



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIEROS DE CAMINOS,  
CANALES Y PUERTOS



# Comportamiento frente al fuego de anclaje químico con barras de acero corrugado post-instaladas: evaluación de la influencia de temperatura y tipo de carga en anclajes de barras para ampliación de forjados en nave industrial.

## Trabajo final de grado.

**Alumno:**

Fernández García, Fernando

**Titulación:**

Grado en Ingeniería Civil

**Centro:**

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de  
Caminos, Canales y Puertos (UPV)

**Tutor/es:**

Coll Carrillo, Hugo  
Muciaccia, Giovanni

**Año académico:**

2015/2016

**Fecha de presentación:**

Junio de 2016

## Índice

1.-Introducción .....	3
2.-Anclajes químicos.....	4
2.1.-Método de instalación .....	4
2.1.2.-Método de instalación: Rango de temperaturas .....	7
2.2.-Requisitos del hormigón .....	7
3.-La adherencia entre acero y hormigón .....	8
3.1.-Mecanismo de adherencia.....	8
3.2.-Distribución de la tensión de adherencia y longitud de anclaje .....	13
3.3.-Parametros que condicionan la adherencia. ....	15
4.-Armaduras post-instaladas .....	17
4.1.-Comportamiento adherente de barras corrugadas colocadas a posteriori .....	17
5.-Evaluación de las conexiones de las armaduras post-instaladas.....	19
5.1.-Alcance .....	19
5.2.-Evaluación de la conexión.....	21
5.2.1.-Determinación de la fuerza de adherencia.....	22
6.-Evaluación de las conexiones de armadura post-instaladas en relación a la resistencia al fuego .....	23
6.1.-Procedimiento de la prueba .....	23
6.2.-Valoración de las pruebas.....	23
7.-Trabajo de laboratorio .....	25
7.1.-Introducción al trabajo de laboratorio. ....	25

7.2.-Comportamiento al fuego de los materiales. ....	26
7.2.1.-Propiedad de resistencia y deformación del hormigón.....	28
7.2.2.-Propiedades de resistencia y de deformación del acero:.....	29
7.3.-Explicación del ensayo .....	31
7.3.1.-Creación de probetas.....	31
7.3.2.-Preparación del ensayo.....	33
7.3.3.-Materiales .....	35
7.3.4.-Toma de datos .....	36
7.3.5.-Resultados.....	40
7.4.-Elaboración de datos.....	41
7.5.-Ordenación de los datos .....	44
8.-Aplicación práctica .....	47
9.-Conclusiones .....	59
10.-Bibliografía .....	61

## 1.-Introducción

La estabilidad, la durabilidad y la estética siempre han sido prioridades en la construcción de estructuras, así como la búsqueda de una mayor flexibilidad en la planificación, en el diseño y en la mejora de estas. Para lograr dicho objetivo las técnicas de anclaje juegan un papel fundamental.

Ya desde el siglo primero a.C., Vitrubio introducía en sus libros de arquitectura aplicaciones prácticas mediante anclajes. También estas técnicas de anclaje se pueden observar, por ejemplo, en el Coliseo de Roma, donde se encuentran agujeros para fijaciones. Y así un largo rastro de dispositivos de fijación que se han ido descubriendo en las excavaciones Europeas.

Hoy en día, debido a la constante presión por recortar los plazos de la construcción de estructuras se ha producido un rápido desarrollo en el sector de las técnicas de anclaje. La gran variedad de productos de fijación disponibles y el constante crecimiento de las aplicaciones requieren cada vez más un conocimiento más especializado del comportamiento de estas fijaciones.

Además con el mejor conocimiento del comportamiento de los anclajes químicos conseguimos una mayor optimización a la hora de la elección del producto, así como una mayor seguridad.

Teniendo como objetivo fundamental proporcionar información y criterios con base teórico experimental que permitan entender el fenómeno completamente hemos desarrollado el texto, en el que introduciremos primero los anclajes químicos para poder tener un mejor conocimiento de estos. Seguidamente analizaremos la experiencia de laboratorio, desarrollada a lo largo de cuatro meses en el "Laboratorio de pruebas de materiales del Politécnico di Milano", en el cual se ha llevado a cabo una investigación sobre un aspecto novedoso, como es, llegar a conocer el comportamiento que tienen las barras post-instaladas mediante resinas frente a exposiciones a altas temperaturas. Siendo conscientes de la complejidad que ya tiene de por sí el fenómeno de la adherencia entre el hormigón y el acero, exponemos aquí como se pueden comparar con las resinas. Y de este modo, tratar de llegar a establecer una conclusión sobre como un fenómeno eventual como son los incendios puede influenciar el comportamiento de las uniones estructurales realizadas a posteriori.

## 2.-Anclajes químicos

Los anclajes químicos son la última generación de soluciones para fijar cargas pesadas a elementos de construcción difíciles mediante la inyección de una resina bi-componente dentro de un barreno en el cual se inserta un perno o varilla para sostener dicha carga.

Estos anclajes funcionan por medio de la adhesión que se genera tanto entre la resina y la barra de acero, como entre la resina y el hormigón. Esto será explicado posteriormente con mayor detalle.

Las principales características que definen a una resina son:

- la resistencia mecánica
- la velocidad de endurecimiento.

Hoy en día podemos encontrar distintos tipos de resinas según el tipo de aplicación y la resistencia requerida: (en este trabajo únicamente se analizarán las resinas viniléster y epoxi)

- Poliéster: baja resistencia, uso en fontanería y carpintería.
- Viniléster: mayor resistencia mecánica, apropiadas en el uso de fijaciones de larga resistencia en las construcciones. Se utiliza por ejemplo en la construcción y presentan una resistencia a la corrosión, además una de sus características es que absorben bien el agua, lo único negativo es la mayor contracción respecto a las epoxis.
- Epoxi: mayor resistencia mecánica y una mejor adhesión en los agujeros hechos mediante perforadoras diamantadas, pero el tiempo de endurecimiento es aproximadamente diez veces mayor, por lo que se utilizan principalmente para empalmes de varillas de refuerzo.

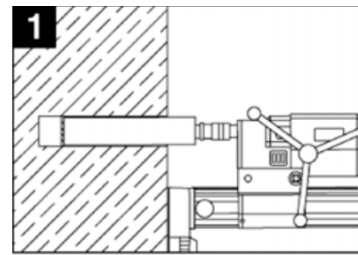
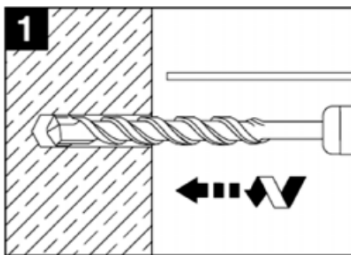
### 2.1.-Método de instalación

Antes de la realización de la perforación hemos de saber el tamaño de la broca con la que vamos a realizar la perforación, es por esto que el Eurocódigo<sup>[1]</sup> nos da la siguiente tabla de relaciones entre el diámetro de la barra que vamos a emplear y el diámetro que debe tener la broca.

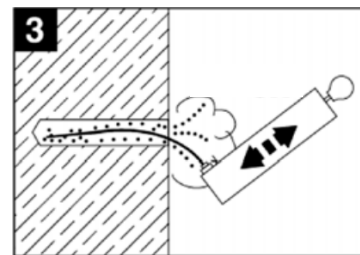
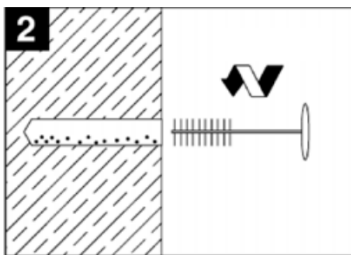
Tabla 1.- Elección del diámetro de la broca según el diámetro de la barra [1]

Diámetro del corrugado $\varnothing$ [mm]	Diámetro recomendado para la broca $d_0$ [mm]
8	10 – 12
10	12 - 14
12	16 – 18
14	18 – 20
16	20 – 22
20	25 – 28
25	30 – 32
28	35 – 37
32	40
36	42
40	47

En primer lugar se hace una perforación que se puede realizar con un taladro mediante martillo rotopercutor o también se puede llevar a cabo con equipo de diamante.



Seguidamente se realiza la limpieza del agujero con un cepillo, que dependiendo de las indicaciones del fabricante, de la resina, varía el número de veces que tenemos que realizar este limpiado. Es también el fabricante el que nos indica el número de veces que se tiene que soplar con el bombín para conseguir eliminar por completo los restos que queden en el interior.



La buena ejecución de todo el procedimiento es muy importante, ya que la influencia que tiene en la máxima resistencia es muy elevada. Esto se puede observar a groso modo en la grafica desarrollada por la empresa HILTI<sup>[2]</sup>

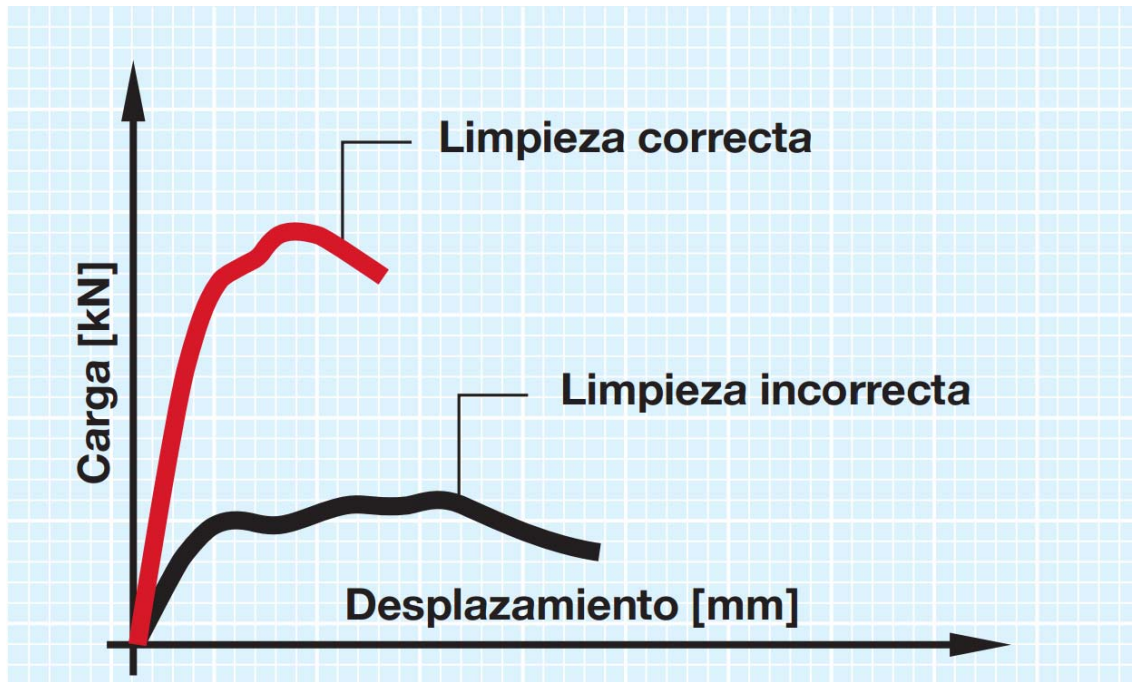
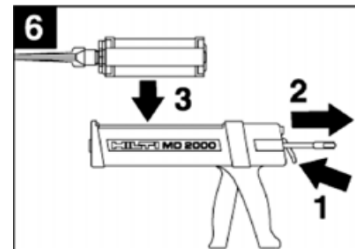
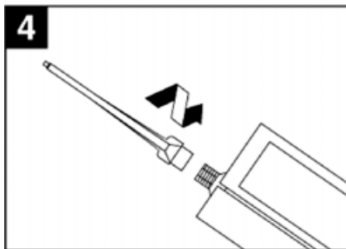


Imagen 1.- Variación de la carga máxima según la limpieza <sup>[2]</sup>

En la grafica podemos observar el papel fundamental que tiene una correcta limpieza, ya que la máxima carga viene considerablemente disminuida y esto puede conllevar al colapso de la estructura.

Una vez tenemos ejecutado el agujero de forma correcta, procedemos a la colocación de la resina en el aplicador, así como a poner el mezclador en el tubo para conseguir la unión de ambos componentes.



Las primeras partes que salgan de resina se desecharan hasta observar un color homogéneo que es sinónimo de una buena mezcla de los dos componentes.

El volumen de resina necesario se puede calcular por diferencia entre el volumen del taladro y el volumen de la barra corrugada. Conviene considerar un margen de consumos adicionales, bien porque se hagan agujeros demasiado profundos, existan coqueras o huecos en el material base, la resina rebose de la fijación u otros.

Se suele tomar como regla práctica: llenar 2/3 del taladro. Cálculo del volumen [ml]:

$$V_{[ml]} = l_{b, inst} \times (D^2 - \phi^2) / 1000$$

V= Volumen insertado de resina [ml]

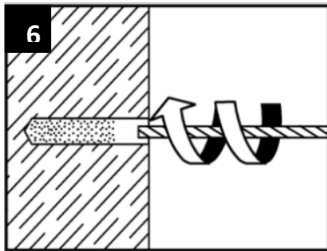
$l_{b, inst}$ =longitud del agujero realizado. [mm]

D=Diámetro del agujero realizado con el taladro. [mm]

$\emptyset$ =Diámetro de la barra corrugada. [mm]

No obstante en la realización en el laboratorio que lleve a cabo y será explicada con más detalle posteriormente, se rellenaba hasta rebosar y una vez introducida la barra se procedía a la eliminación de la resina excedente cuando esta endurecía.

Y finalmente se introducirá la barra realizando giros para una distribución completa y más uniforme de la resina.



### 2.1.2.-Método de instalación: Rango de temperaturas

En el buen funcionamiento de un anclaje es fundamental la influencia de la temperatura. Por ello el productor debe especificar las temperaturas ambientales de instalación mínima y máxima. Normalmente suele ser entre 0 °C hasta +40 °C.

Además también nos deben de ofrecer los datos correspondientes al límite máximo de temperatura de instalación con el tiempo de endurecimiento correspondiente asociado a este y a la temperatura intermedia.

## 2.2.-Requisitos del hormigón

El espesor mínimo en el cual se van a insertar las armaduras tiene que ser:

$$h=h_{ef}+\Delta h > 100 \text{ mm}$$

$h_{ef}$ =longitud de anclaje efectiva.

Los valores de  $\Delta h$  que vienen definidos por la ETAG-001 son los siguientes:

- $\Delta h > 2d_0$  ó  $\Delta h > 30 \text{ mm}$   
Aplicable a todo tipo de anclajes sin restricciones de aplicación.
- $\Delta h > d_0$  ó  $\Delta h > 15 \text{ mm}$   
Aplicable a todo tipo de anclajes. Será utilizado cuando la superficie del hormigón puede ser analizada para garantizar que no hay ruptura.
- $\Delta h = 0$   
Aplicable a inyecciones. Este será utilizado cuando se puede asegurar que la longitud  $h_{ef}$  será alcanzada .



### 3.-La adherencia entre acero y hormigón

La comprensión del fenómeno de la adherencia entre acero y hormigón ha interesado mucho desde la aparición del hormigón armado. Se puede definir esta adherencia como el principio básico del funcionamiento del hormigón armado como material estructural por el cual se transmiten los esfuerzos de tracción del hormigón al acero. Identificamos tres componentes diversos de este fenómeno:

- Fuerza adhesiva entre acero y hormigón
- Una fuerza de apriete debida a la contracción del hormigón que tiende a ocupar el espacio del acero.
- Una resistencia de fricción debida a la superficie que no es perfectamente lisa debido al desplazamiento de la barra respecto al hormigón.

