



## Seminario 12

# Refuerzo de estructuras con Materiales compuestos

## Durabilidad y Comportamiento frente a Acciones accidentales: Fuego

Madrid, 27 y 28 de mayo de 2013

Angel Arteaga, Dr. Ing. Caminos. IETcc-CSIC

# Durabilidad

*Capacidad de un material compuesto para resistir la fisuración, oxidación, degradación química, delaminación, desgaste, daño por objetos extraños, durante un periodo de tiempo determinado y bajo las condiciones de carga y ambientales actuantes*

- Todos los materiales en construcción sometidos al deterioro físico y mecánico
- Los datos son escasos y contradictorios. Muchas variables
- Los datos de la industria aeronáutica y de los ensayos en laboratorio no pueden ser traspuestos directamente
- La evidencia hasta ahora es que los FRP son muy durables y menos susceptibles a la degradación que la mayoría de los materiales convencionales
- Muchos materiales compuestos: Posibilidad de diseño

# Durabilidad (2)

## Agresivos potenciales

### Efectos ambientales

- Humedad y ambiente marino
- Alcalinidad y corrosión
- Calor y Fuego
- Frío y hielo-deshielo
- Radiación ultravioleta

### Efectos físicos

- Cargas mantenidas: fluencia
- Cargas cíclicas: fatiga



Sinergias entre ellos

# Humedad y ambiente marino

- Los FRP en sustitución del acero en estructuras de hormigón en ambientes marinos
  - No son susceptibles a la corrosión electroquímica
  - La corrosión del acero lleva a una degradación severa
- Algunos FRP se deterioran en ambiente húmedo prolongado
- Diferencia entre los ensayos en laboratorio en reales
- Factores que afectan:
  - Tipo y concentración de sales
  - Tipo proporción de matriz y fibra
  - Interfaz fibra-matriz
  - Método de fabricación/aplicación
  - Temperatura
  - Nivel de tensiones
  - Extensión de daño preexistente
  - Presencia de capas protectoras



# Humedad y ambiente marino (2)

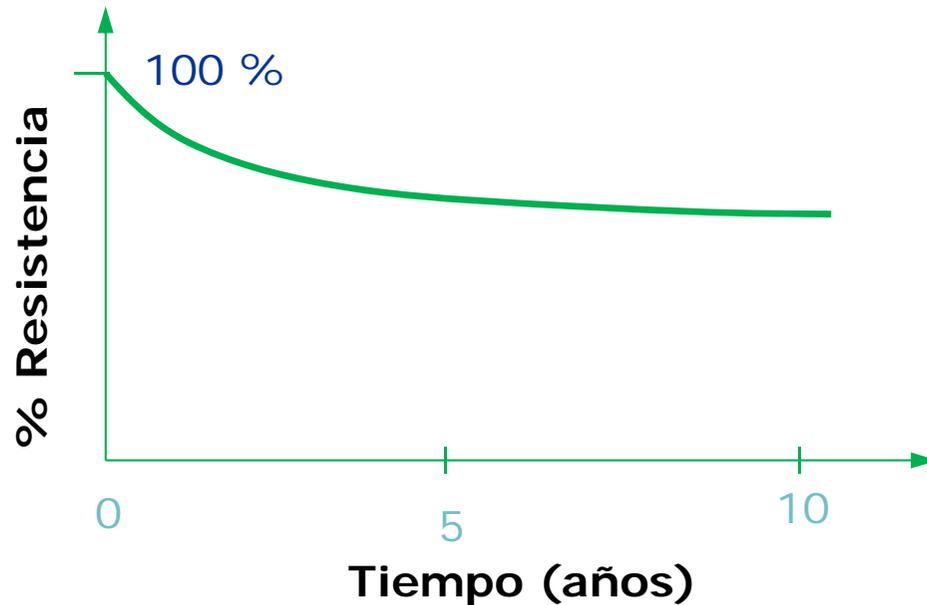
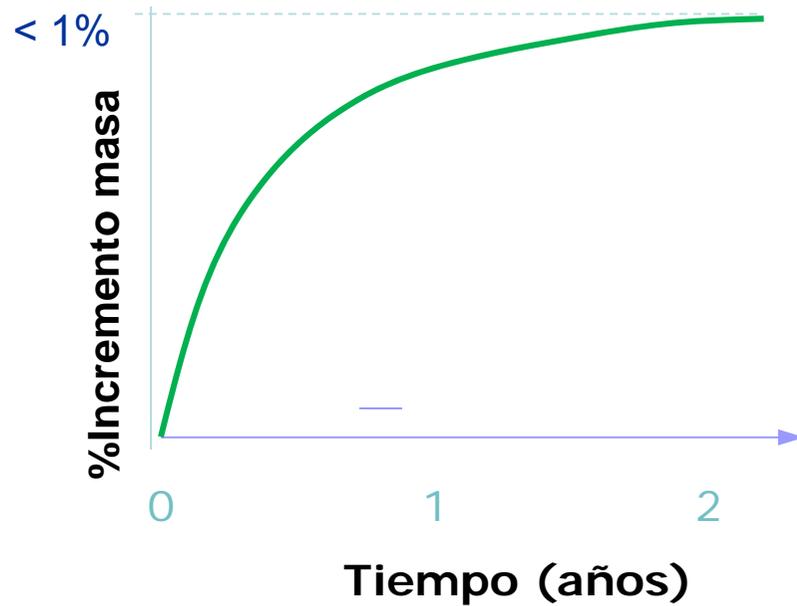
- **Fibras**

