura; parámetros compatibles con JCSS)

$$f_y = LN(1,14;0,06)$$

- Geometría (para procesos modernos de fabricación con tolerancias pequeñas)

$$W = N(1,02;0,02)$$

- Incertidumbres del modelo (buena aproximación a la realidad)

$$\xi_{R,M} = LN(1,0;0,02)$$

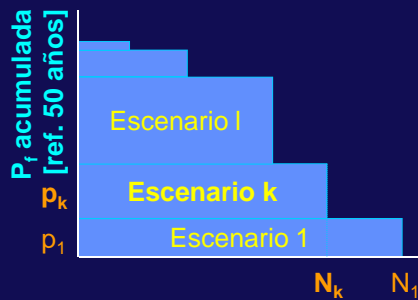
RECORDATORIO

- Riesgo colectivo para las personas asociado a una estructura es la suma de los riesgos para todos los escenarios relevantes, j

$$R = \sum_{j=1}^n R_j \approx \sum_{j=1}^n p_j \cdot N_j$$



$$p_k = P_{f,M,fl ed}$$



Nº esperado de víctimas

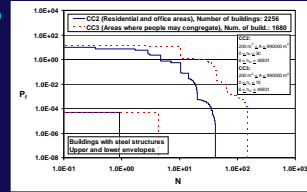
Cuantitat.	Cualitativo	
	Alcance	
	Riesgos	
	Escenario	
	N	P _i
	Evaluac.	
Tratam.		

Deducción de criterios de aceptación

PROCEDIMIENTO

- Selección de un conjunto representativo de estructuras
 - Ejemplo: edificios con elementos de **acero**
 - Variación de parámetros relevantes
 - Estructuras de edificación analizadas:

CC2 (residencia; oficina)	2256
CC3 (concentración)	1680
- Dimensionado estricto de todos los elementos de acuerdo con un conjunto consistente de normas: $E_d = R_d$
- Probabilidad de fallo asociada a cada escenario: $p_j \rightarrow P_{f,adm}$
- Número esperado de víctimas para cada escenario: N_j
- Perfil de riesgo para cada estructura → integración: R
- Análisis e interpretación de los resultados



Deducción de criterios de aceptación

NIVEL DE FIABILIDAD REQUERIDO SEGÚN NORMAS APLICADAS

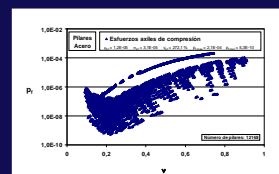
- Probabilidad de fallo admisible afectada por gran dispersión

$$\frac{\mu_{P_{f,steel}}}{\mu_{P_{f,composite}}} \rightarrow \begin{array}{ll} \text{Vigas cubierta} & 8,5 \\ \text{Vigas planta} & 4,7 \\ \text{Pilares} & 38,7 \end{array}$$



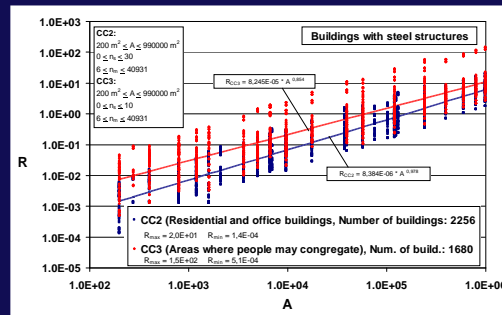
- En general $P_{f,adm,beams} > P_{f,adm,columns}$
- Vigas $P_{f,adm,steel} > P_{f,adm,RC} > P_{f,adm,composite} > P_{f,adm,timber}$
- Pilares $P_{f,adm,steel} > P_{f,adm,timber} > P_{f,adm,composite} > P_{f,adm,RC}$

- Es posible deducir un nivel de fiabilidad requerido
- Necesidad de calibración de reglas actuales



NIVEL DE RIESGO IMPLÍCITO SEGÚN NORMAS APLICADAS

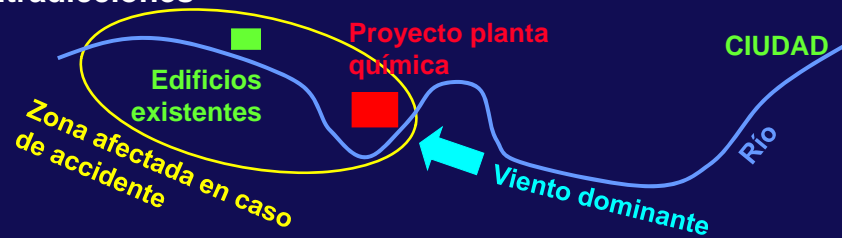
- Riesgo colectivo para las personas, R , en función de la superficie total, A , para todos los edificios con estructuras de **acero** analizados (50 años; situaciones persistentes)