#### 3.1.-Mecanismo de adherencia

El mecanismo de adherencia viene gobernado por la presencia de tres aspectos:

- Adhesión química.
- Rozamiento.
- Interacción mecánica

Para valores muy pequeños de la tensión de adherencia,  $\tau_b$ , el fenómeno que se da, viene gobernado sobre todo por la adhesión del tipo química, la cual permite al hormigón seguir la deformación de la armadura sin un apreciable desplazamiento. Esto se da principalmente en las barras lisas.

En esta primera fase, de adhesión química, la tensión de adherencia se debe a la interconexión físico-química de partículas del cemento con la rugosidad de la superficie de contacto de las armaduras.

Por lo tanto, la adherencia representa la condición que determina el equilibrio entre la fuerza  $F$  a la cual es expuesta la barra y las tensiones tangenciales  $\tau_b$  a lo largo del perímetro de la barra. Imagen 2.

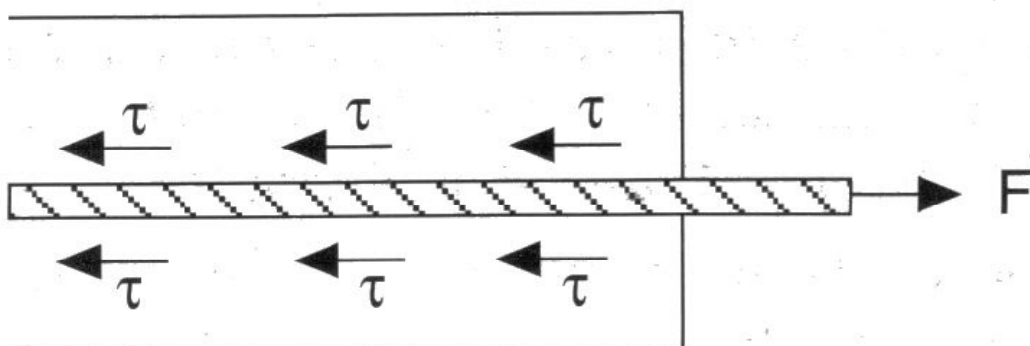


Imagen 2.- Tensión de adherencia

Incrementando la fuerza  $F$ , la adhesión de tipo químico se anula, inicia un pequeño desplazamiento entre el acero y el hormigón y se produce una resistencia de fricción directamente relacionada con la rugosidad de la superficie de la barra, ya que son las corrugas de la barra las que inducen la tensión en el hormigón.

En esta segunda fase del desarrollo de la adherencia empieza el verdadero desplazamiento entre los dos materiales, que conlleva llegar al límite de la resistencia a tracción del hormigón y por tanto a la aparición de la primera fisura. (imagen 3 y 4)

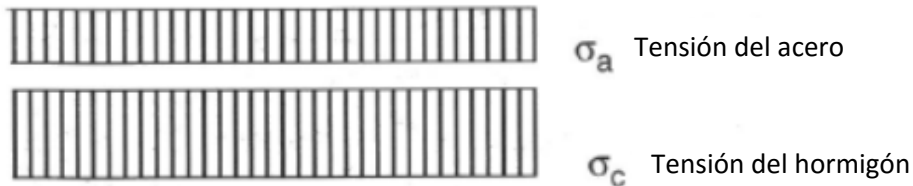


Imagen 3.-Estado tensional acero-hormigón sin fisurar

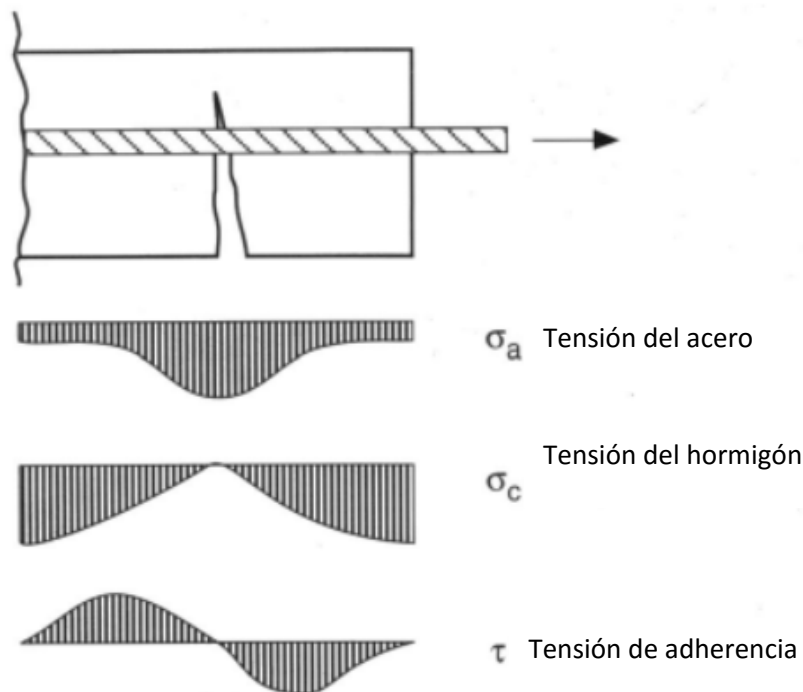


Imagen 4.-Estado tensional acero-hormigón tras la primera fisura

La fase de interacción mecánica acero hormigón, generalmente obviada para las barras lisas, representa la principal fuente de adherencia para las barras corrugadas.

De hecho, las corrugas de la barra una vez superada la adhesión química, empiezan a empujar hacia el exterior el hormigón que las envuelve. Se crea de este modo en el hormigón que engloba la barra un estado de compresión y de tracción que conllevan a la formación de fisuras.

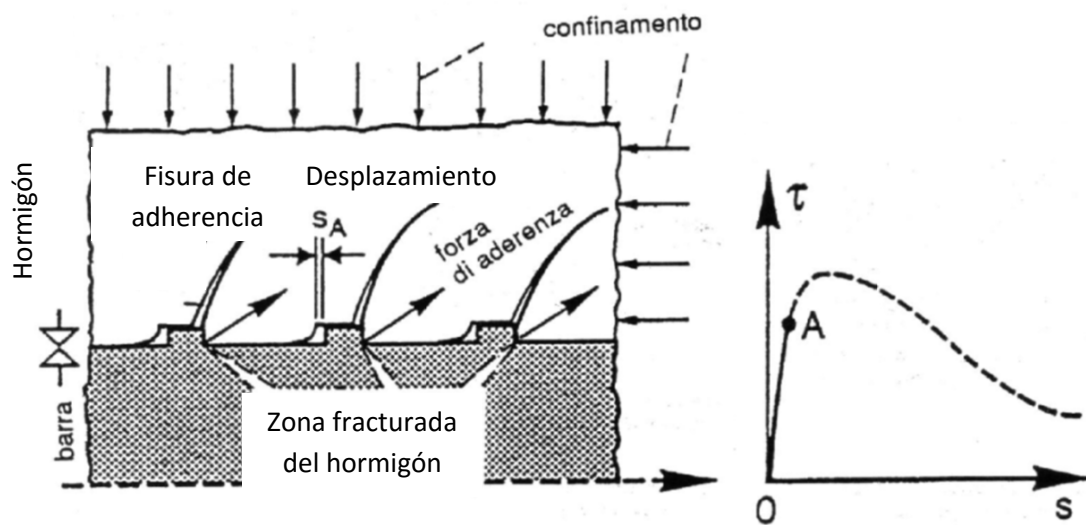


Imagen 5.- Apertura de la fisura y relativo diagrama tensión de adherencia-desplazamiento

El desplazamiento,  $S_A$ , entre los dos materiales coincidirá con la medida de la amplitud de las fisuras. De modo que con el aumento de la fuerza  $F$  las fisuras transversales tienden a propagarse según una superficie cónica inclinada con un ángulo  $\gamma$  respecto al eje de la barra. (Imagen 6) Es aquí donde podemos observar que el papel que juega el espesor del recubrimiento, es muy importante, ya que si no existe confinamiento alguno, cuando las fisuras alcancen la superficie se produce el fallo.

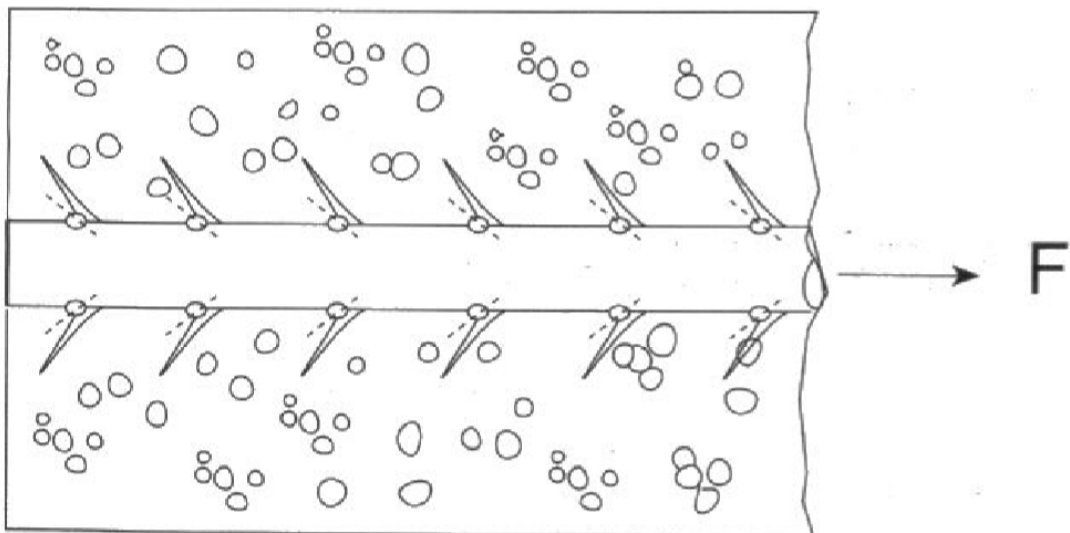


Imagen 6.- Propagación de las fisuras con un ángulo determinado respecto al eje de la barra.

La fase siguiente se caracteriza por un incremento de las fisuras. El diagrama tensión de adherencia- desplazamiento deja de ser lineal y basta un leve incremento de la tensión para

aumentar sensiblemente la amplitud de la fisura y consecuentemente el desplazamiento. (Imagen 7)

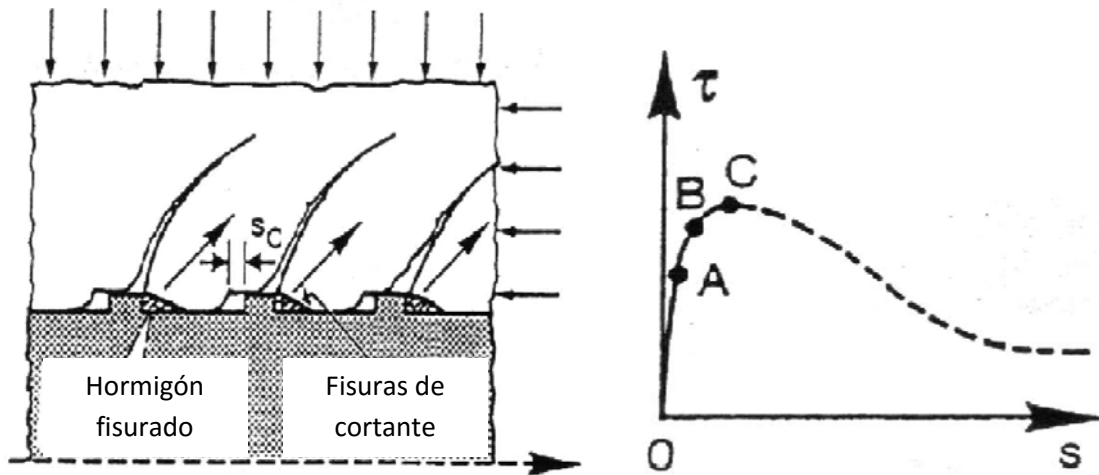


Imagen 7.- Apertura de la fisura y relativo diagrama tensión de adherencia-desplazamiento

Tras la fisura se forma una sucesión de bielas de compresión del hormigón dispuestas según la superficie inclinada respecto al eje de la barra. Las tensiones de compresión tienen el efecto de desmoronar localmente el hormigón y de asumir la formación de fisuras a cortante perpendiculares a la dirección del mismo esfuerzo.

La tensión de adherencia está compuesta por una  $\tau_b$  en dirección del eje de la barra que se equilibra con la fuerza  $F$  y una tensión ortogonal  $\tau_b \times \text{tg}\theta$  que solicita el hormigón circundante con una tracción de tipo circunferencial.

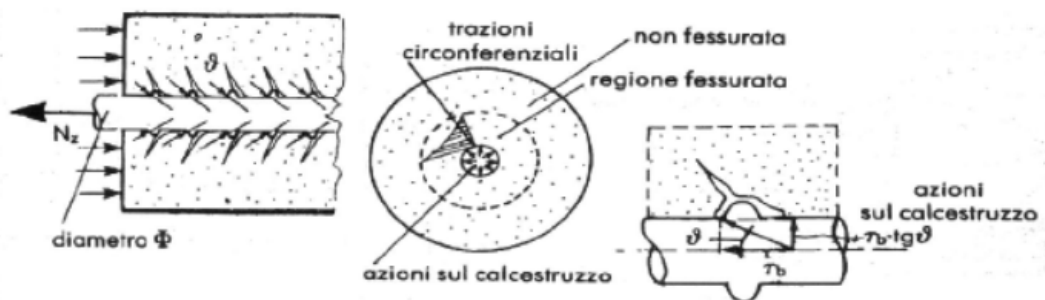


Imagen 8.- Indicación esquemática del disco coaxial de hormigón solicitado a tracción circunferencial.

Si el espesor de recubrimiento de la barra es inferior a un cierto valor mínimo, la tensión circunferencial puede generar fisuras longitudinales, con la pérdida del equilibrio al decaimiento de la tensión de adherencia.

Al alcanzar el valor de  $\tau_{ba}$  (punto A en la gráfica de la imagen 7) tiene inicio la fisuración oblicua con formación de bielas inclinadas de hormigón en la superficie de contacto de la barra explicada anteriormente.

Para las barras lisas, corresponde con la tensión  $\tau_{bu0}$ , que representa la última resistencia. Se inicia un desmoronamiento del hormigón en la proximidad de las bielas de compresión, a lo que le sigue una rápida caída de la resistencia con desplazamientos crecientes, la resistencia se estabiliza en el valor  $\tau_{br}$ . Es decir, en ese punto únicamente está actuando ya la fuerza de fricción. (Imagen 9)

Para las barras corrugadas (la resistencia puede aumentar desde el punto B hasta el valor  $\tau_{bu}$ , punto C) el aplastamiento del hormigón se concentra en las zonas superiores de los dientes que representan los principales conjuntos de las bielas compresas.

También en este caso se inicia a verificarse la caída de la resistencia C, pudiendo ser con un colapso repentino y consecuentemente colapso por splitting; o por otro lado, al igual que antes llega un momento en que únicamente está actuando la fuerza de fricción ( $\tau_{br}$ ).

Los dos tipos de fallos que encontramos son:

#### Splitting

Consiste en la aparición de fisuras longitudinales en el recubrimiento según la dirección de la armadura. Se produce cuando las tensiones de tracción generadas por la adherencia superan la resistencia a tracción del hormigón y no existe confinamiento adicional al proporcionado por el recubrimiento. Debido a que la dirección de estas fisuras coincide con la del refuerzo, exponen a la armadura en toda su longitud y resultan peligrosas sobre todo desde el punto de vista de la durabilidad de la estructura. Este tipo de fallo de adherencia es el más común en estructuras de hormigón armado con barras corrugadas, debido a los escasos recubrimientos y a las cuantías de armadura transversal normalmente utilizadas en nuestras estructuras.

