



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)

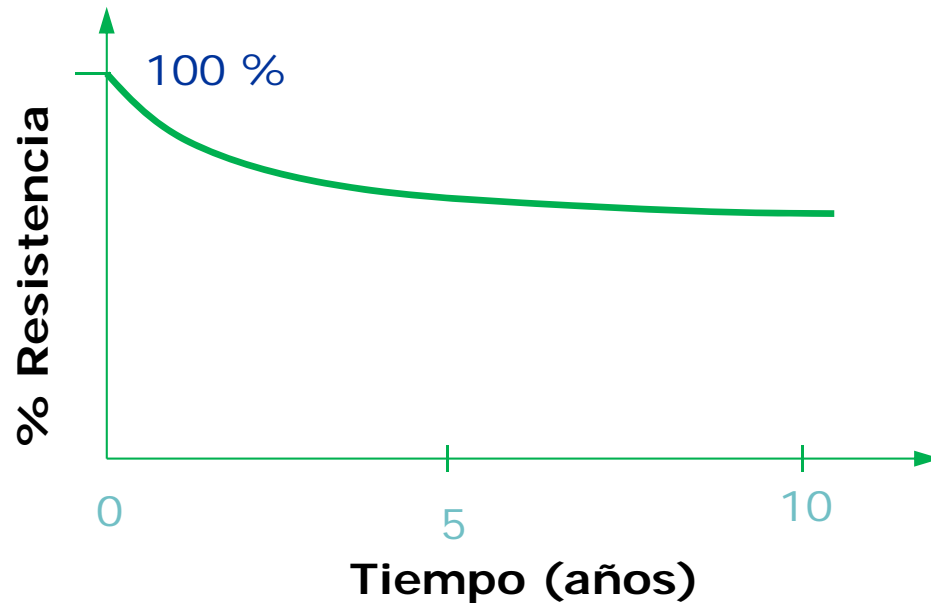
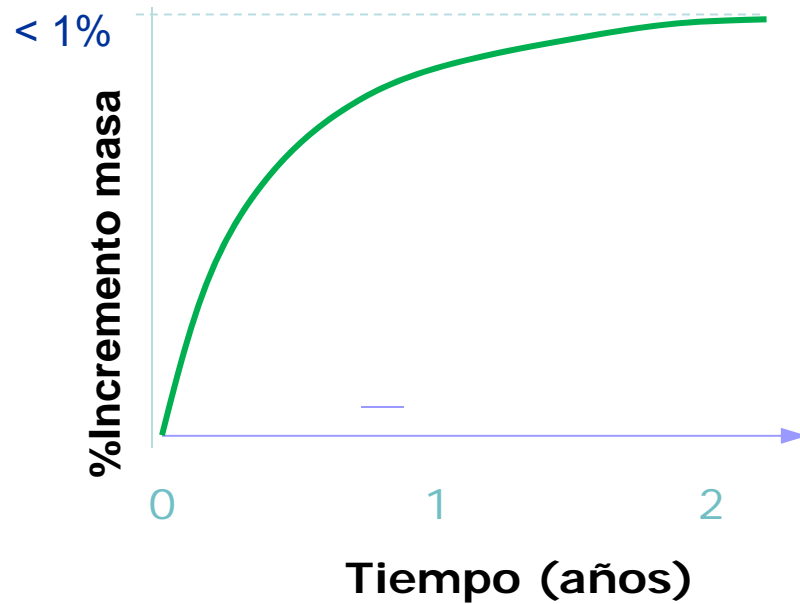
- **Fibras**

- **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)