- Dispersión por falta de criterios consistentes en normas
- Efecto escala: riesgo aceptable no es un valor absoluto

RIESGO INDIVIDUAL Y RIESGO COLECTIVO PARA PERSONAS

- Preferencias de individuos y sociedad → posibles contradicciones



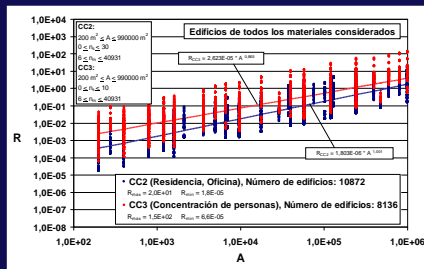
- Riesgo colectivo es de mayor importancia para explotador de sistemas técnicos (planta química, etc.) y sociedad
- Preservación de derechos humanos individuales
 DUDH, artículo 3: "Everyone has the right to life, liberty and security of person."
- Se deben considerar riesgos **colectivos** e **individuales**

Deducción de criterios de aceptación

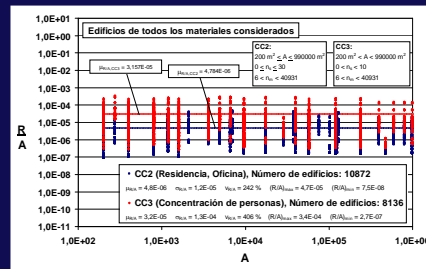
PROPUESTA

- Criterios de aceptación necesarios para riesgo colectivo y riesgo individual, respectivamente (DUDH, artículo 3)
- Nº de personas por unidad de superficie depende del uso
- Unidad de superficie vincula riesgos colectivo e individual
- Nivel de riesgo aceptable para las personas (50 años):

Riesgo colectivo



Riesgo individual

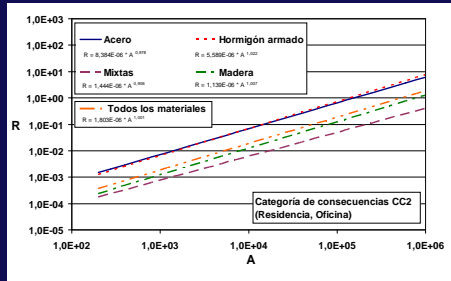


Deducción de criterios de aceptación

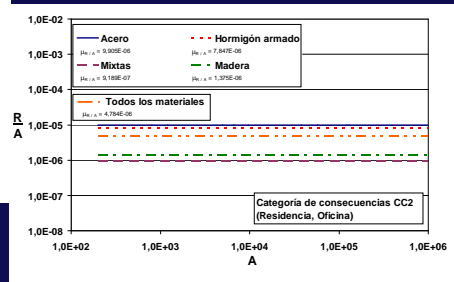
NIVEL DE RIESGO IMPLÍCITO PARA DIFERENTES MATERIALES

- Edificios de la categoría de consecuencias CC2 con estructuras de diferentes materiales constitutivos (50 años; situaciones persistentes)

Riesgo colectivo



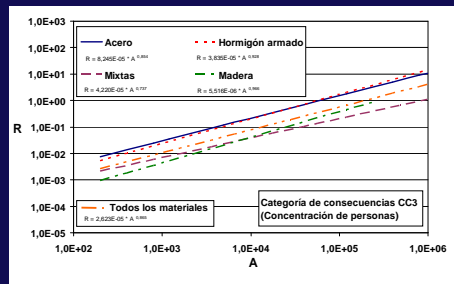
Riesgo individual



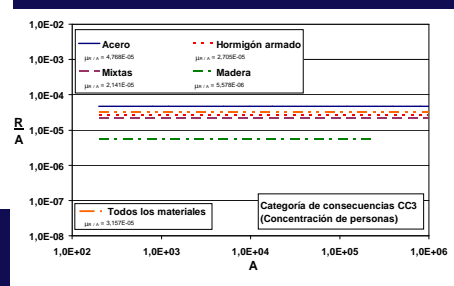
NIVEL DE RIESGO IMPLÍCITO PARA DIFERENTES MATERIALES

- Edificios de la categoría de consecuencias **CC3** con estructuras de diferentes materiales constitutivos (50 años; situaciones persistentes)