#### Pull – Out

Consiste en el deslizamiento de la armadura dentro del elemento de hormigón. Se pueden distinguir dos tipos:

- Deslizamiento de la barra, generalmente se produce en barras lisas.
- Arrancamiento según una superficie envolvente de las corrugas, si las condiciones de confinamiento son elevadas, o queda garantizada la adherencia entre el hormigón y el acero. En estructuras reales este tipo de fallo se produce en raras ocasiones.

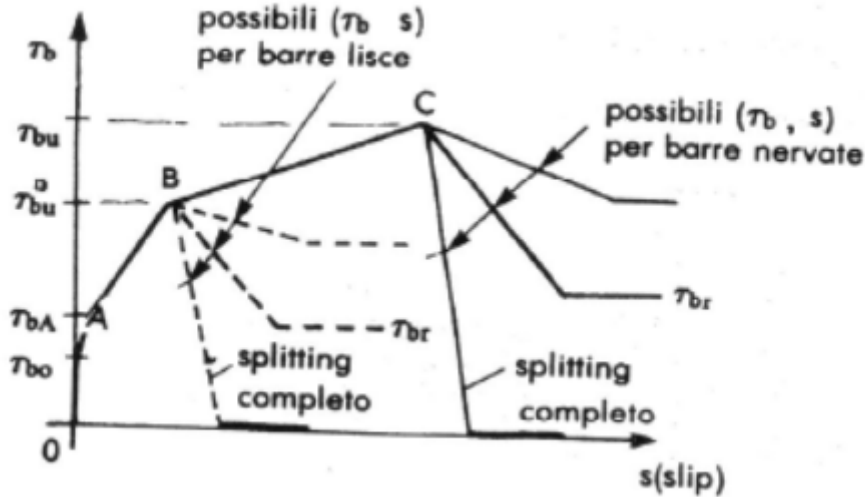


Imagen 9.-Modelo teórico de Tassios de la ley de tensión adherencia-desplazamiento

### 3.2.-Distribución de la tensión de adherencia y longitud de anclaje

Para el estudio de la distribución de la tensión de adherencia, se efectúa un análisis de un tirante en hormigón armado.

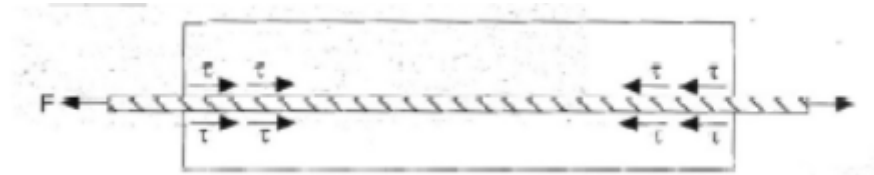


Imagen 10.-Tirante en hormigón armado

La parte de la barra que no está en el hormigón absorbe la fuerza de tracción  $F$ . En el tramo sucesivo la sección resistente viene dada por la sección compuesta por acero y hormigón.

Existe por tanto una longitud mínima de anclaje de las barras indispensable para que se dé la completa transferencia de los esfuerzos entre acero y hormigón.

La distribución de la  $\tau_b$  a lo largo del tramo de transferencia no se conoce con exactitud, el comportamiento indicado en la imagen 11 que presenta un pico en la proximidad del lado cargado viene considerado suficientemente cercano al real. Por sencillez se asume un valor  $\tau$  medio.

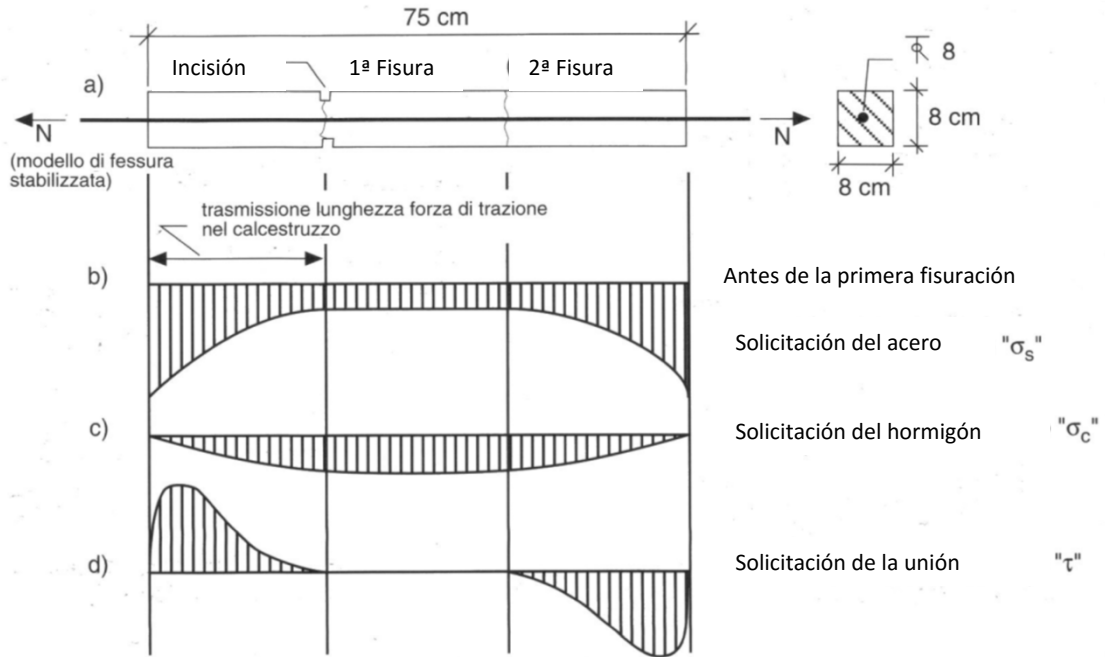


Imagen 11.-Distribución de la tensión en un tirante en hormigón armado.

Las hipótesis asumidas son las siguientes:

- El comportamiento del acero es elástico y lineal (Ley de Hooke).
- No se tienen en cuenta las deformaciones del hormigón a tracción.

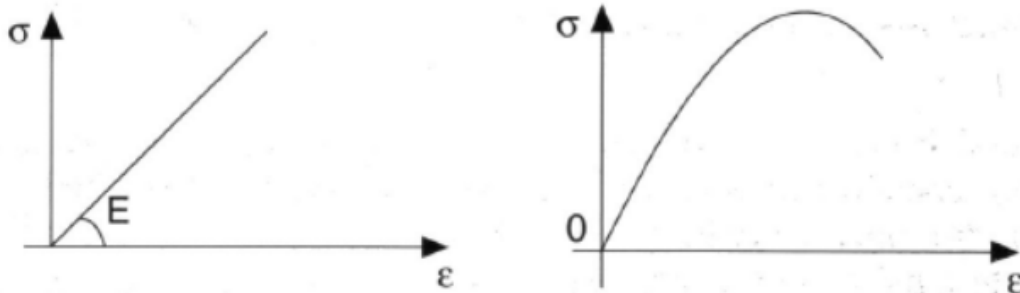


Imagen 12.-Diagrama tensión-deformación del hormigón y comportamiento elástico de las deformaciones.

La condición de transferencia de la fuerza normal  $F$  de la barra al hormigón a través de la tensión de adherencia  $\tau_b$  se expresa como una ecuación de equilibrio del desplazamiento horizontal de la fuerza actuante en la dirección de la barra; tal fuerza es la "fuerza de anclaje" y la " fuerza de deslizamiento del acero".

La fuerza máxima de anclaje viene dada por:

$$F_{\max(\text{anc})} = \pi \cdot r \cdot l_b \cdot \tau_{\max}$$

Donde:

$$\tau_{\max} = 2.5 \cdot \sqrt{f_{ck}}$$

r= radio de la barra.

l<sub>b</sub>= longitud de anclaje.

La fuerza máxima de deslizamiento del acero resulta:

$$F_{\max(\text{desl})} = \pi \cdot r^2 \cdot f_y$$

Donde:

f<sub>y</sub>= resistencia del acero.

r= radio de la barra.

Por lo tanto se obtiene que la longitud de anclaje viene dado por:

$$l_b = \frac{f_y \cdot r}{2.5 \cdot \sqrt{f_{ck}}}$$

### 3.3.-Parametros que condicionan la adherencia.

Una vez conocido el comportamiento de las barras y el hormigón, es útil nombrar los parámetros que más influyen, y por tanto son determinantes en la adherencia.

- **Superficie de la barra**

La superficie de la barra influye sensiblemente en las trasferencia de fuerzas al hormigón. Barras muy lisas carecen prácticamente de adherencia, mientras que por el contrario la presencia de superficies rugosas sí que la hace aumentar.

- **Características de las corrugas**

La forma y el ángulo de las corrugas son esenciales en la determinación de la resistencia al corte. Las corrugas con sentido oblicuo poseen una mayor eficacia que las anulares, ya que tienen un efecto de "bloqueo" de las fisuras, se podría decir que son como el refuerzo transversal adicional.

- **Diámetro de la barra**

A igualdad de área de acero, es preferible tener más barras de menor diámetro que pocas de gran diámetro, ya que de este modo reducimos la tensión a las que se ven afectadas.

- **Recubrimiento del hormigón**



Es sabido que el anclaje produce un estado de tracción en el hormigón con la consiguiente variación del comportamiento tensional y la posible rotura de la unión acero-hormigón. Esto variará según la distancia entre barras y según su cantidad.

- **Resistencia del hormigón**

Si la rotura viene por splitting, el factor principal que determina el funcionamiento del anclaje es la resistencia a tracción del hormigón en presencia de armaduras de refuerzo.

Si en cambio viene por pull-out es la resistencia a compresión quien juega el papel determinante.

## 4.-Armaduras post-instaladas

Con las armaduras conectadas a posteriori es posible la unión de estructuras de hormigón existentes a nuevas estructuras con la máxima seguridad y flexibilidad. Esto nos da grandes ventajas como:

- Flexibilidad de diseño
- Simplificación de los métodos de trabajo
- Cargas características definidas
- Sencillez
- Aplicaciones en horizontal, vertical y en techo

### 4.1.-Comportamiento adherente de barras corrugadas colocadas a posteriori

La transmisión de carga para barras corrugadas colocadas a posteriori es similar a la de las barras embebidas. La eficiencia depende de la resistencia de la resina frente a la carga concentrada cerca de las corrugas y de la capacidad de transferencia de carga en la superficie del taladro. Es por eso como ya hemos dicho antes que el papel que juega una buena limpieza es fundamental.

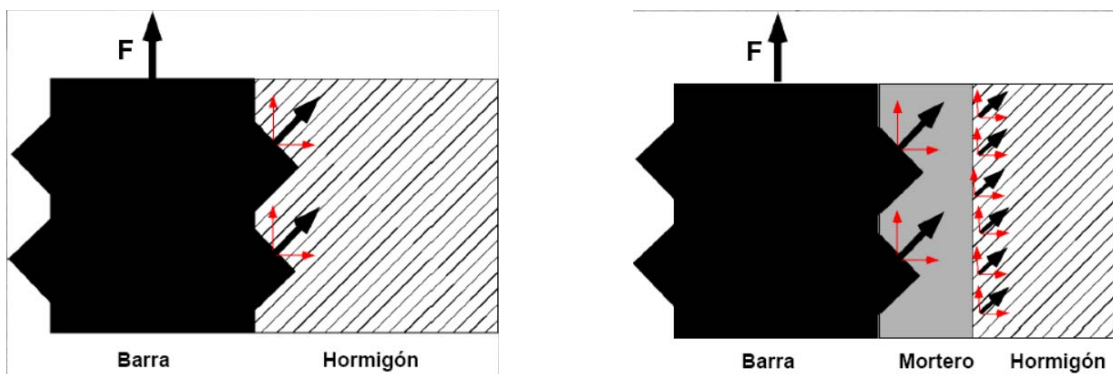


Imagen 13.- Transmisión de esfuerzos Unión acero-hormigón y acero-resina-hormigón [3]

En muchos casos los valores de adherencia de las barras colocadas a posteriori son superiores a los de las barras embebidas debido a un mejor comportamiento de la resina. Pero para distancia a borde y/o entre barras pequeña, las fuerzas que provocan fisuración (splitting) o desconchamiento resultan decisivas debido a la baja capacidad a tracción del hormigón. Cabe destacar que esto es en condiciones óptimas.

En el caso de hormigón en masa, si la armadura no es conocida o si los requisitos de transferencia de carga del código de hormigón no pueden satisfacerse, se usa la teoría de cálculos de anclajes. Esta teoría supone que la fuerza de tracción en la barra se transmite por medio de tensiones de tracción en el hormigón, o por medio de un flujo de tracciones en el hormigón en masa o parte del hormigón no armado. Debemos tener en cuenta que normalmente para esta aplicación sólo se atribuyen fuerzas de tracción a la armadura y que la fuerza cortante se transmite a través de la rugosidad de la superficie de junta.

Por lo tanto las armaduras, las podemos subdividir en dos tipos:

- Barras en hormigón sin armadura de conexión: la carga que debe ser transferida debe ser acomodada por el hormigón que le rodea en el miembro existente. Esto activa la resistencia a la tracción del hormigón, igual que en los anclajes por adherencia. Si la resistencia del acero de armadura es suficientemente importante, la rotura puede producirse debido a la rotura de la adherencia entre la armadura y el mortero o entre el mortero y el hormigón, o la rotura del hormigón. La rotura del hormigón ha sido observada frecuentemente en las barras colocadas con un pequeño espacio de armadura
- Barras utilizadas para crear empalmes solapados con armaduras existentes: la carga de tracción ejercida en los empalmes solapados es transferida desde la armadura post-instalada a las armaduras del hormigón mediante zonas de compresión en el hormigón. Esto produce una fuerza de tracción circunferencial en el hormigón. Si la resistencia del acero de armadura es suficientemente importante, el empalme solapado falla debido a la ruptura de la superficie de hormigón o a la rotura de la adherencia de la armadura post-instalada o del hormigón existente. En este caso se utiliza la resistencia local a la tracción del hormigón. Las fuerzas cortantes que son generadas deben ser transferidas mediante las armaduras transversales situadas alrededor del empalme.

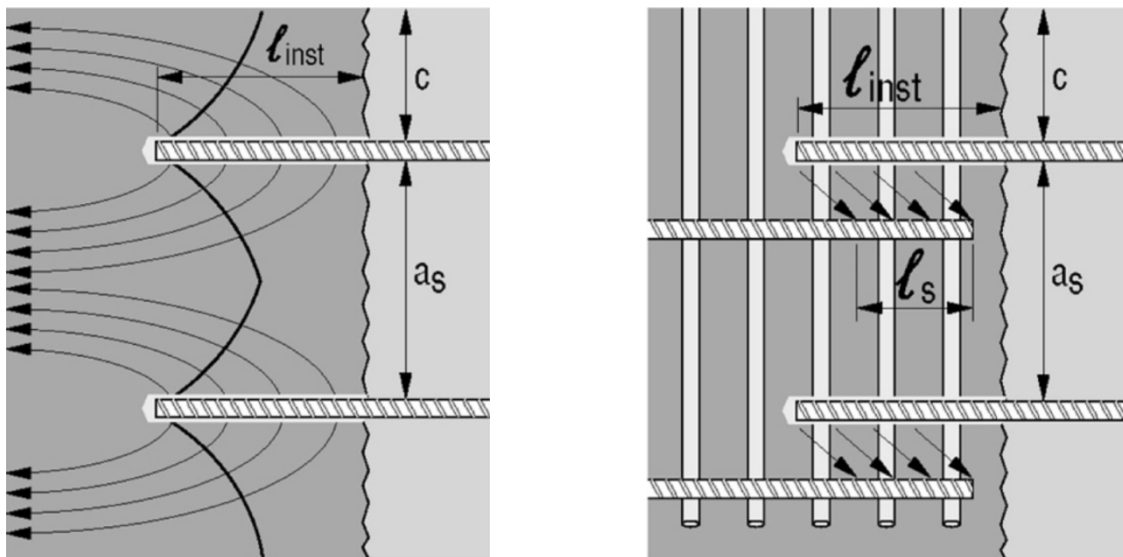


Imagen 14.- Teoría de anclajes [2]

Siendo:

- $l_s$  =longitud de solape
- $l_{inst}$  =longitud de anclaje instalada
- $c$  =recubrimiento
- $a_s$  =separación entre barras

## 5.-Evaluación de las conexiones de las armaduras post-instaladas

Como las conexiones de armaduras post-instaladas vienen de acuerdo al Eurocódigo 2 <sup>[5]</sup>, muchos de los test que son requeridos para los anclajes químicos pueden ser omitidos por los siguientes motivos:

- Las pruebas solo demuestran que las conexiones a posteriori tienen un comportamiento muy similar al de las barras colocadas in situ.
- Solo las cargas de tensión se pueden transferir como las colocadas in situ de acuerdo con el Eurocódigo 2, no serán consideradas las cargas de corte en las barras de refuerzo.
- Solo se da el fallo por pull-out o splitting, la rotura por el cono del hormigón es evitada mediante fuerzas de compresión y/o una gran profundidad de empotramiento.
- No se requieren test en hormigón fisurado, no obstante, la influencia de las fisuras en el comportamiento de las armaduras post instaladas se tiene en cuenta en los requisitos y en la evaluación de los resultados.