- **vidrio:** penetración de la humedad puede extraer iones y resultar deterioro superficial o picaduras: disminución de la tensión de tracción y módulo elástico
- **carbono:** no son afectadas

- **Matrices**

- **viniléster y epoxi:** adecuadas
- **poliésteres:** comportamiento regular

# Humedad y ambiente marino (3)

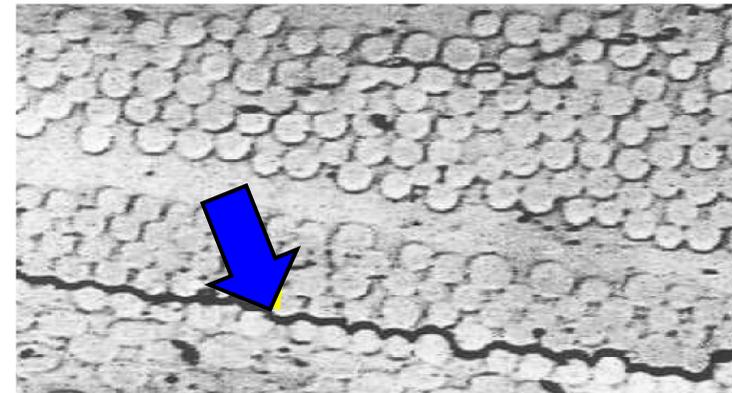


## Sinergias

Absorción de humedad  
Tensiones mantenidas  
Temperaturas elevadas



Micro-fisuración de la matriz

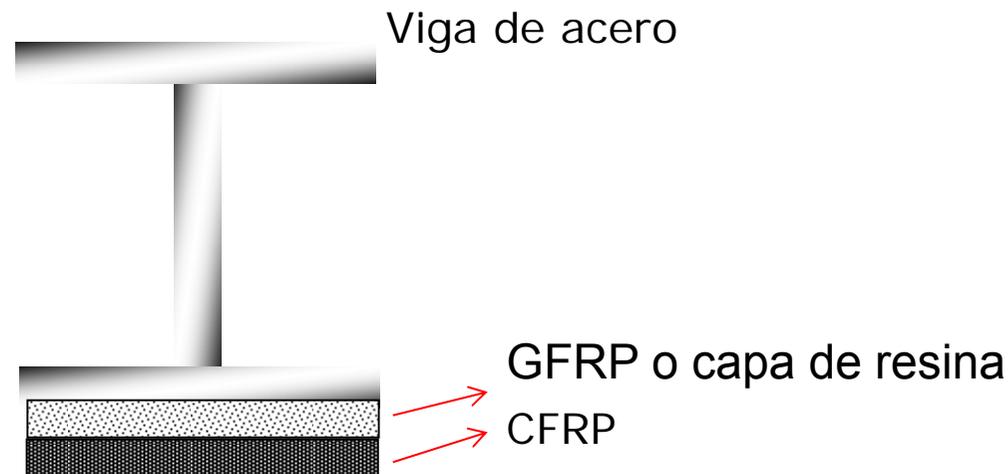


# Alcalinidad

- Peligroso para fibras de vidrio en contacto con hormigón con humedad
- Daño según:
  - la protección de la matriz
  - el nivel de tensiones
  - la temperatura
- Causan el fragilidad de las fibras
  - Vidrio-E: reducción de propiedades del 0 al 75 %
  - Vidrio AR: mejora significativa, pero más cara
  - Carbono: reducción del 0 al 20 %

# Corrosión

- Los FRP no son sensibles a la corrosión electrolítica
- Corrosion galvánica en aceros debida al contacto electrico con un conductor no-metálico en un ambiente corrosivo
  - el contacto directo del CFRP y el acero puede acelerar la corrosión de aceros
  - En refuerzo externo de perfiles: intercalar una capa de resina o una hoja de GFRP