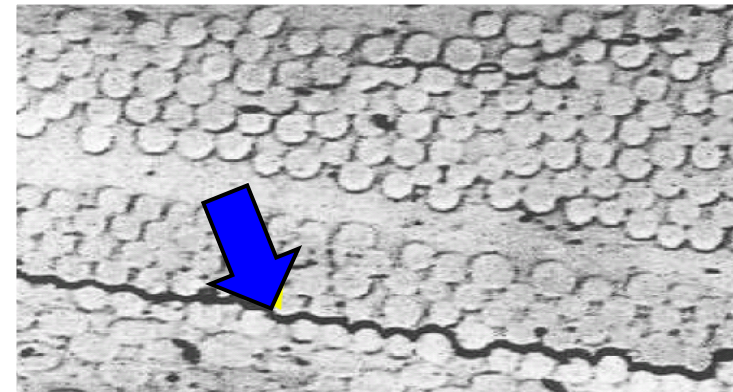


Sinergias

Absorción de humedad
Tensiones mantenidas
Temperaturas elevadas



Micro-fisuración de la matriz

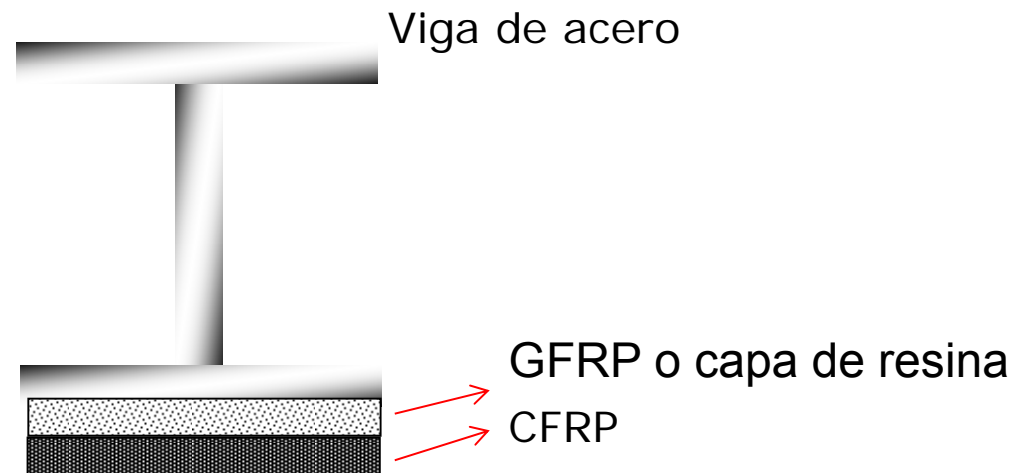


Alcalinidad

- 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

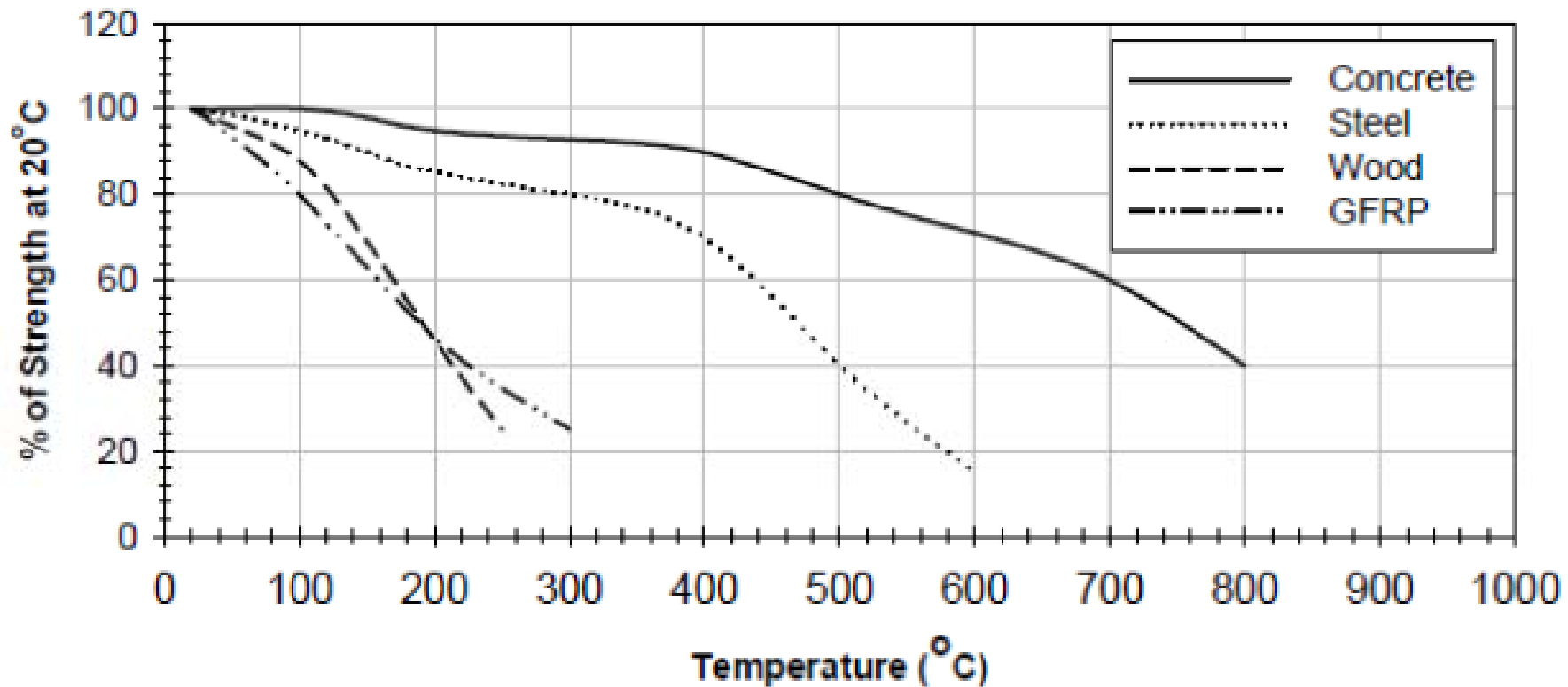
- Las matrices orgánicas arden
- La temperatura de ignición,
- Generan humos negros, densos, tóxicos
- La peligrosidad depende la cantidad de refuerzo, tipo de matrices, proporción de fibra y situación del refuerzo
- Posibilidad de incluir aditivos que limitan los daños