### 5.1.-Alcance

Tanto para la evaluación de las conexiones, como para determinar el alcance de estas, nos basamos en el informe técnico nº 23 <sup>[4]</sup>, por lo tanto, como en este se indica, cubre solamente aplicaciones en hormigón no carbonatada C12 / 15 a C50 / 60 (de acuerdo con la norma EN 206).

Y en e se cita, que los distintos campos de aplicación que se cubren en este estudio, son los siguientes:

- una junta de solapamiento con refuerzo existente en un componente de construcción, véase la imagen 15.

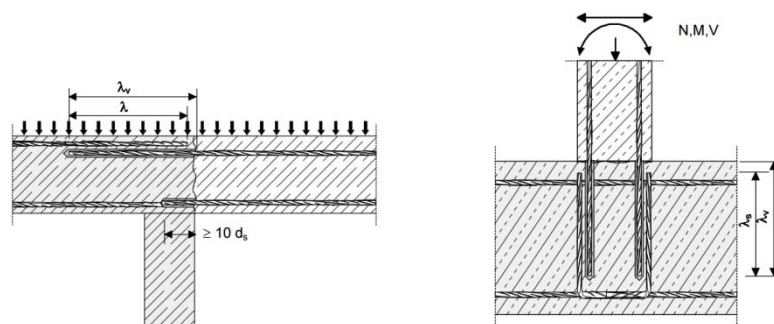


Imagen 15 <sup>[4]</sup>

- anclaje de la armadura en un soporte de losa o viga; soporte extremo / rodamiento de una losa diseñado como simplemente apoyada, así como su refuerzo para las fuerzas de retención, ver imagen 16.

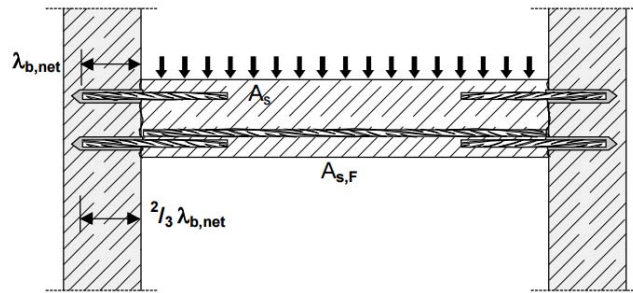


Imagen 16 <sup>[4]</sup>

- anclaje de refuerzo de elementos de construcción sometidos principalmente a compresión, véase imagen 17.

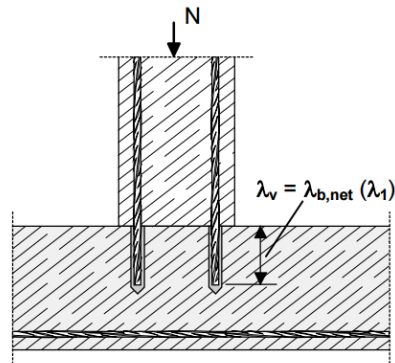


Imagen 17 [4]

- anclaje de refuerzo para cubrir la línea de actuación de la fuerza de tracción, véase la imagen 18.

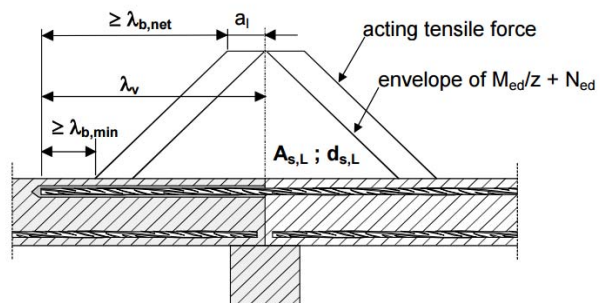


Imagen 18 <sup>[4]</sup>

## 5.2.-Evaluación de la conexión

En general tiene que ser demostrado por los test que el sistema post instalado es capaz de desarrollar los mismos valores de proyecto de resistencia que los sistemas colocados in situ, como nos indica el Eurocódigo 2. También podemos leer, que los requisitos de la prueba no son indicados, pero los valores de  $f_{bd}$  (Valor de diseño de la resistencia última en buenas condiciones según el EC2) son conocidos. Estos son reportados en la tabla que sigue. Estos valores son válidos para las condiciones peores, es decir, cubrirían el mínimo, distancia mínima entre los anclajes y mínima armadura transversal. Los test están hechos con una única barra con una gran cantidad de armadura de modo que la influencia del confinamiento del hormigón sobre la fuerza de adherencia es casi la misma para barras post instaladas que para aquellas instaladas in situ.

En la tabla se hace una comparación,  $f_{bm}^{req}$  que es la fuerza de adherencia que debe ser alcanzada para poder obtener su valor de diseño  $f_{bd}$ .

Fuerzas de adherencia requeridas:

Tabla 2.- Valor de diseño de la resistencia en barras post instaladas <sup>[2]</sup>

Clase de Hormigón.	Valor de diseño de la resistencia última en buenas condiciones según el EC2.  $f_{bd}$ (N/mm <sup>2</sup> ) (2)	Valor real requerido de resistencia.  $f_{bm}^{req}$ (N/mm <sup>2</sup> )
C12/15	1,6	7,1
C16/20	2,0	8,6
<b>C20/25</b>	<b>2,3</b>	<b>10,0</b>
C25/30	2,7	11,6
C30/37	3,0	13,1
C35/45	3,4	14,5
C40/50	3,7	15,9
C45/55	4,0	17,2
<b>C50/60</b>	<b>4,3</b>	<b>18,4</b>

- $f_{bd}=2.25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd}$  (según EC2)
- Con  $f_{ctd} = \alpha_{ct} f_{ctk,0,05} / \gamma_c$
- $\alpha_{ct}=1$
- $\gamma_c= 1.5$
- $\eta_1=1,0$  (buenas condiciones de adhesión)
- $\eta_2=1,0$  (para  $\phi \leq 32\text{mm}$ )

### 5.2.1.-Determinación de la fuerza de adherencia

De los resultados de las pruebas de tracción la resistencia media se calcula según la ecuación:

$$f_{bm}^t = \frac{Nu}{(\pi d Iv)}$$

Donde

- $f_{bm}^t$  = fuerza media de adherencia en los test [MPa]
- Nu = carga de rotura Nu del test [N]
- D = diámetro de la barra [mm]
- Iv = longitud de anclaje en el hormigón. [mm]

## 6.-Evaluación de las conexiones de armadura post-instaladas en relación a la resistencia al fuego

Los test vienen ejecutados siguiendo siempre la norma EN 206. En este caso han sido llevados a cabo con hormigón no fisurado C20/25 y se han utilizado probetas cilíndricas con diámetro 150 mm y una altura  $h > l_v + 50$  mm. Siempre tratando de evitar la rotura a splitting.

Necesitamos de dos termopares (tipo K) para la medida de la temperatura, estando uno al fondo de la perforación mientras que el otro a unos 10 mm de la superficie. Para facilitar la instalación, los termopares pueden ser agarrados a la barra. El orificio viene hecho y limpiado en base a las directrices del proveedor, así como la instalación. Seguidamente viene realizado el test pull-out con el cual obtendremos la rotura de la resina.

### 6.1.-Procedimiento de la prueba

Se pone la probeta en un horno eléctrico y se aumenta la temperatura hasta que se llegue a la requerida mediante los dos termopares instalados en la barra. La temperatura se mantiene en la armadura antes de aplicar la carga. La temperatura se considera estable cuando la variación de temperatura medida en los dos termopares es inferior a 2º K en un intervalo de 60 minutos. Sucesivamente, se aplica sobre la armadura una carga de tracción creciente hasta que se verifique la rotura. La carga debe aumentar de modo que la carga de pico llegue después de entre 1 a 3 minutos del inicio. Hay que registrar la temperatura medida de los dos termopares al inicio de la prueba de tracción, la carga de pico, y el desplazamiento de la barra durante la prueba de tracción.

### 6.2.-Valoración de las pruebas.

De los resultados de las pruebas de tracción la resistencia media se calcula mediante la ecuación:

$$\tau_{bm} = N / (\pi d l_v)$$

Donde:

- $\tau_{bm}$  = esfuerzo medio de adherencia en la serie de pruebas [MPa]
- $d$  = diámetro de la barra [mm]
- $l_v$  = profundidad de anclaje de la barra en el hormigón [mm]
- $N_{u(fc)}$  = carga de pico en un único test. [N]

Si la resistencia media  $\tau_{bm}$  determinada mediante la ecuación anterior llega al menos al valor de resistencia  $\tau_{bm}^{req}$  requerido (10 N/ mm<sup>2</sup> para C20/25), la barra con la armadura post instalada puede ser proyectada utilizando el valor de proyecto del esfuerzo de adherencia



último,  $f_{bd} = 2,3 \text{ N/mm}^2$  para barras de adherencia mejorada según EC 2 para hormigón C20/25.

Si la resistencia requerida por el C20/25 y o C50/60 no es alcanzada, la sollicitación de proyecto de la resina  $f_{bd}$  se calcula como sigue:

$$f_{bd} = \tau_{bm} \times 0.345$$

Donde  $f_{bm}$  es la resistencia media de adherencia de la serie y test limitada a  $10 \text{ N/mm}^2$ . El coeficiente 0.345 corresponde a la relación entre el valor de proyecto de la tensión útil de adherencia,  $f_{bd} = 2,3 \text{ N/mm}^2$  dividido entre la tensión requerida  $f_{bm}^{req} = 10 \text{ N/mm}^2$  para hormigón C20/25, multiplicado por el factor de seguridad parcial  $\gamma_{M, fi} = 1,5$

## 7.-Trabajo de laboratorio

El objetivo de este trabajo es ver los efectos que produce la variación de la temperatura entre la adherencia del acero, la resina y el hormigón. De este modo poder llegar a comprender el comportamiento frente al fuego de las barras colocadas a posteriori mediante resinas.

Para esto se han llevado a cabo las pruebas con el uso de dos resinas diferentes, denominadas a partir de ahora A (Viniléster) y B (Epoxi). Estas pruebas consisten en pruebas a tracción, mediante ensayos pull-out; que se ejecutan de dos formas distintas:

- Pruebas a carga constante y variación de temperatura.
- Pruebas a temperatura constante y variación de la carga.

De modo que en estudios posteriores se analizará si la relación existente es la misma, o por el contrario esta varía. En este documento únicamente llevaremos a cabo el análisis de aquellas pruebas que se hayan llevado a cabo a carga constante y variación de la temperatura. Dejando para próximos estudios, si es posible determinar algún tipo de relación entre ambos o si, por el contrario, se dan fenómenos diversos. No obstante, dicha comparación no será objeto de nuestro trabajo.

### 7.1.-Introducción al trabajo de laboratorio.

Pretendemos saber la incidencia que posee el fuego en las barras post-instaladas mediante el uso de resinas. Si bien sabemos que la distribución de temperaturas durante un incendio no es constante, si no que a mas cercanía mayor es la temperatura. Como es evidente este mismo fenómeno se dará en las barras que se encuentren instaladas dentro del hormigón.

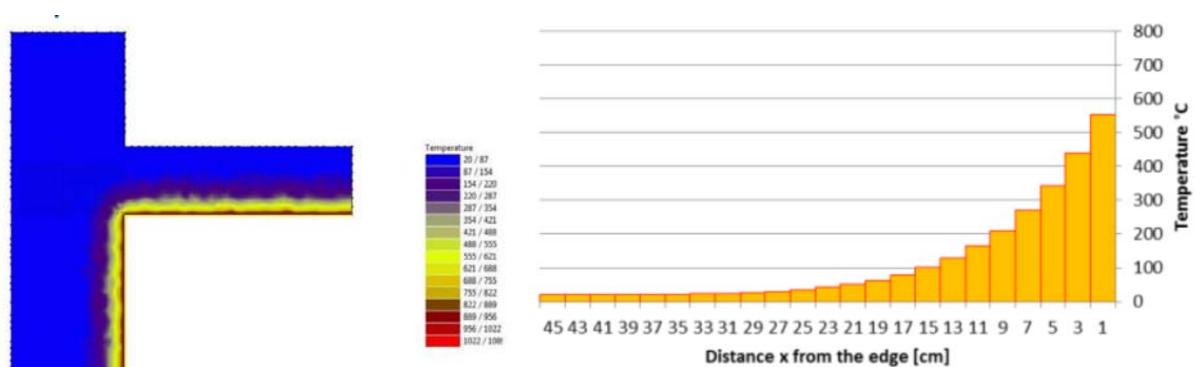


Imagen 19.-Distribución de la temperatura frente a un incendio. Izquierda, en la estructura. Derecha en la barras post-instaladas<sup>[10]</sup>

No obstante nosotros supondremos que existe una temperatura única. Para ello haremos uso de dos termopares, uno situado en la parte inferior y otro situado en la parte superior, de modo que si hacemos la media de ambos podamos obtener una temperatura media a lo largo de toda la barra. Esto se puede observar en la imagen 20.

Una vez conocemos la temperatura, podemos proceder a realizar el ensayo pull-out a carga constante. Con este ensayo obtendremos la carga ultima en función de la temperatura. Realizando un determinado número de ensayos y basándonos en lo explicado en el capítulo 5.2.1, podemos saber la fuerza de adherencia en cada uno de los casos.

Con todos estos datos obtenidos, podremos llegar a desarrollar nuestra propia curva de pérdida de resistencia en función del fuego con barras post-instaladas mediante el uso de resinas, para finalmente compararla con la usada hasta ahora en los cálculos que era la curva de pérdida de resistencia para armaduras embebidas en el hormigón.

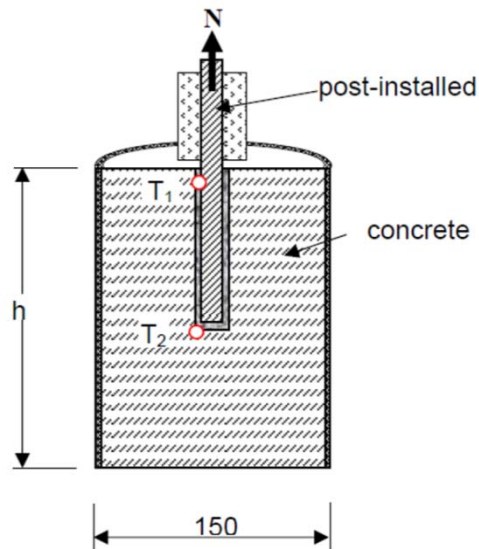


Imagen 20.-Sección probeta de ensayo.