# Heladas y ciclos hielo/deshielo

- Las temperaturas bajo cero pueden inducir tensiones residuales debido al endurecimiento de la matriz y los diferentes coeficientes de dilatación de fibra y matriz



- Microfisuras y deterioro de la adherencia matriz/fibra



- Pueden afectar a:
  - Rigidez
  - Resistencia
  - Estabilidad dimensional
  - Resistencia a la fatiga
  - Absorción de la humedad
  - Resistencia a la alcalinidad
- Los ciclos incrementan los efectos
- No parecen efectos importantes en el FRP

# Radiación ultravioleta

- Daña a la mayoría de las matrices poliméricas
  - Decoloración
  - Oxidación de la superficie
  - Fragilización
  - Microfisuración
- Los efectos en las fibras de vidrio y carbono insignificantes
- Sus efectos combinados con humedad
  - CFRP reducción de resistencia entre el 0 – 20 %
  - GFRP reducción de resistencia entre el 0 – 40 %
- Protección
  - Pinturas resistentes
  - Capa de protección
  - Resinas resistentes
  - Superficies de sacrificio

# Fluencia

- **Fluencia:** Aumento de las deformaciones bajo carga mantenida. **Relajación**
- Buen comportamiento general de las fibras si no hay otros agentes agresivos actuantes
- Las matrices poliméricas pueden dar problemas
- El comportamiento de los FRP es bueno, depende de los constituyentes y método de fabricación
- Pocos valores (ensayos de reciente introducción)
- En los GFRP y AFRP puede producirse la rotura bajo carga mantenida próxima a la de rotura. Sobre todo junto a problemas de alcalinidad: ***corrosión bajo tensión***
- Los coeficientes parciales de cálculo aplicados en guías parecen excesivos: falta de datos

# Fatiga

- Buen comportamiento general de los FRP (igual o mejor que el acero)
- Depende de
  - la tenacidad de la matriz
  - la capacidad de resistir la fisuración
- Comportamiento de los FRP a fatiga
  - CFRP : el mejor
  - GFRP : Bueno
  - AFRP: Excelente

# Altas temperaturas y fuego

- Aspecto de gran interés y preocupación (edificación)
- Falta de conocimiento seguro
- Gran variedad de compuestos: fibras, matrices, adhesivos
- Pueden dar problemas tanto por Reacción al fuego como por Resistencia
- Los FRP usados en construcción degradan sus propiedades con temperaturas superiores a las de transición vítrea de la matriz
- Elección de los materiales adecuados
- Las fibras son poco afectadas y son buen aislante térmico

# Reacción al fuego

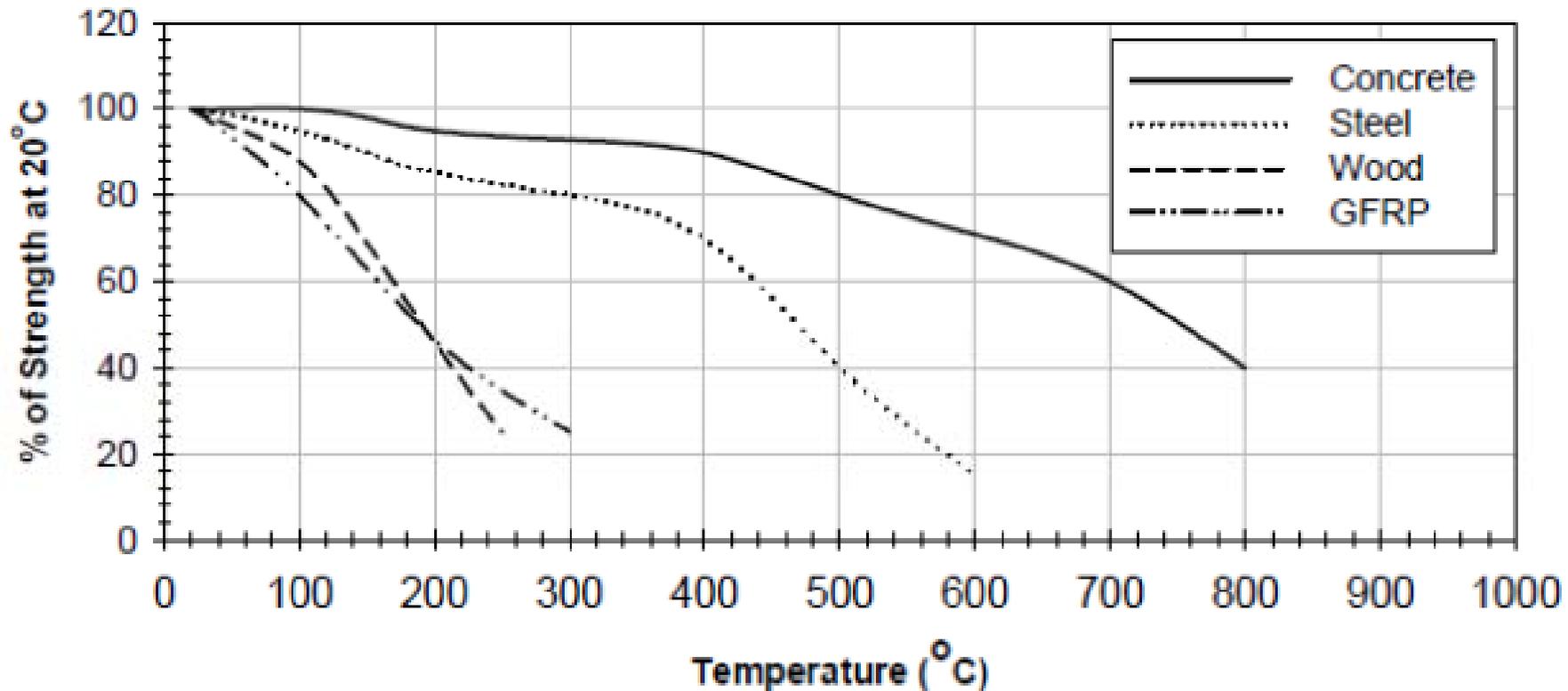
- Las matrices orgánicas arden
- La temperatura de ignición,
- Generan humos negros, densos, tóxicos
- La peligrosidad depende la cantidad de refuerzo, tipo de matrices, proporción de fibra y situación del refuerzo
- Posibilidad de incluir aditivos que limitan los daños