Fibra / Matriz	CO (ppm)	CO ₂ (% 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

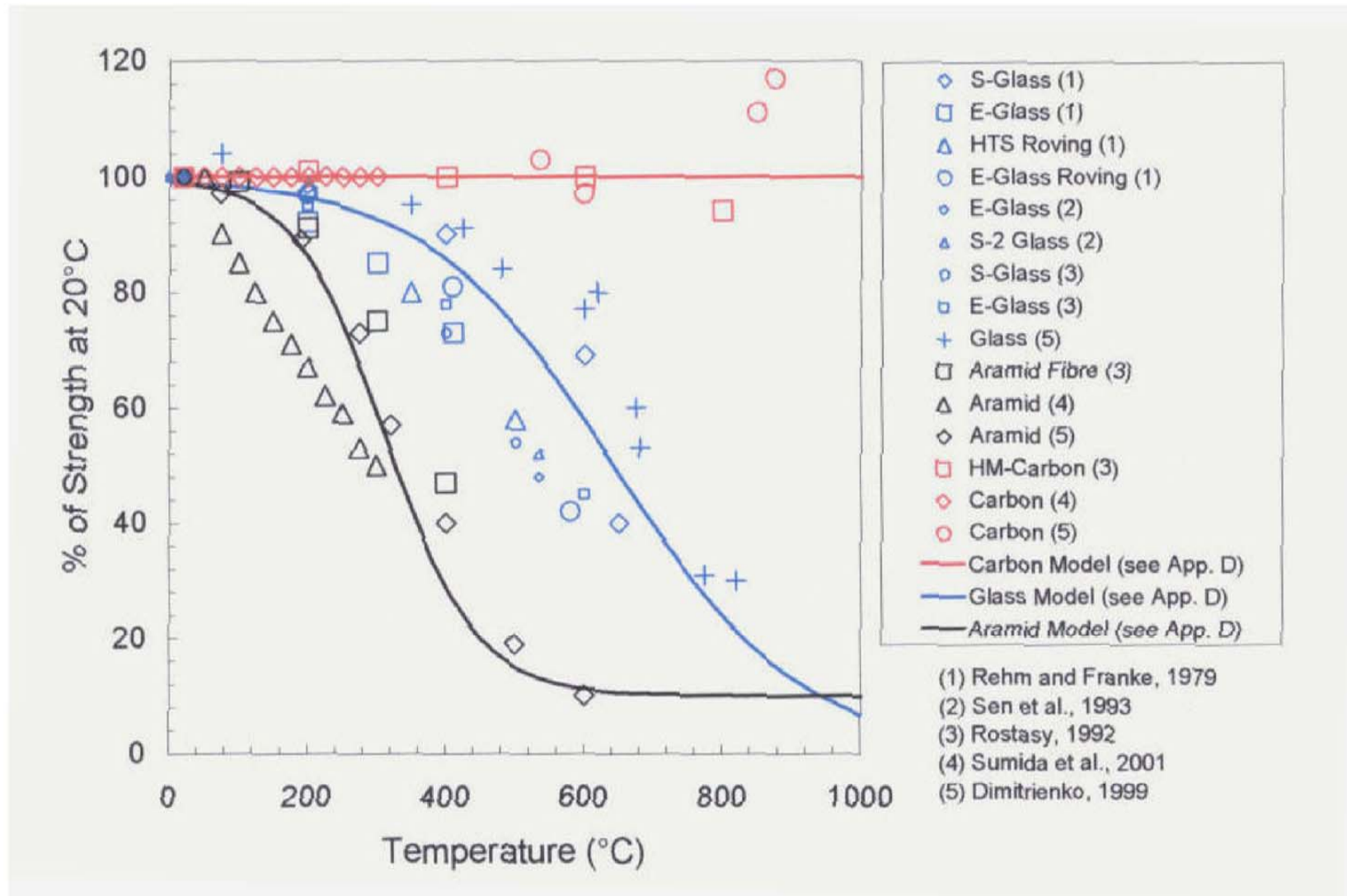
Período de tiempo en que un elemento de estructural puede mantener la función portante que le sea exigible, así como la integridad y/o el aislamiento térmico determinado según ensayo normalizado.