## 7.2.-Comportamiento al fuego de los materiales.

Para la siguiente explicación, nos basaremos en el EC2<sup>[5]</sup>. A través de la elevación de la temperatura se simula una situación de incendio a la que usualmente las estructuras ordinarias se exponen. De todos modos estas deben ser proyectadas y construidas de manera que se conserve su capacidad portante durante el tiempo de exposición al fuego, de hecho, a causa de este fenómeno, el hormigón y el acero presentan una reducción de la resistencia característica dependiente de la temperatura. Del Eurocódigo 2 podemos obtener que esta reducción se encuentra por medio de un coeficiente multiplicativo, k:

Hormigón:  $f_{ck}(\theta) = k_c(\theta) \times f_{ck}(20^\circ\text{C})$

Acero:  $f_{sk}(\theta) = k_s(\theta) \times f_{yk}(20^\circ\text{C})$

Del siguiente gráfico (imágenes 21,22 y 23) se observa que al aumentar la temperatura se corresponde un decrecimiento de este coeficiente:

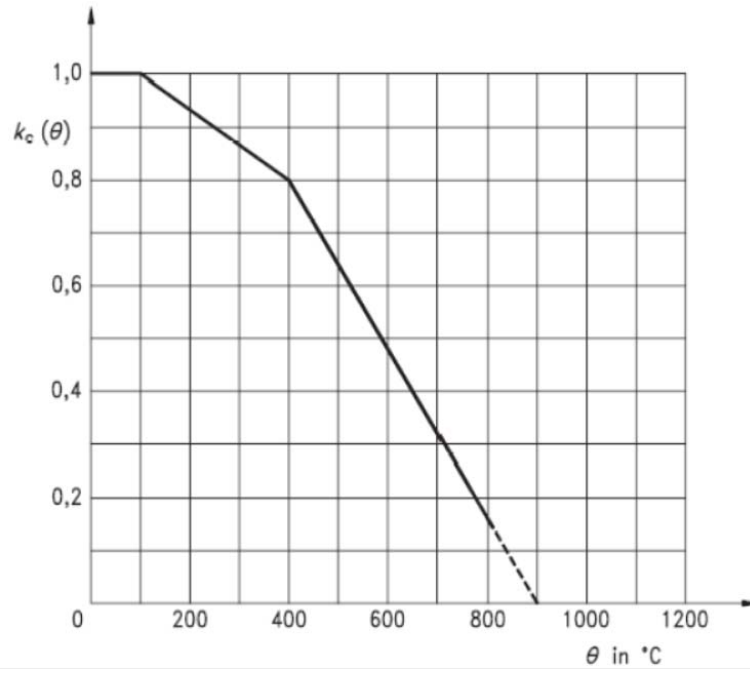


Imagen 21.-Disminución de la resistencia a compresión del hormigón en función de la temperatura.[5]

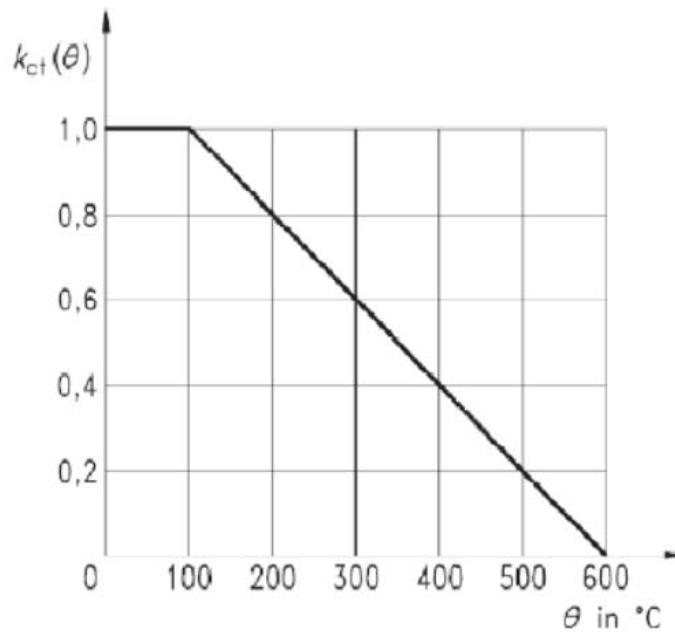


Imagen 22.-Disminución de la resistencia a tracción del hormigón en función de la temperatura.[5]

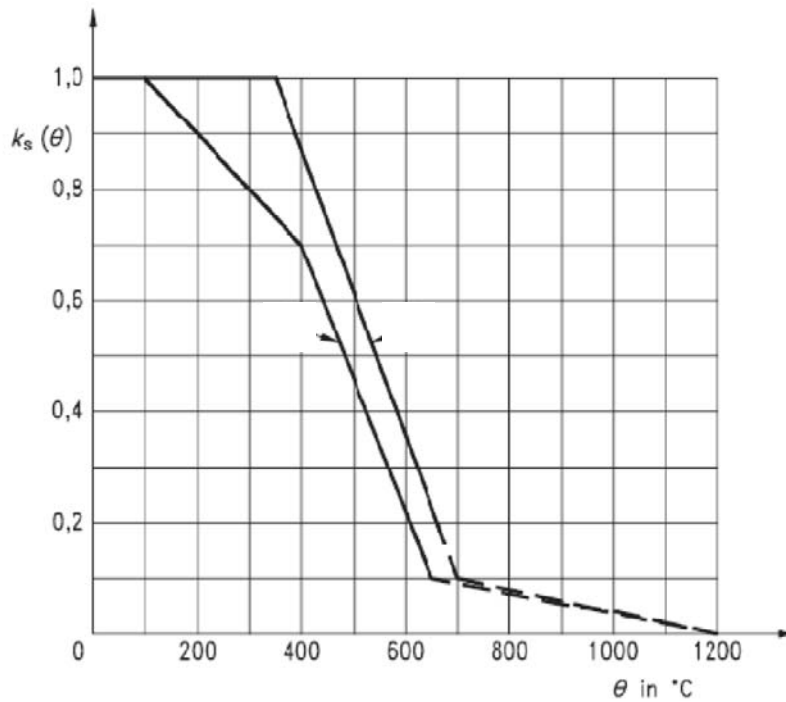


Imagen 23 .-Disminución de la resistencia característica del acero en función de la temperatura.[5]

### 7.2.1.-Propiedad de resistencia y deformación del hormigón

Las propiedades de resistencia y de deformación del hormigón en el estado monoaxial a temperatura elevada se caracterizan por medio de una serie de relaciones tensión-deformación, que se indican en la imagen 22.

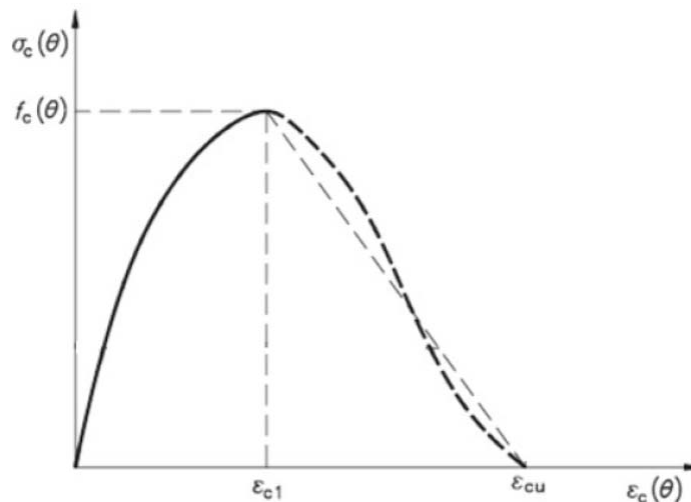
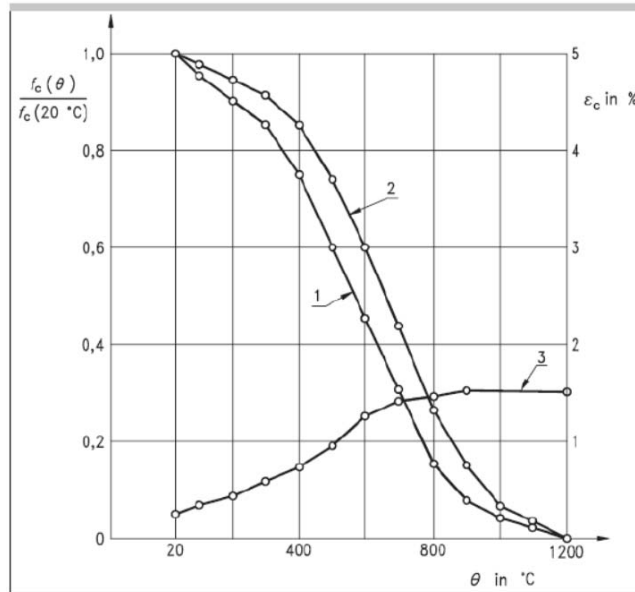


Imagen 24.-Relación tensión deformación del hormigón a compresión y a elevadas temperaturas.[5]

Para una determinada temperatura del hormigón, la grafica tensión-deformación se desarrolla mediante dos parámetros:

- resistencia a compresión  $f_c(\theta)$
- la deformación  $\epsilon_{c1}(\theta)$  correspondiente a la resistencia  $f_c(\theta)$



- 1. Agregado Silíceo
- 2. Agregado Calcáreo
- 3. - $\epsilon_{c1}$

Imagen 25.-Relación tensión-deformación del hormigón a elevadas temperaturas.[5]

En la siguiente imagen podemos observar la disminución de resistencia que se da en el hormigón, en este caso con agregado de silicio, debido al incremento de temperatura.

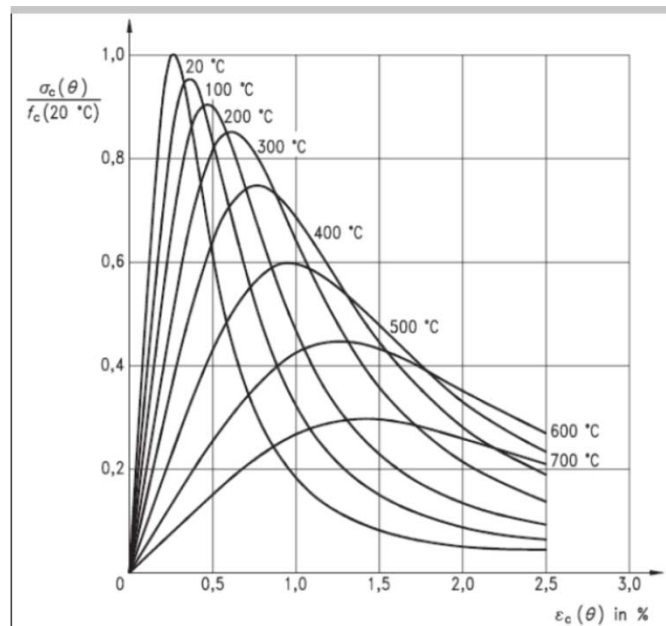


Imagen 26.- Relación tensión deformación hormigón según variación de temperatura[5]

### 7.2.2.-Propiedades de resistencia y de deformación del acero:

Las propiedades de resistencia y deformación del acero a temperaturas elevadas se caracterizan por serie de relaciones tensión-deformación con desarrollo elíptico linear, como se indica en la siguiente figura.

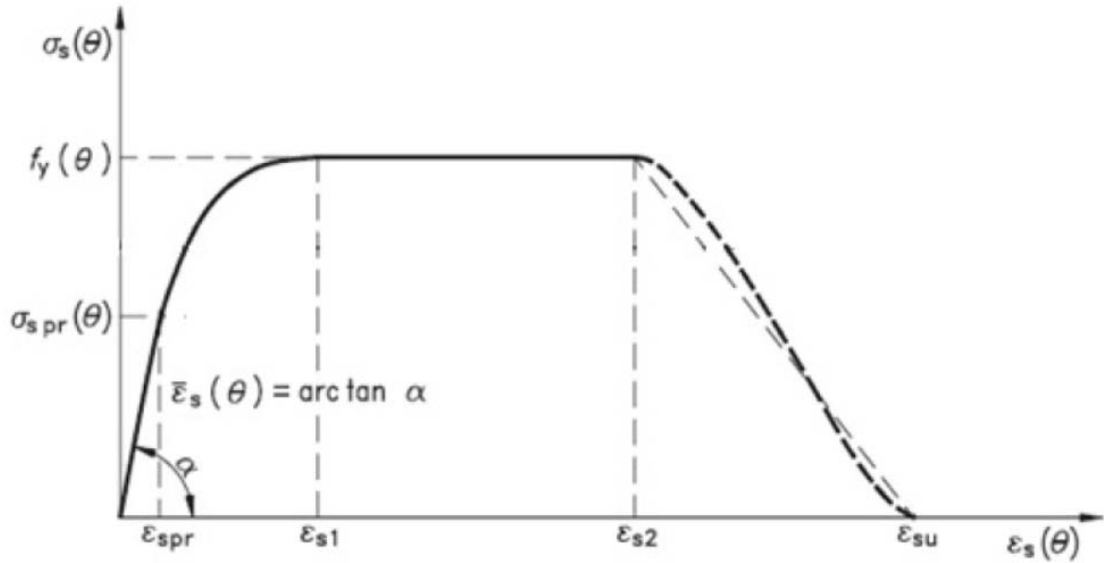


Imagen 27.-Modelo de las relaciones esfuerzo-deformación para acero de hormigón armado ordinario a temperaturas elevadas.[5]

Para una determinada temperatura en el acero las curvas tensiones-deformaciones de la figura anterior se definen mediante tres parámetros:

- La pendiente del tramo lineal elástico  $E_s(\theta)$
- El límite de proporcionalidad  $\sigma_{spr}(\theta)$
- El valor máximo de la tensión  $f_y(\theta)$

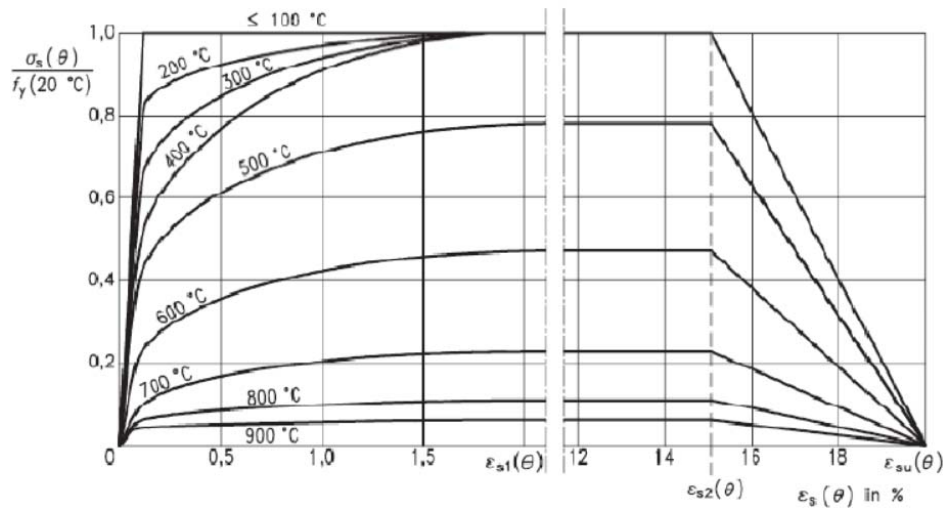


Imagen 28.-Relaciones tensiones-deformaciones para acero de hormigón armado ordinario a elevadas temperaturas.[5]

### 7.3.-Explicación del ensayo

#### 7.3.1.-Creación de probetas

Para llevar a cabo el ensayo, primero de todo se requiere de la creación de probetas cilíndricas de hormigón, todas recubiertas de una chapa de acero en su perímetro lateral para de este modo conseguir un distribución homogénea de la temperatura. Las probetas llevadas a cabo son de 20 centímetros de altura por 15 cm de diámetro.