Fibra / Matriz	CO (ppm)	CO <sub>2</sub> (% volumen)	CNH (ppm)	CIH (ppm)
Vidrio / Viniléster	230	0,3	nulo	nulo
Vidrio /Epoxi	283	1.5	5	nulo
Vidrio / Fenólica	300	0.1	7	trazas

- Las fibras en uso no dan problemas

# Resistencia al fuego

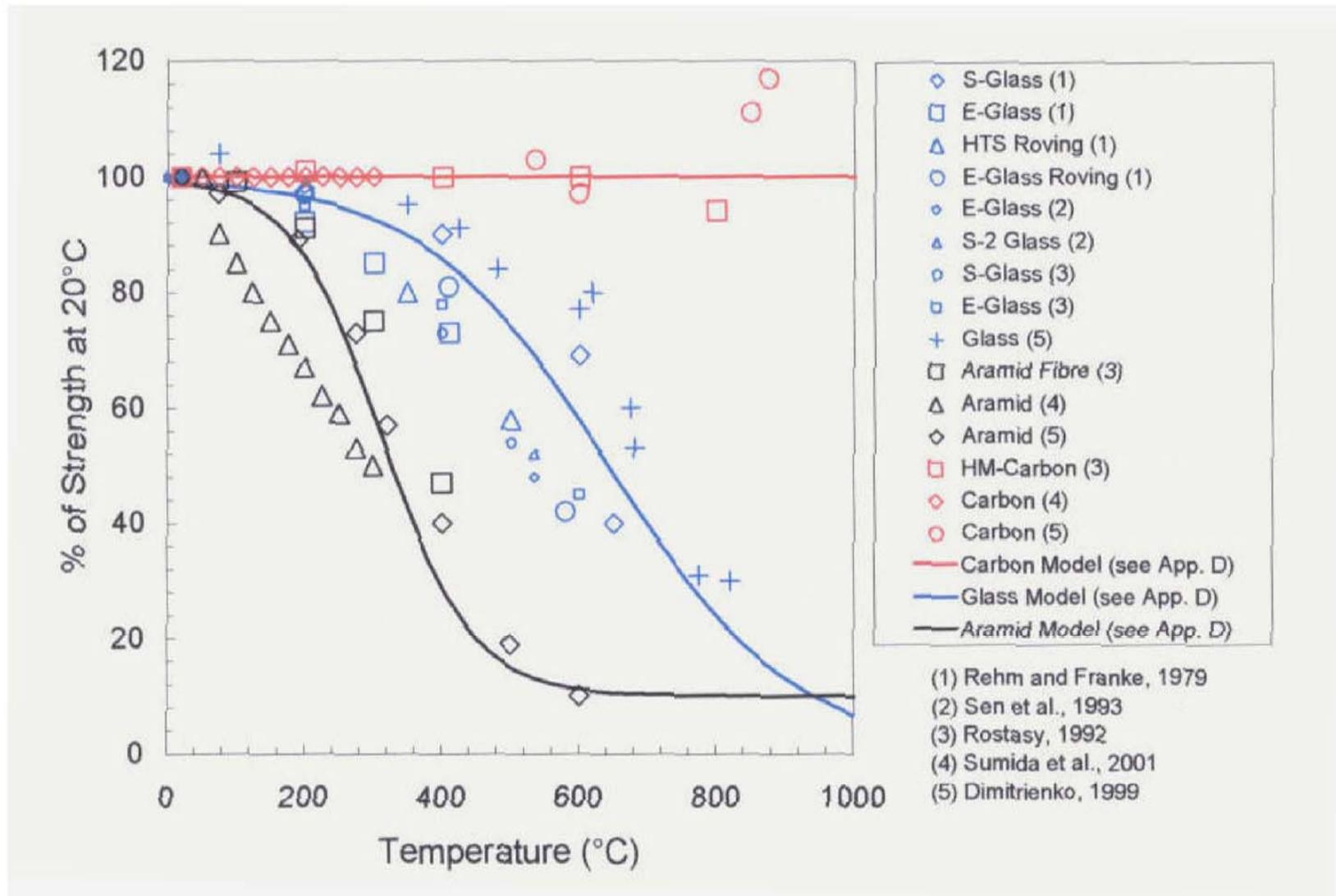
Período de tiempo en que un elemento de estructural puede mantener la función portante que le sea exigible, así como la integridad y/o el aislamiento térmico determinado según ensayo normalizado.