Riesgo colectivo



Riesgo individual



JUGANDO CON FUEGO. DECISIONES RELATIVAS A LA FIABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS EXISTENTES

- Contexto
- Seguridad y fiabilidad en ingeniería estructural
- Procedimiento de análisis de riesgos
- Enfoque
- Nivel aceptable de los riesgos nominales
- Interpretación
- Conclusiones



EDIFICIOS RESIDENCIALES Y DE OFICINA

- Valor medio del riesgo individual para las personas, asociado a las estructuras de **acero**

$$\mu_{R/A,CC2} = 9,9 \cdot 10^{-6} \left[\frac{d}{m^2 \cdot 50y} \right] \cong \frac{1}{5'047'955} \left[\frac{d}{m^2 \cdot y} \right]$$

- Valor medio estimado de la superficie, **A**, por persona, **i** (deducido de datos del INE)

$$\mu_{A/i,est} = 30 \left[\frac{m^2}{person} \right]$$



- Riesgo individual medio (estructuras de acero; CC2; situación persistente dominante para cada elemento)

$$\mu_{r,CC2} \cong \mu_{R/A,CC2} \cdot \mu_{A/i,est} = \frac{1}{168'265} [y^{-1}] = 5,9 \cdot 10^{-6} [y^{-1}]$$

COMPARACIÓN

- Riesgo mortal global por accidente (riesgo individual medio)

$$\approx 10^{-4} [y^{-1}]$$



- Requisito para la seguridad de las personas según ISO 2394
General principles on reliability for structures

$$r_{i,adm,ISO} = 10^{-6} [y^{-1}] \quad (\text{valor medio})$$



COMPARACIÓN

- Resultados para estructuras de edificación con diferentes materiales constitutivos (CC2; situación persistente dominante para cada elemento)

Material constitutivo	Riesgo individual medio $\mu_{r,CC2} [10^{-6} \cdot y^{-1}]$	Criterio ISO $r_{i,adm,ISO} [10^{-6} \cdot y^{-1}]$
Acero	5,9	≈1,0
Hormigón armado	4,7	
MLE	0,8	
Mixto	0,6	
Todos	2,9	≈1,0

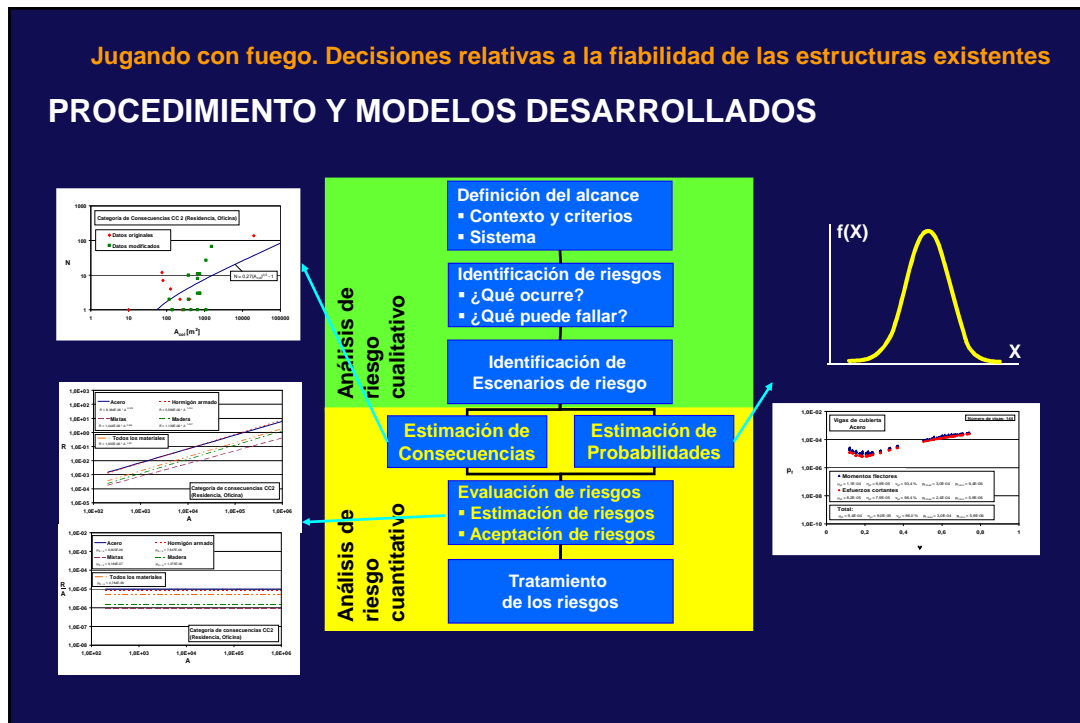
- Resultados son nominales, pero el enfoque es prometedor