Imagen 29.- Probetas de hormigón.

Una vez las probetas han adquirido la resistencia a los 21 días de 27 mega pascales, se puede proceder a realizar la perforación para la inserción de la barra. Se realiza mediante un taladro de diámetro 16 milímetros, un agujero de profundidad igual a 120 milímetros, es decir diez veces el diámetro de la barra. Mientras se está realizando el agujero es muy importante ir limpiando los restos de polvo que se van generando ya que estos pueden influir en los resultados de la prueba. Tras la realización del agujero se procede a la limpieza de este. Se introduce un cepillo 4 veces, se sopla con el bombín 4 veces, y realizamos esto, hasta que observemos que no salga polvo. Toda esta limpieza se realiza ya que si no las características de la resina podrían verse afectadas debido a una pérdida de adherencia y consecuentemente de la resistencia de la prueba.



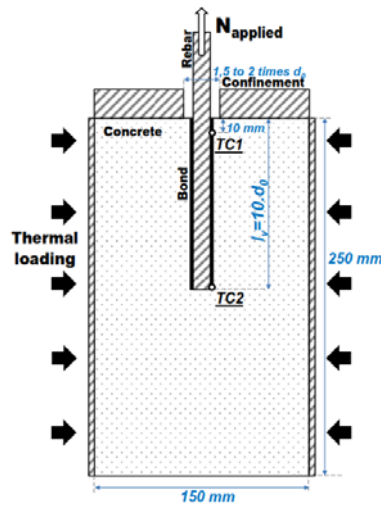


Imagen 30.-Sección de la probeta. [10]

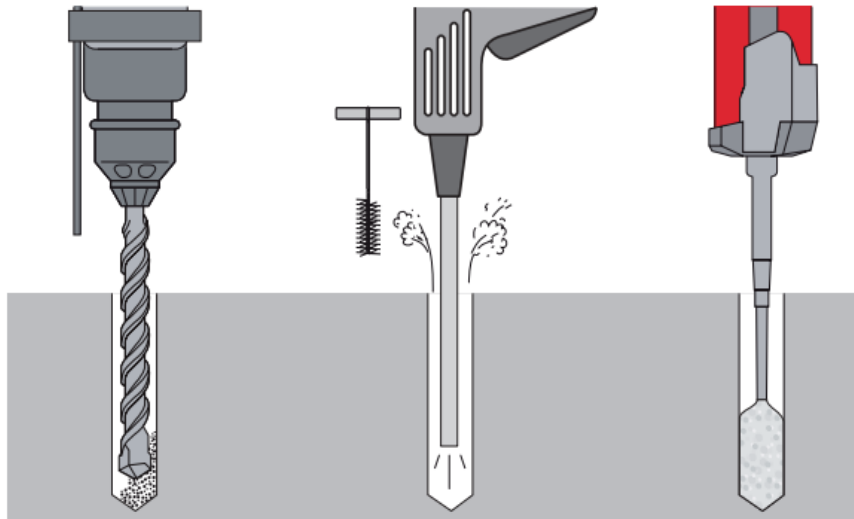


Imagen 31.- Realización de la perforación. [6]

Por otro lado, tenemos que realizar barras de acero de doce milímetros de diámetro y cuarenta centímetros de longitud. Para ello haremos uso de la segueta metálica, ya que las barras vienen en una longitud bastante mayor. Una vez tenemos la barra con nuestras medidas requeridas, procedemos a enganchar a ellas una pareja de termopares mediante alambres. Esto nos permitirá saber la temperatura interna de la probeta en dos puntos distintos. El primer termopar a una distancia de doce milímetros (un diámetro) y el segundo a ciento ocho milímetros (ocho diámetros).



Imagen 32.- Barras corrugadas con los termopares enganchadas.

Después de tener listas las barras con los termopares, procedemos a poner la resina en la probeta y seguidamente vamos introduciendo a la vez que girando las barras. Antes de introducir la resina debemos comprobar que esta sale de forma uniforme.



Imagen 33.- Desechos de la resina inicial debido a la mala calidad.

Finalmente dejamos reposar hasta que la resina haya adquirido su resistencia.

### 7.3.2.-Preparación del ensayo

Para llevar a cabo la prueba hemos de introducir la probeta en el horno, de modo que la barra de acero sobresalga por debajo de este para así poder encajarlo en la bomba teniendo especial cuidado con los termopares de que no se enganchen.

El horno con el que estamos trabajando, es un horno industrial con el cual podemos alcanzar temperaturas de hasta 800 °C controlado gracias a una central.

Mientras que la bomba, es del tipo hidráulica, conectada a la célula de carga mediante tubos de goma.

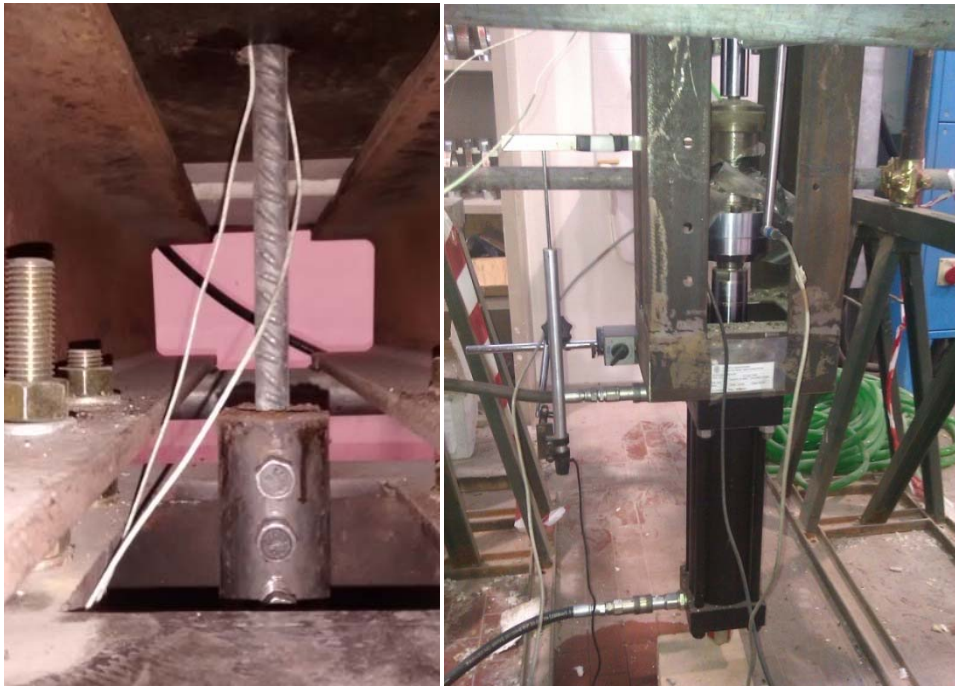


Imagen 34.- Agarre de la barra de acero y bomba.

Mediante la bomba vamos variando la posición del gato, de modo que cuando observemos que la probeta se levanta levemente podemos apretar los tornillos, ya que esto significa que la barra está completamente en contacto y a la profundidad adecuada. Para apretar los tornillos nos ayudamos de un dinamómetro, con el cual apretaremos únicamente los dos últimos tornillos a 60 N.m.



Imagen 35.- Marca de los tornillos.

Por otro lado tenemos que comprobar que todos los elementos de los que vamos a recibir información estén bien conectados:

- Variación de carga de la bomba hidráulica.
- Célula: control de carga de la célula.

- LvdT 1 y 2: control de variación de la posición.
- Termopar 1 y 2: control de la temperatura interna del hormigón.
- Termopar ambiente: control de la temperatura del horno.

Todos estos parámetros vienen registrados mediante el software "HBM Catman 5.0" y controlados mediante un software propio de la universidad.



Imagen 36.-Lector de datos Spider 8

Finalmente se cierra el horno para de este modo evitar las pérdidas de calor y se procede a la aplicación de la carga.



Imagen 37.- Horno funcionando con la puerta abierta.

### 7.3.3.-Materiales

- Barra de acero: acero corrugado B450 de 12 milímetros de diámetro laminado en caliente y con un índice de adherencia 0,08.
- Hormigón: C20/25 con resistencia característica  $R_{ck}=34,07 \text{ N/mm}^2$
- Resina Vinilister
- Resina Epoxi

#### **7.3.4.-Toma de datos**

Debido a la elevada cantidad de datos obtenidos durante el proceso de las pruebas expondremos únicamente las gráficas necesarias para la comprensión total del estudio.

Principalmente los graficas de nuestro interés son:

- Carga [kN]/tiempo [s]
- Carga [kN]/ Desplazamiento[mm]
- Desplazamiento[mm]/Temperatura[°C]
- Desplazamiento[mm]/tiempo [s]
- Temperatura[°C]/tiempo [s]\*

\*Esta ultima solo nos valdrá para explicar cómo se calienta el horno empleado durante los ensayos.

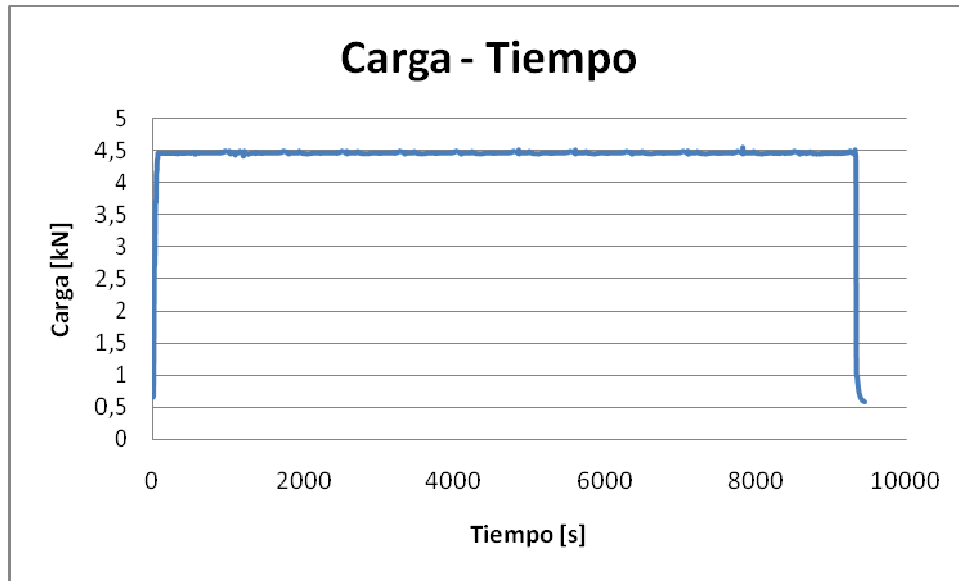


Imagen 38.-Gráfica del laboratorio Carga-Tiempo

En esta primera gráfica Carga [kN]/tiempo [s] podemos observar que efectivamente los ensayos realizados se han hecho a carga a constante, además también podemos saber de aquí la duración total del ensayo así como cuando este rompe, ya que se observa una caída brusca y repentina de la carga aplicada.

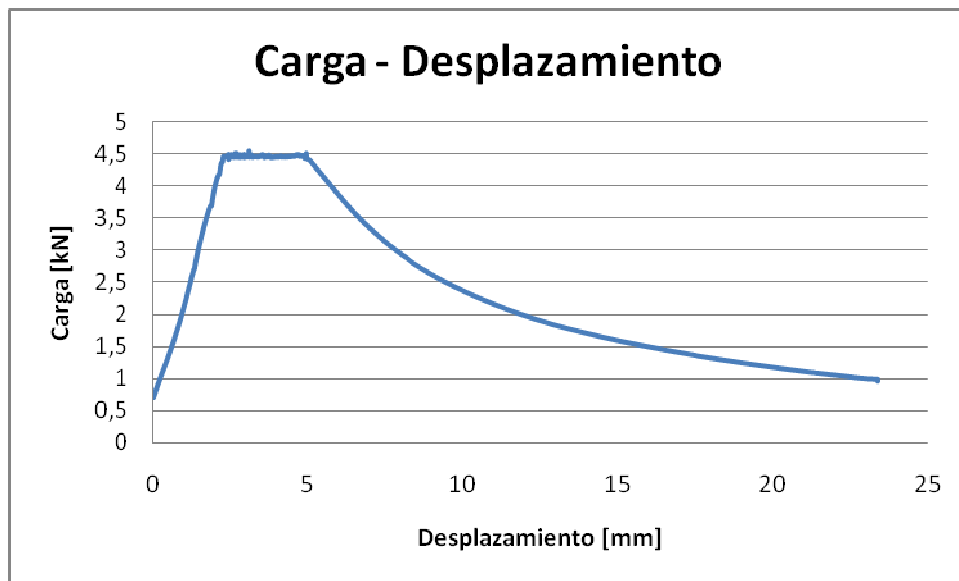


Imagen 39.- Gráfica del laboratorio Carga-Desplazamiento

La información que nos ofrece esta segunda gráfica es más interesante. Podemos observar como antes de llegar incluso al valor de carga constante ya existen pequeños desplazamientos. En el segundo tramo, cuando el valor de la carga se mantiene, vemos que estos desplazamientos continúan. Pero lo destacable de aquí es el tercer tramo, observamos que cuando rompe la probeta los desplazamientos avanzan de una forma muy rápido incluso cuando los valores de carga son menores.

En el siguiente gráfico observamos una comparativa entre los distintos escalones de carga, y como a medida que la carga aplicada es mayor los desplazamientos son mas bruscos.

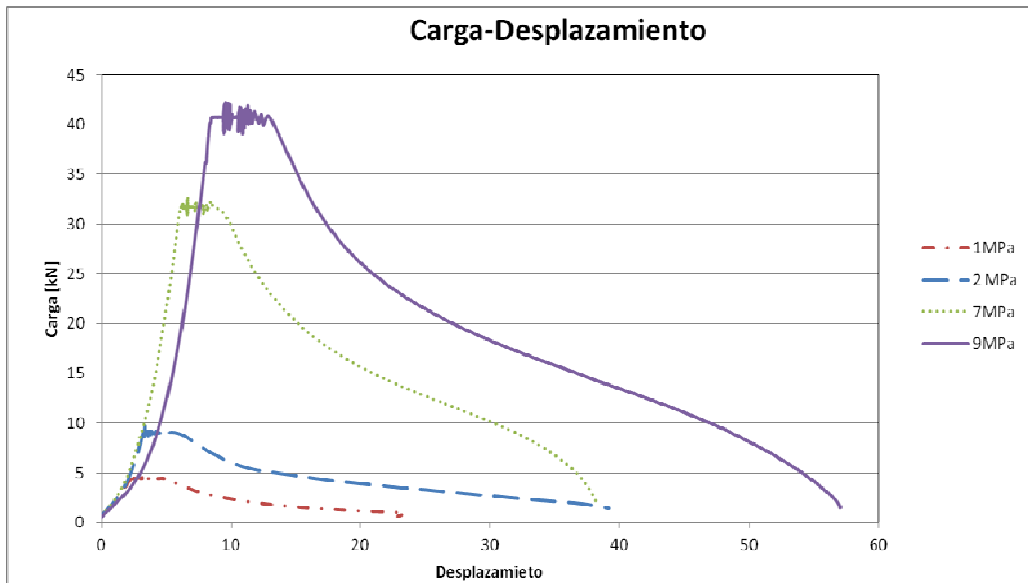


Imagen 40.- Gráfica del laboratorio Carga-Desplazamiento en distintos caso de carga.

También gracias a la siguiente gráfica Desplazamiento[mm]/Temperatura[°C] podemos ver como los desplazamientos se dan cuando alcanzan la temperatura máxima, llegando a producirse casi la integridad del desplazamiento total en este último tramo. También podemos ver esto en la gráfica.