De *Durability of Fibre Reinforced Polymers in Civil Infrastructure* ISIS-Canadá (2006)

# Resistencia al fuego (2)

**Fibras:** pérdida limitada con la temperatura



# Resistencia al fuego (3)

**Matrices:** Pérdidas con la temperatura, influye la formulación y curado

- Poliésteres: válidos hasta temperaturas de 100-140°C
- Vinilésteres: válidos hasta temperaturas de 220-320°C
- Epoxis: rango muy amplio, entre 50 y 260°C
- Fenólicas: muy buenas frente al fuego. Pocos datos, hasta 200°C conservan el 90 % de resistencia

# Resistencia al fuego (4)

## Adhesivos estructurales

- Componente crítico del refuerzo
- Usualmente, epoxídicos,  $T_g = 50$  a  $100^\circ$  C
- El refuerzo sin proteger deja de ser efectivo en pocos minutos en un fuego desarrollado
- Eficaces medios de protección (poco estudiados todavía)

# La situación accidental

**Situaciones accidentales:** *"que se refieren a condiciones excepcionales aplicables a la estructura o a su exposición, por ejemplo, al fuego, a la explosión, al impacto o a las consecuencias de fallo localizado."* (UNE-EN 1990)

- Probabilidad reducida, pero no despreciable ( $\sim 10^{-4}$  durante la vida útil);
- pueden producir daños importantes en la estructura;
- daños no desproporcionados con la acción.

# Situaciones accidentales

- Sismos
- Explosiones
- Impacto
- Vandalismo
- Fallos locales: colapso progresivo
- Incendio

## Verificación de la resistencia

$$R_{fi,d,t} \geq E_{fi,d,t}$$

$R_{fi,d,t}$  Resistencia de cálculo en incendio

$E_{fi,d,t}$  Efecto de cálculo de las acciones

# Acción accidental de cálculo

- Combinación permanente (ELU)

$$\sum_{\forall j} \gamma_{g,j} G_{k,j} + \gamma_P P_k + \gamma_1 Q_{k,1} + \sum_{i>1} \Psi_{0,i} \gamma_{Q,i} Q_{k,i}$$