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° 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)

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

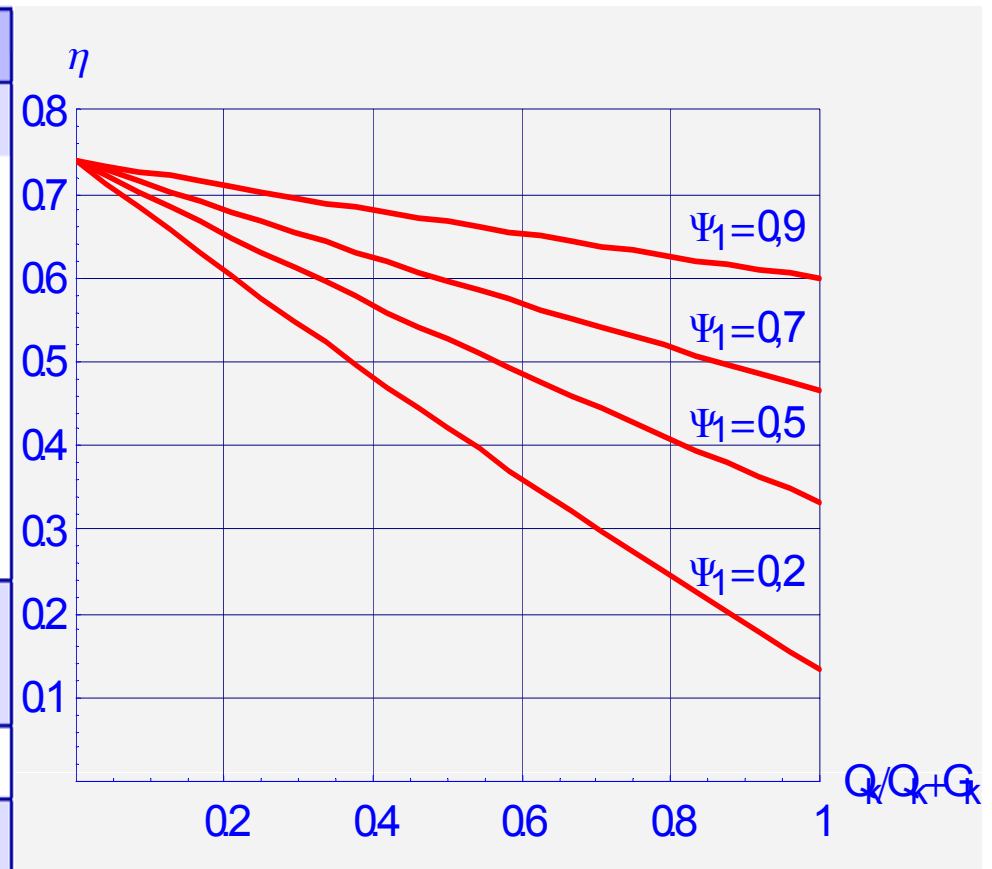
- Combinación accidental

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

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

Acción accidental de cálculo (2)