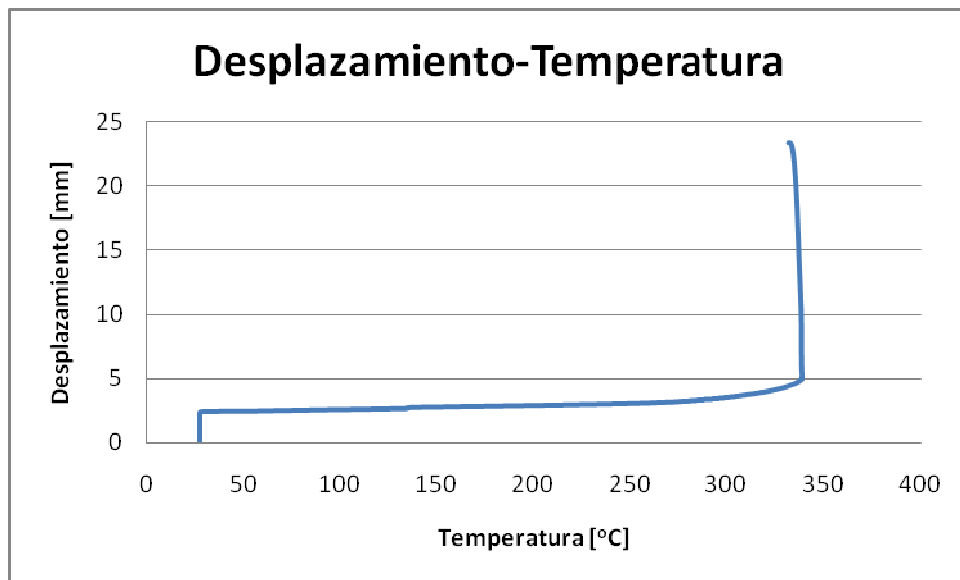


Imagen 41.- Gráfica del laboratorio Desplazamiento-Temperatura.

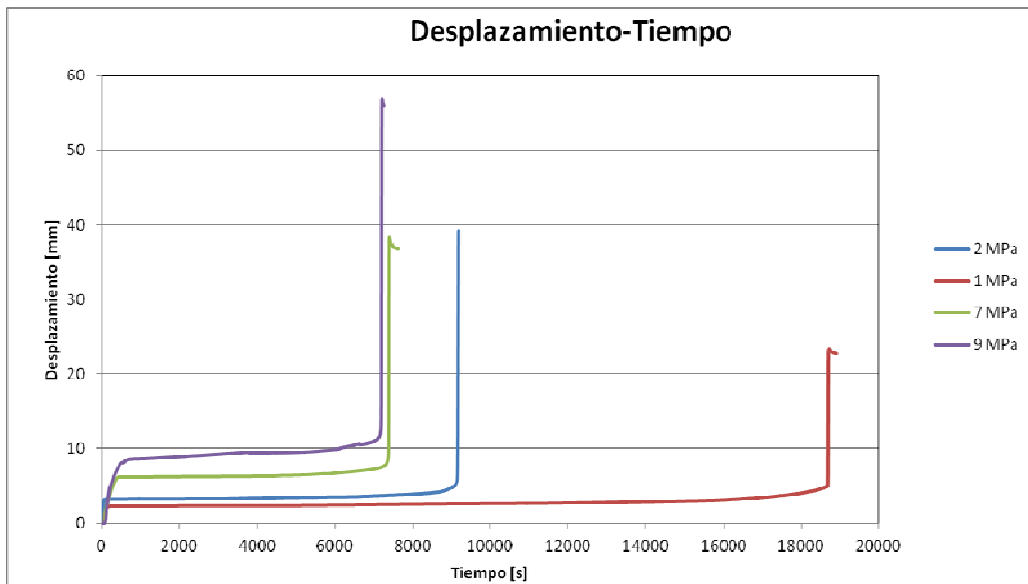


Imagen 42.- Gráfica del laboratorio Desplazamiento-Tiempo en distintos caso de carga.

Por último está gráfica nos muestra como obviamente la temperatura dentro de la probeta y más en el borde no son iguales, pero que además mientras que la interna tarda más en subir de temperatura, también le cuesta más bajar. También vemos como a pesar de haber implementado en el horno un gradiente constante de temperaturas 5 °C/minuto, el control sobre el ambiente es extremadamente complicado.

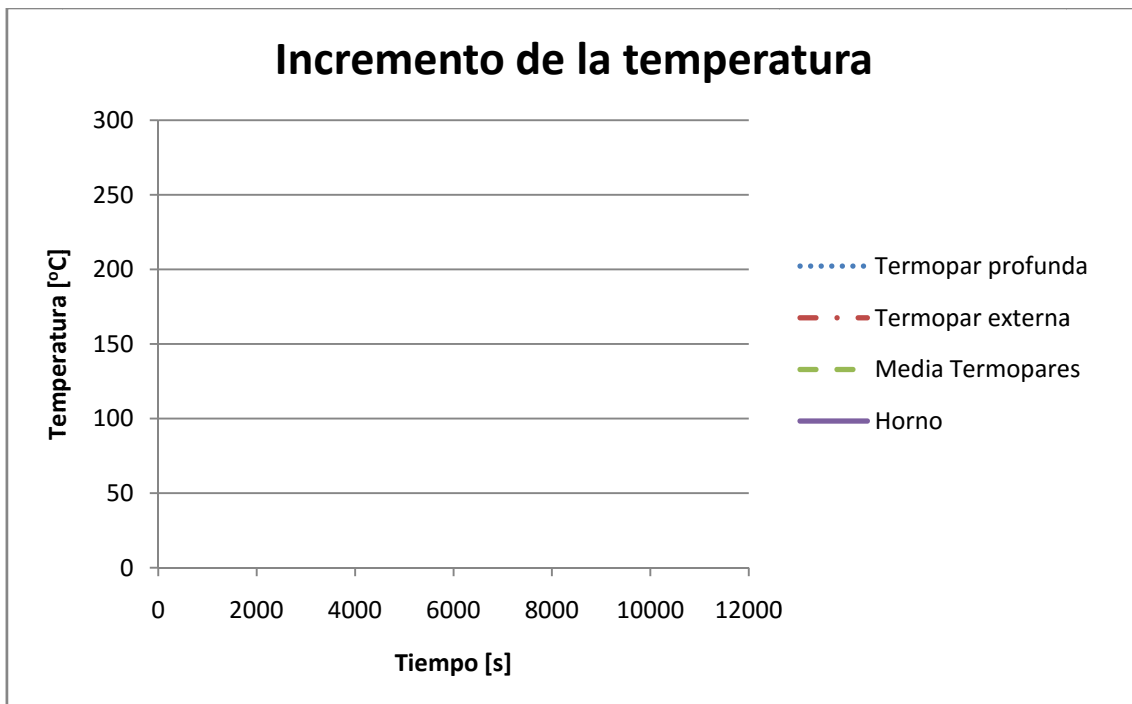


Imagen 43.- Gráfica del laboratorio de los distintos incrementos de temperatura.



7.3.5.-Resultados

Resina Epoxi

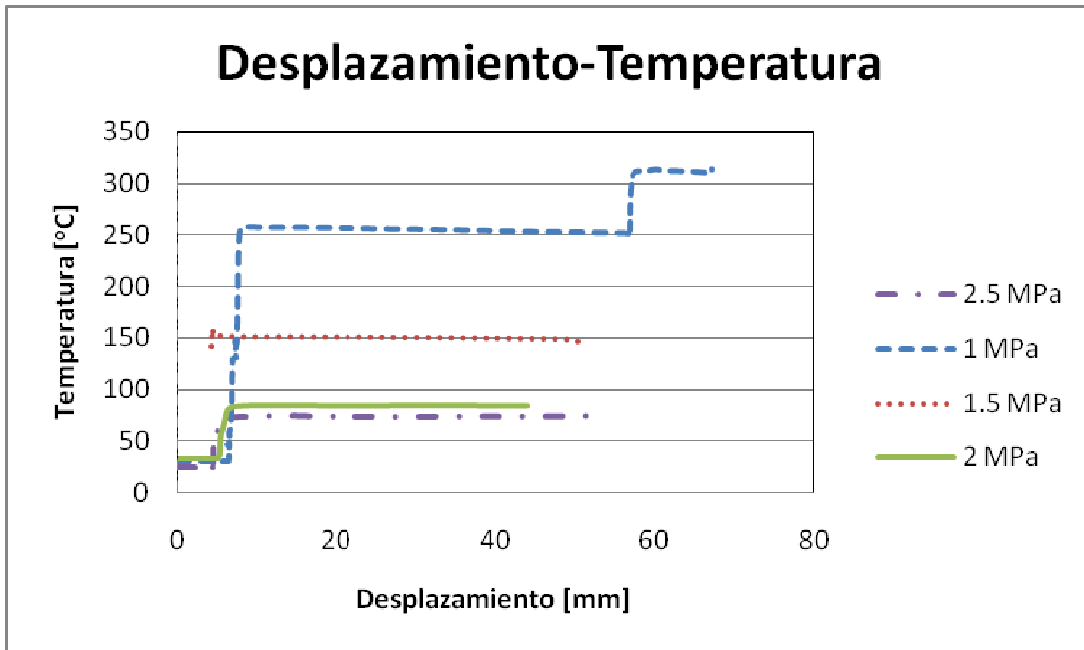


Imagen 44.- Gráfica del laboratorio Desplazamiento-Temperatura resina epoxi en distintos caso de carga.

Resina vinilester

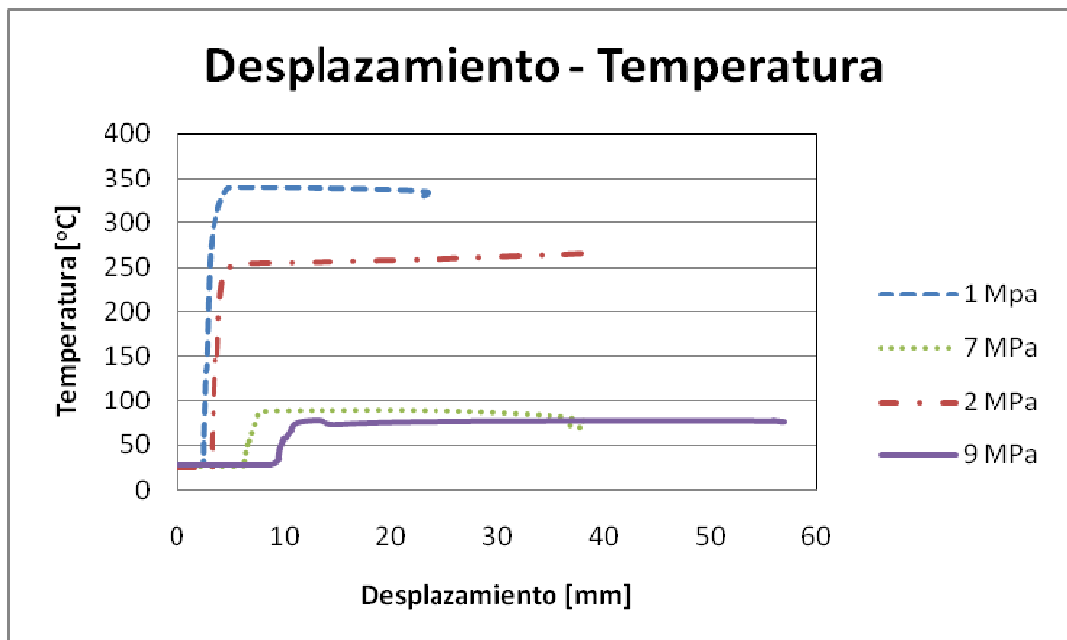


Imagen 45.- Gráfica del laboratorio Desplazamiento-Temperatura resina vinilester en distintos caso de carga.

## 7.4.-Elaboración de datos

Después de haber representado gráficamente los test es necesario reorganizar los datos para de este modo poder llegar al punto que queremos. Para ello debemos obtener primero la fuerza de adherencia desarrollada, que viene dada por la siguiente ecuación(DITE):

$$\tau_{bm} = N / (\pi d l_v)$$

Si este esfuerzo es al menos el esfuerzo requerido  $f_{bm}^{req}$ , el anclaje puede ser calculado utilizando el valor ultimo de proyecto  $f_{bd}$ . Esta suposición viene dada del hecho que en cada caso hacemos una hipótesis de una resistencia última  $f_{bd}$  de un post instalado siempre inferior a aquel instalado in situ.

Por otro lado, si sucede lo contrario, es decir que no alcanzamos la  $f_{bm}^{req}$ , tenemos que disminuir la  $f_{bd}$  por un factor que viene dado por 0,23(relación entre  $\tau_{bm}$  y  $\tau_{bd}$ )x1,5 ( $\gamma_c$ )=0,345.

$$\tau_{bd} = \tau_{bm} \times 0,345$$

En la siguiente tabla podemos observar los valores de diseño en función de la clase del hormigón

Tabla 3.-Valor de diseño de la resistencia en barras post instaladas [2]

Concrete strength class (1)	Design values of the ultimate bond resistance according to EC2 for good bond conditions $f_{bd}$ (N/mm <sup>2</sup> ) (2)	Required bond resistance for post-installed rebars $f_{bm}^{req}$ (N/mm <sup>2</sup> )
C12/15	1,6	7,1
C16/20	2,0	8,6
<b>C20/25</b>	<b>2,3</b>	<b>10,0</b>
C25/30	2,7	11,6
C30/37	3,0	13,1
C35/45	3,4	14,5
C40/50	3,7	15,9
C45/55	4,0	17,2
<b>C50/60</b>	<b>4,3</b>	<b>18,4</b>

En nuestro caso como hemos trabajado con un hormigón C20/25 nuestro valores de diseño son:

$$f_{bm}^{req} = 10 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{bd} = 2.3 \text{ N/mm}^2$$

Una vez obtenidos todos los valores de  $f_{bd}$  será posible representar gráficamente su relación con la temperatura de modo que podamos comparar las diversas pruebas así como las distintas resinas.

**Resina Vinilister**

Tabla 4.-Casos de carga y valores de cargas de diseño resina vinilister.

Carga constante				
Test	$\tau_{sust}$ [kN]	$T_{11}$	$f_{bm}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{bd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	45,00	49,33	9,95	2,29
2	36,00	79,75	7,96	1,83
3	27,00	115,53	5,97	1,37
4	18,00	144,79	3,98	0,92
5	4,52	337,42	1,00	0,23
6	9,05	253,16	2,00	0,46
7	31,67	88,00	7,00	1,61
8	40,72	77,00	9,00	2,07

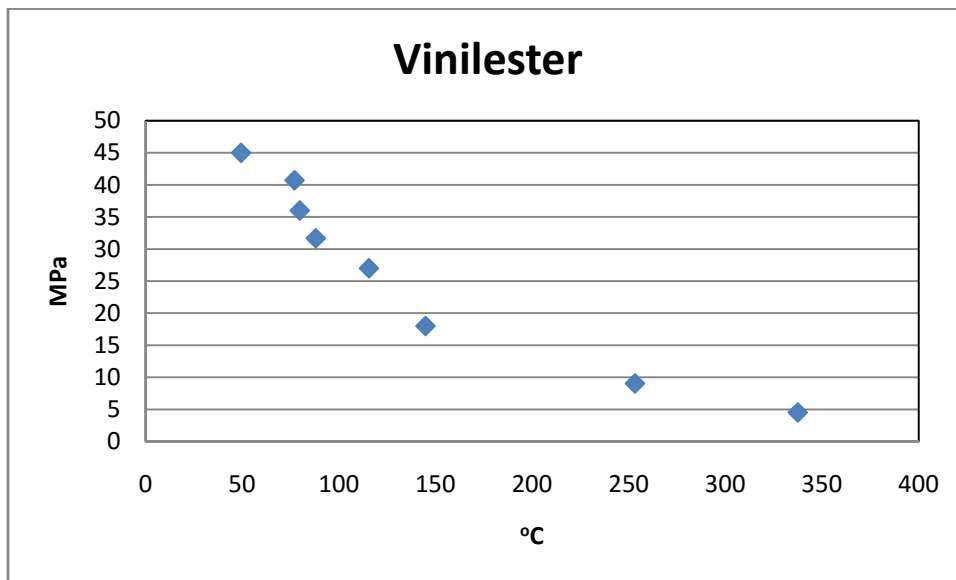


Imagen 46.-Recopilación de cargas de rotura ensayo pull-out resina Vinilister.