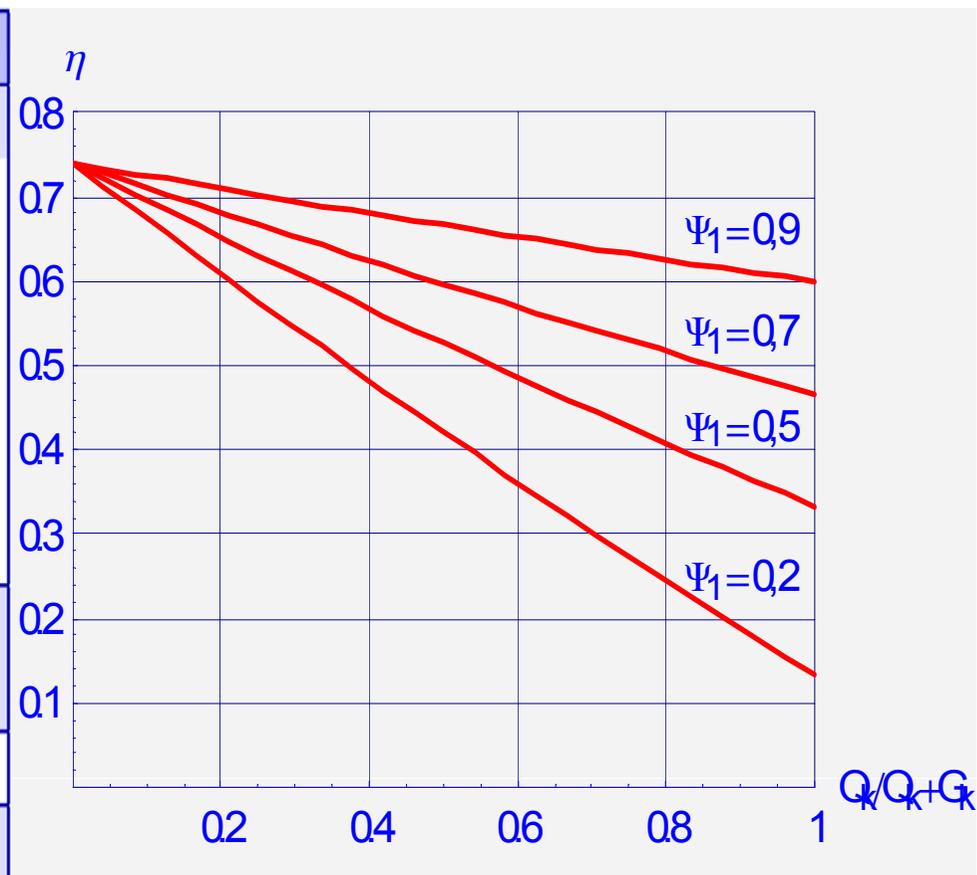
- Combinación accidental

$$\sum_{\forall j} G_{k,j} + P_k + A_d + \Psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i>1} \Psi_{2,i} Q_{k,i}$$

- $\eta_{fi} = \frac{\text{Comb. accid.}}{\text{Comb. perm.}} \sim \frac{\sum_{\forall j} G_{k,j} + \Psi_{1,1} Q_{k,1}}{\sum_{\forall j} \gamma_{g,j} G_{k,j} + \gamma_P P_k + \gamma_1 Q_{k,1}}$

# Acción accidental de cálculo (2)

Acción	$\Psi_0$	$\Psi_1$	$\Psi_2$
Cargas exteriores edificios,			
Categoría A: residenciales	0,7	0,5	0,3
Categoría B: oficinas	0,7	0,5	0,3
Categoría C: reunión	0,7	0,7	0,6
Categoría D: comerciales	0,7	0,7	0,6
Categoría E: almacenes	1,0	0,9	0,8
Categoría H: cubiertas	0	0	0
Cargas de nieve			
Altura $H \leq 1\ 000\ m$	0,5	0,2	0
Cargas de viento	0,6	0,2	0
Temperatura	0,6	0,5	0