Acción	Ψ_0	Ψ_1	Ψ_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

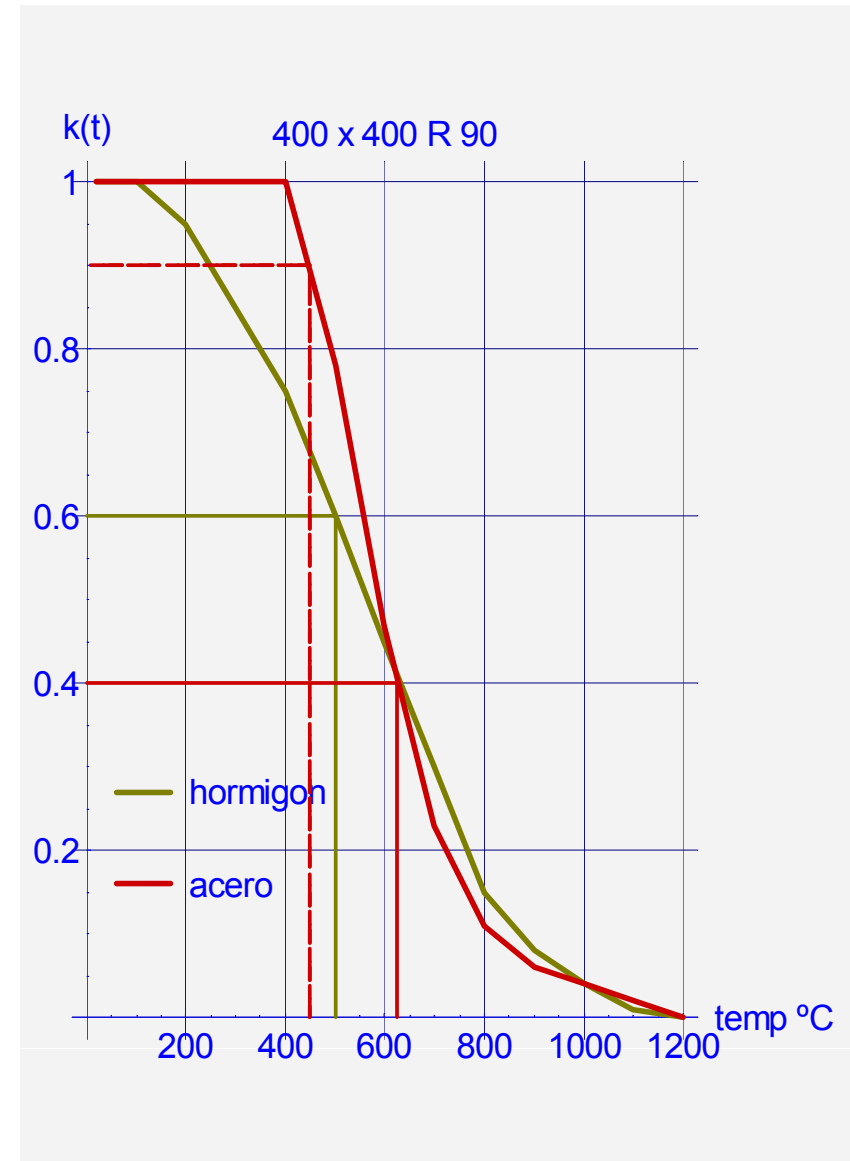
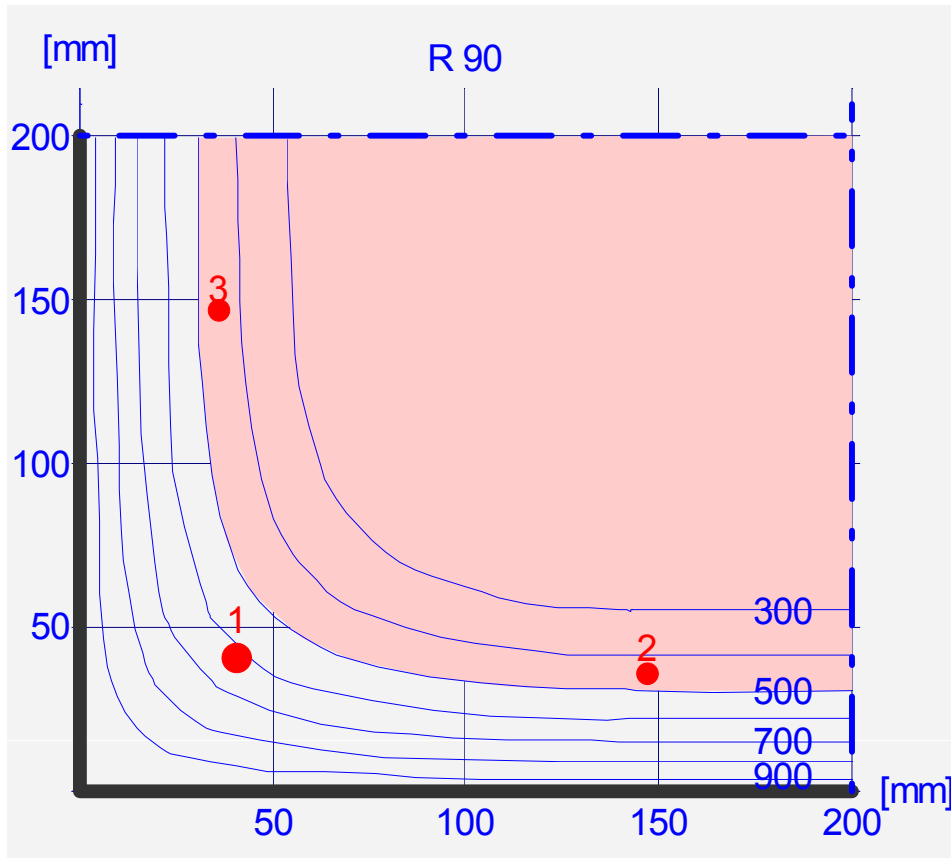
1. Si el refuerzo necesario para los ELU, pero no para la situación accidental: no preocuparse del comportamiento mecánico del refuerzo
2. Si es necesario para la situación accidental : Diseño adecuado
 - Composición del material (matriz+aditivos)
 - Protección mediante aislantes, similares a los utilizados 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