JUGANDO CON FUEGO. DECISIONES RELATIVAS A LA FIABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS EXISTENTES

- Contexto
- Seguridad y fiabilidad en ingeniería estructural
- Procedimiento de análisis de riesgos
- Enfoque
- Nivel aceptable de los riesgos nominales
- Interpretación
- Conclusiones



PROCEDIMIENTO Y MODELOS DESARROLLADOS



VENTAJAS DE UN ENFOQUE EXPLÍCITO

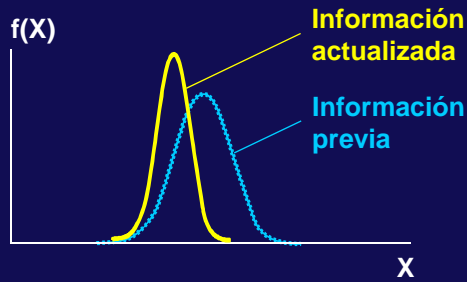
- Reducción de errores humanos a través de análisis cualitativos sistematizados de los riesgos → **reducción de riesgos residuales**
- Base para un **concepto global de seguridad**
- Mayor facilidad de **comunicación de riesgos**
- Base racional para la **adopción de decisiones**:
 - Calibración de modelos para el método de los coeficientes parciales
 - **Fiabilidad de estructuras existentes**
 - Responsabilidades en caso de incidentes
 - Optimización de soluciones
 - **Justificación de soluciones innovadoras**



Jugando con fuego. Decisiones relativas a la fiabilidad de las estructuras existentes

BASE PARA LA EVALUACIÓN DE LA FIABILIDAD DE ESTRUCTURAS EXISTENTES

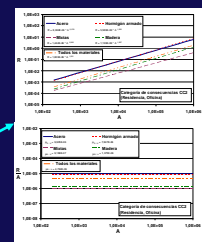
- Actualización de la FDP de una variable X



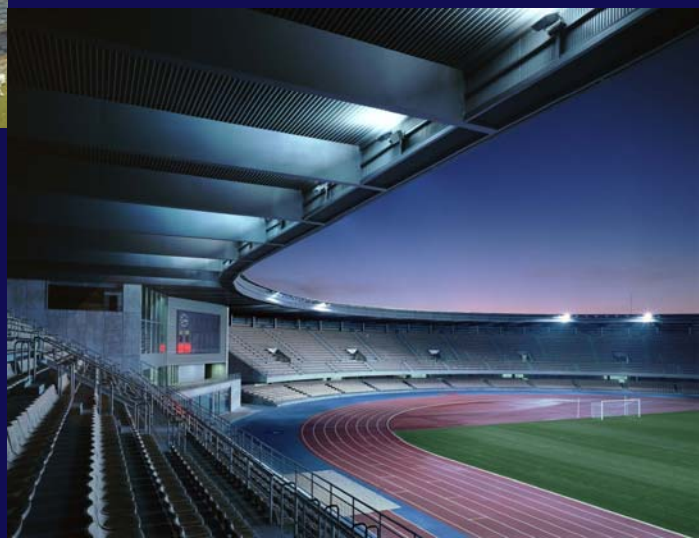
- FDP actualizada se emplea directamente en un análisis de riesgo $\rightarrow P_{f,act} \cdot N = R_{act}$

- Verificación

$$R_{act} \leq R_{adm}$$



Remodelación del estadio de Chapín



Edificio judicial en El Ejido



Trabajo pendiente

DECISIONES POCO RACIONALES EN LA PRÁCTICA

- ¿Qué precio estamos dispuestos a pagar para reducir los niveles de riesgo?
- Adopción de una medida determinada indica que sociedad está preparada de pagar LSC_M para salvar una vida:

$LSC_M \left[\frac{\text{€}}{\text{vida salv.}} \right]$	Medida
60	Vacuna múltiple (países en desarrollo)
$1,3 \cdot 10^3$	Instalación equipo rayos X (CH)
$33,3 \cdot 10^3$	Helicóptero para emergencias (CH)
$200 \cdot 10^3$	Reordenación cruce carreteras (CH)
$3,3 \cdot 10^6$	Alp Transit (CH)
$13,3 \cdot 10^6$	Medidas de seguridad en minas (USA)
$66 \cdot 10^6$	Regulación rascacielos (GB)