# Estrategias frente al fuego

El incendio es preocupación generalizada, pero no bien recogida

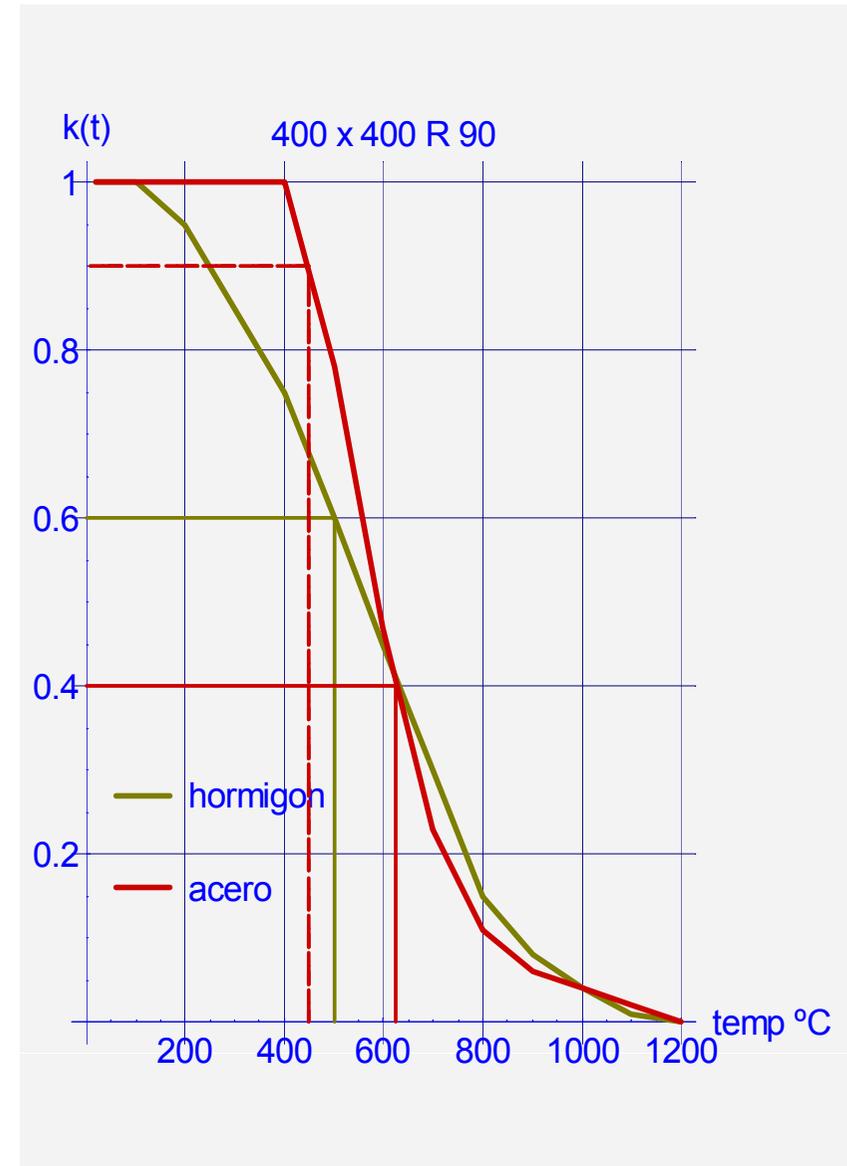
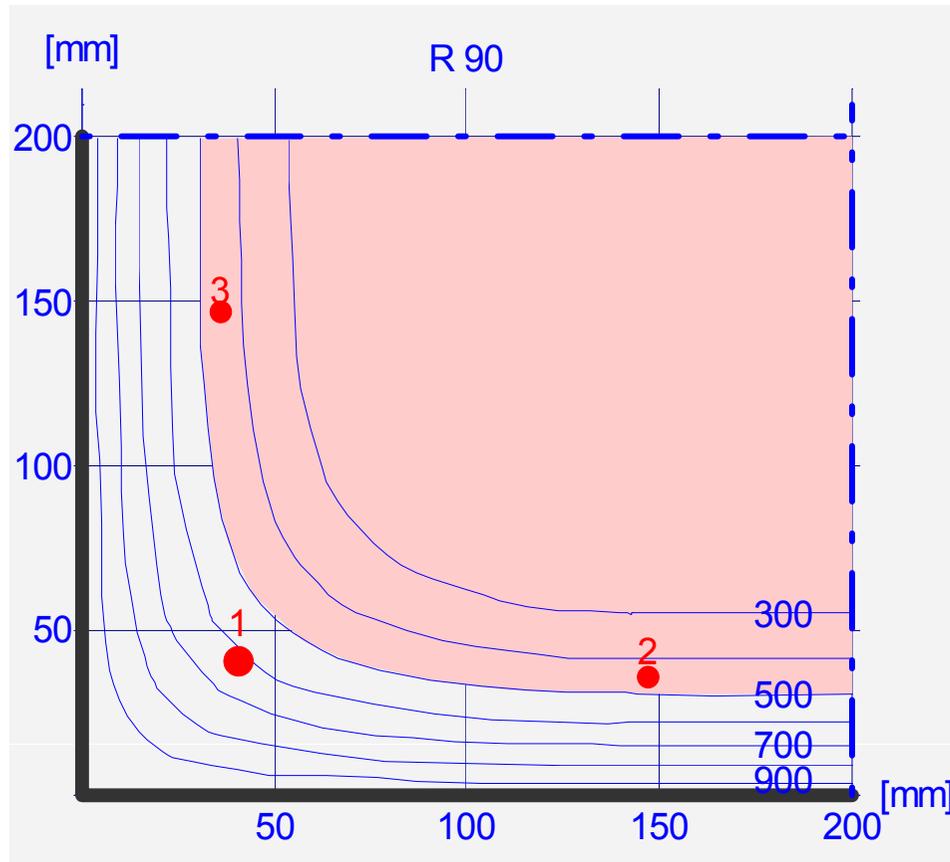
1. Si el refuerzo necesario para los ELU, pero no para la situación accidental: no preocuparse del comportamiento mecánico del refuerzo
2. Si es necesario para la situación accidental : Diseño adecuado
  - Composición del material (matriz+aditivos)
  - Protección mediante aislantes, similares a los utilizados en la protección otros materiales
    - protección frente a temperaturas mucho más bajas
    - puede ser solo necesario proteger la zona de anclajes