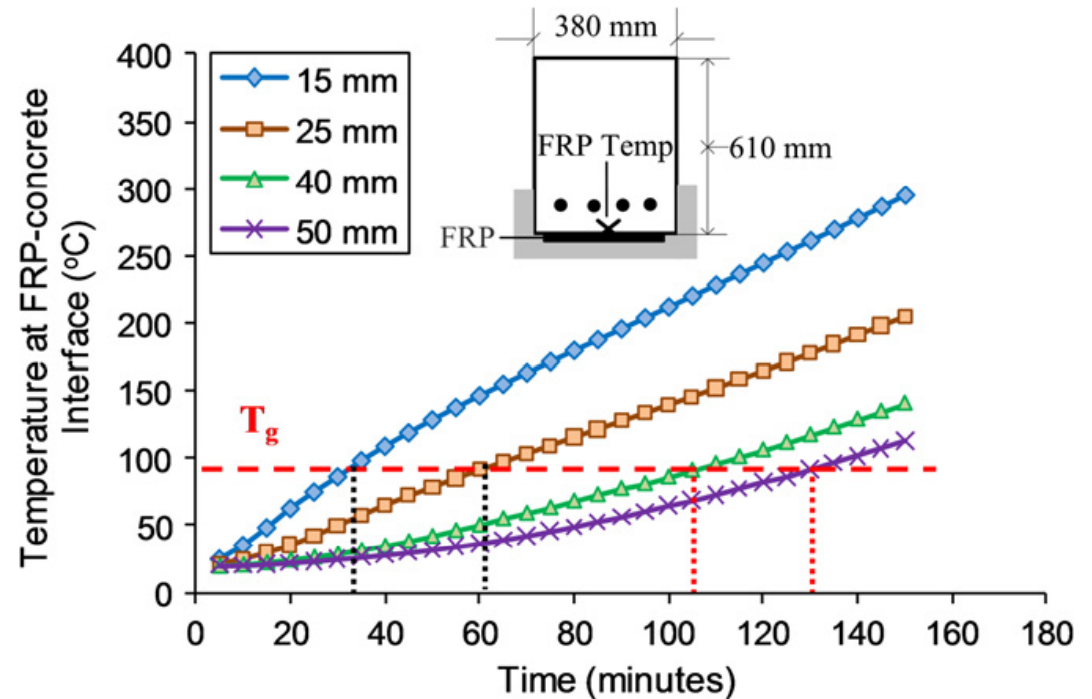


Cálculo de la resistencia (2)

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

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



Programa de
Aprendizaje
Permanente