# Cálculo de la resistencia

- Si no se considera el refuerzo: indicaciones dadas en ECs (partes 1.2) o CTE según materiales y temperaturas
- Si se puede tener en cuenta el refuerzo: indicaciones dadas en las ponencias (pérdida de resistencia de las fibras)
  - mientras funciona el refuerzo: cálculo “en frío”
  - cuando deja de funcionar: indicaciones dadas en ECs o CTE según materiales y temperaturas

# Cálculo en HA

1. Establecimiento de las isoterma
2. Resistencia de los materiales
3. Resistencia de la sección

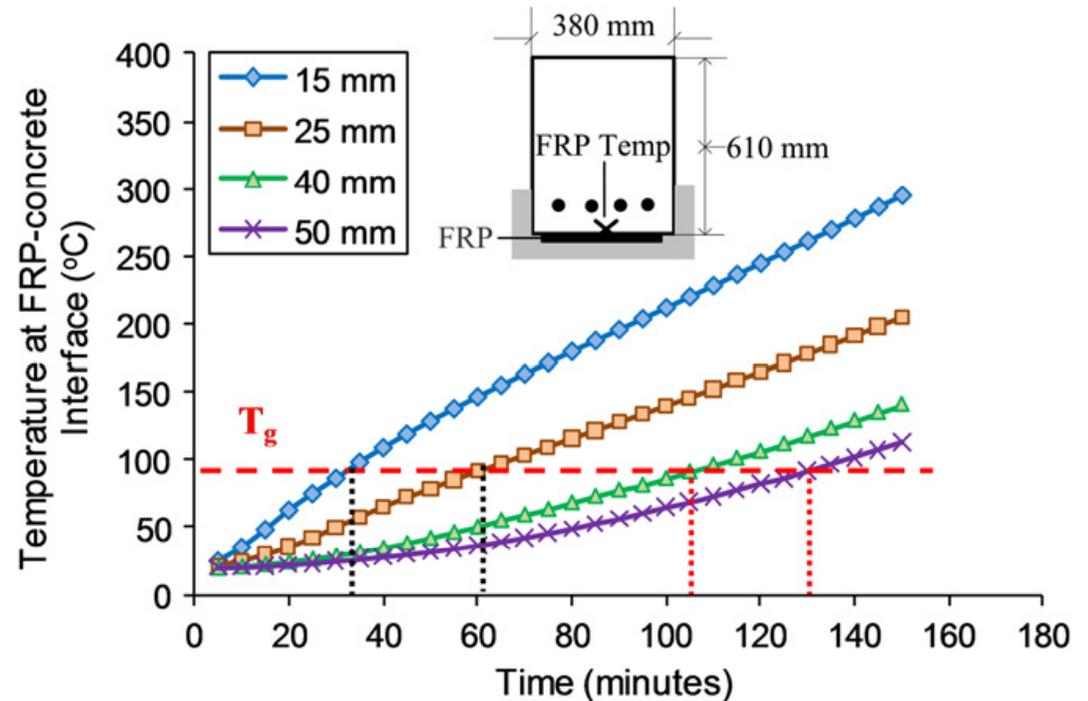


# Cálculo de la resistencia (2)

## Conclusiones

- Las vigas sin protección tiene menor capacidad y rigidez cuando se alcanza  $T_g$
- Las vigas con protección tienen menos deflexiones que la vigas no protegidas
- Las vigas con protección mejor comportamiento aun después del despegue
- La adherencia es perfecta hasta  $T_g$  (del lado de la seguridad)

Protección con vermiculita/yeso



# Refuerzo tras un incendio

- Pérdida de la capacidad resistente de la sección.
- Refuerzo con o sin reparación previa.
- Daños en el hormigón y en la adherencia acero-hormigón
- Isotermas de temperaturas alcanzadas:
  - Evaluables por ensayos no destructivos (?)
  - Resistencia del hormigón según la temperatura (irreversible, lado de la seguridad).
  - Resistencia del acero según la temperatura: reversible.





GRACIAS POR SU ATENCIÓN

[arteaga@ietcc.csic.es](mailto:arteaga@ietcc.csic.es)

Agradecimientos: Proyecto  
Leonardo da Vinci  
CZ/11/LLP-LdV/TOI/134005



Programa de  
Aprendizaje  
Permanente