**Resina Epoxi**

Tabla 5.-Casos de carga y valores de cargas de diseño resina epoxi.

Carga constante				
Test	$\tau_{sust}$ [kN]	$T_{11}$	$f_{bm}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$f_{bd}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
1	4,52	258,00	1,00	0,23
2	6,79	151,71	1,50	0,35
3	9,05	84,65	2,00	0,46
4	11,31	73,44	2,50	0,58
5	46,00	47,82	10,00	2,30
6	40,70	52,32	9,00	2,07
7	36,00	50,32	8,00	1,84
8	31,70	57,10	7,00	1,61
9	27,00	57,44	6,00	1,38
10	22,60	60,46	5,00	1,15
11	18,00	60,90	4,00	0,92
12	13,60	66,17	3,00	0,69
13	9,00	91,02	2,00	0,46
14	4,50	265,77	1,00	0,23

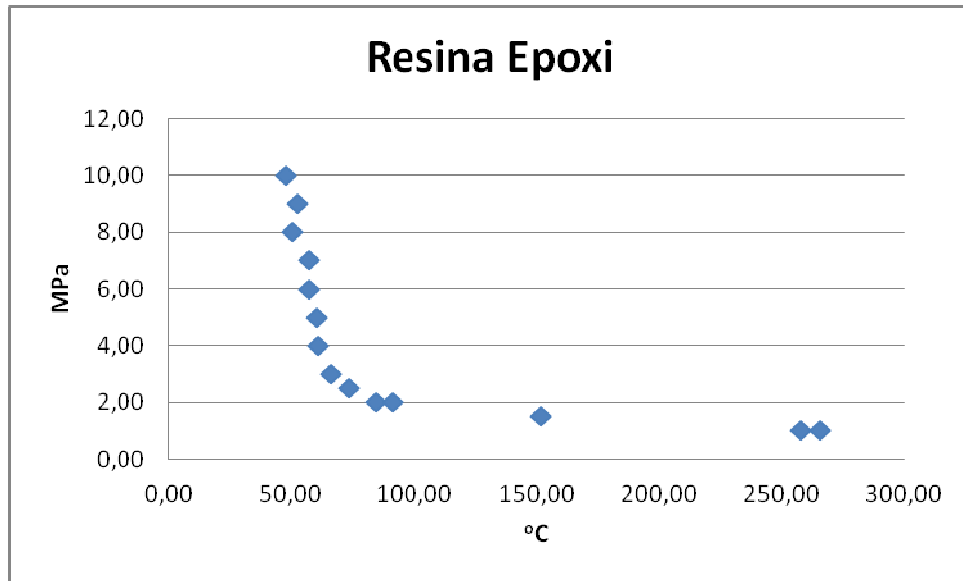


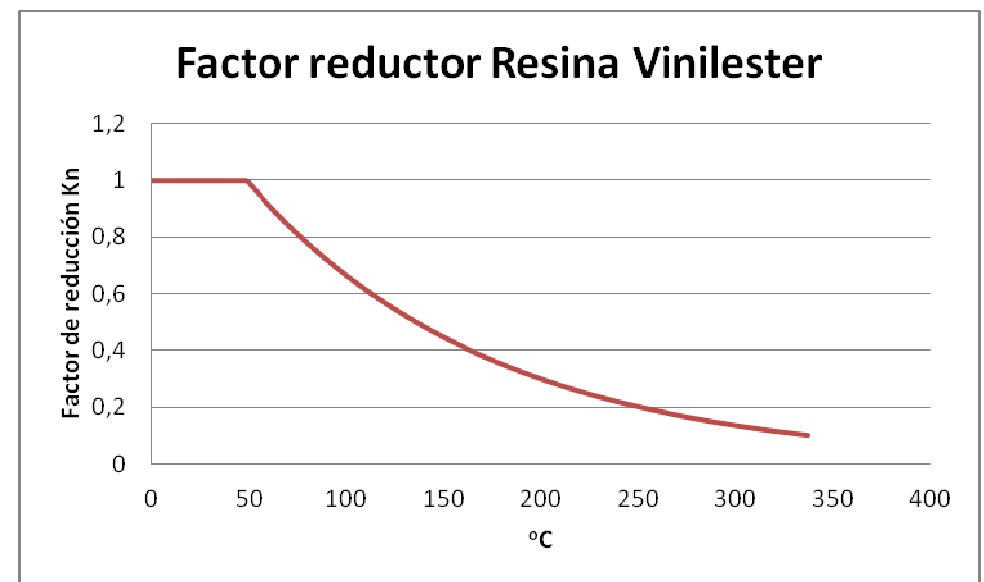
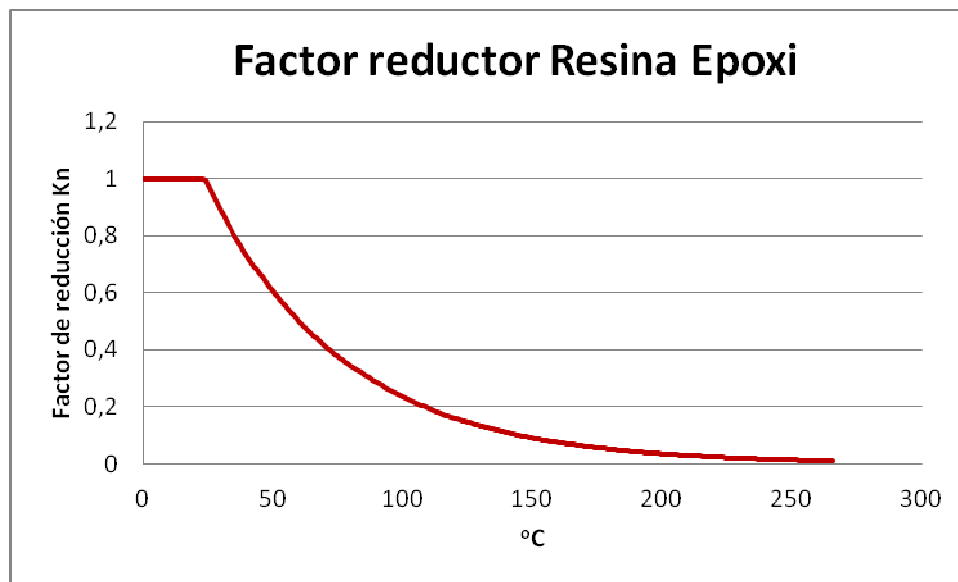
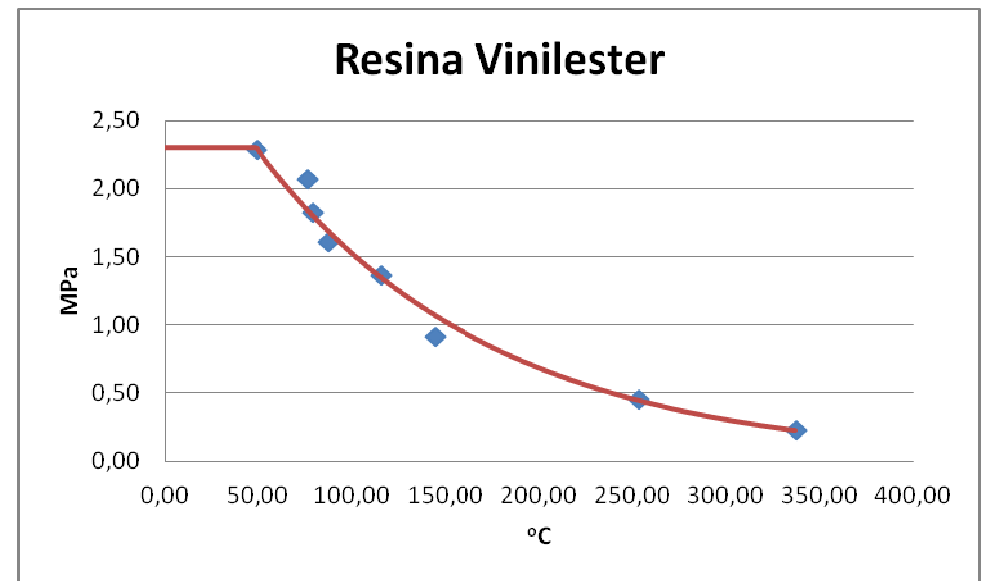
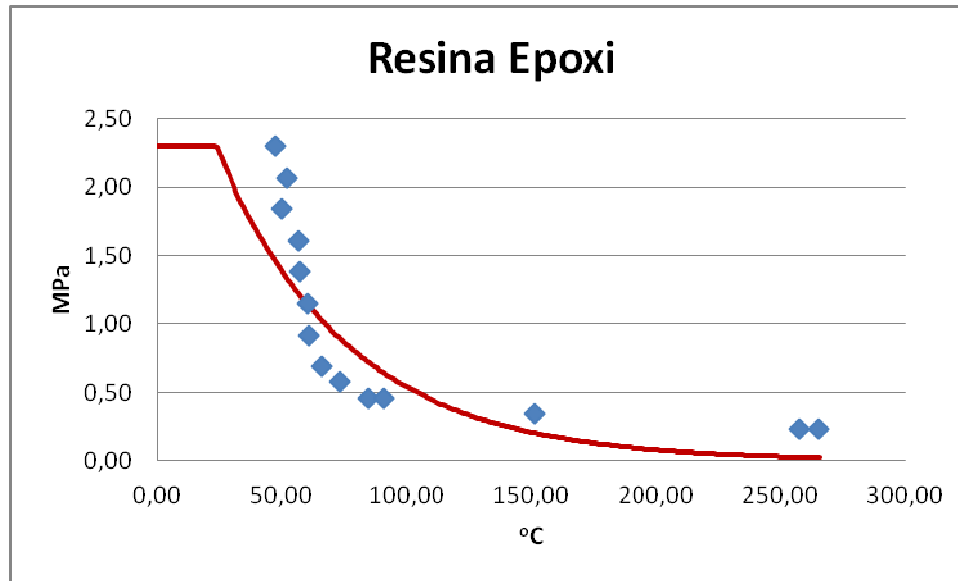
Imagen 47.-Recopilación de cargas de rotura ensayo pull-out resina Epoxi.

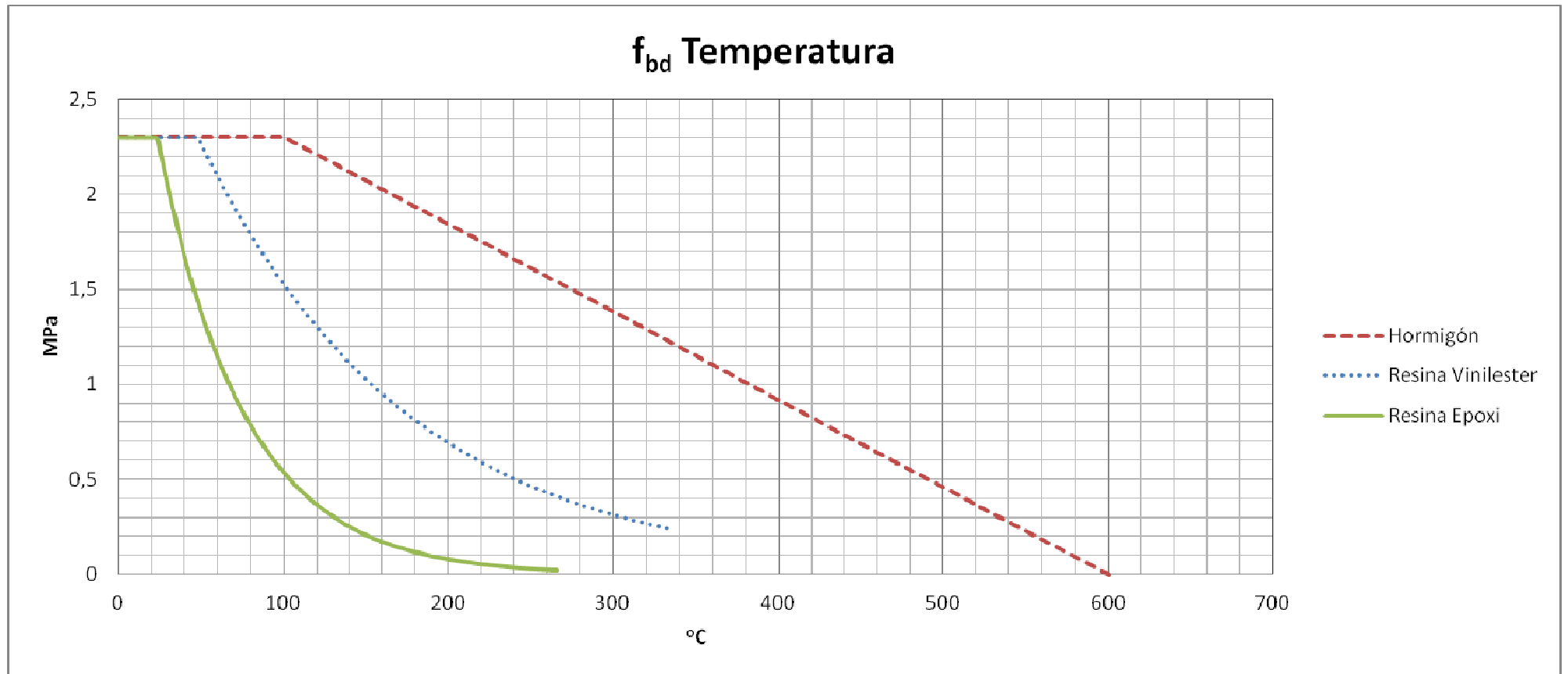
## 7.5.-Ordenación de los datos

Primero que todo calcularemos los parámetros del hormigón que nos interesan:

- Resistencia característica a compresión  $f_{ck}=20 \text{ N/mm}^2$
- Resistencia característica a tracción  $f_{ctk}=0,7 \times 0,3 f_{ck}^{2/3}=1,54 \text{ N/mm}^2$
- Resistencia de proyecto a tracción  $f_{ctd}= f_{ctk}/\gamma_c=1,03 \text{ N/mm}^2$
- Resistencia de proyecto de adherencia  $f_{bd}=2,25 \eta_1 \eta_2 f_{ctd} 2,3 \text{ N/mm}^2$ 
  - $\eta_1=1$  Buenas condiciones de adherencia
  - $\eta_2=1$  Por diámetro < 32 mm

A continuación trazamos el gráfico para observar  $f_{bd}$  y así poder comparar con nuestros datos:





## 8.-Aplicación práctica

Una vez obtenidos y analizados los resultados de laboratorio, tenemos que ver cómo influyen estos de forma práctica. Es por ello que a continuación vamos a desarrollar nuestro caso práctico.

Nuestro caso práctico tiene lugar en Segorbe, Castellón, más concretamente en el polígono industrial de "La Esperanza". Se trata de una nave industrial de dimensiones 40X8 m, es decir 320 m<sup>2</sup>. Nuestra nave está construida con pilares de hormigón de 0.50 x 0.60 m dichos pilares se sitúan cada 5 metros, únicamente en los lados más largos de la nave. Contamos con un total de 18 pilares construidos. La altura máxima libre de la cual disponemos es de 6,5 metros.

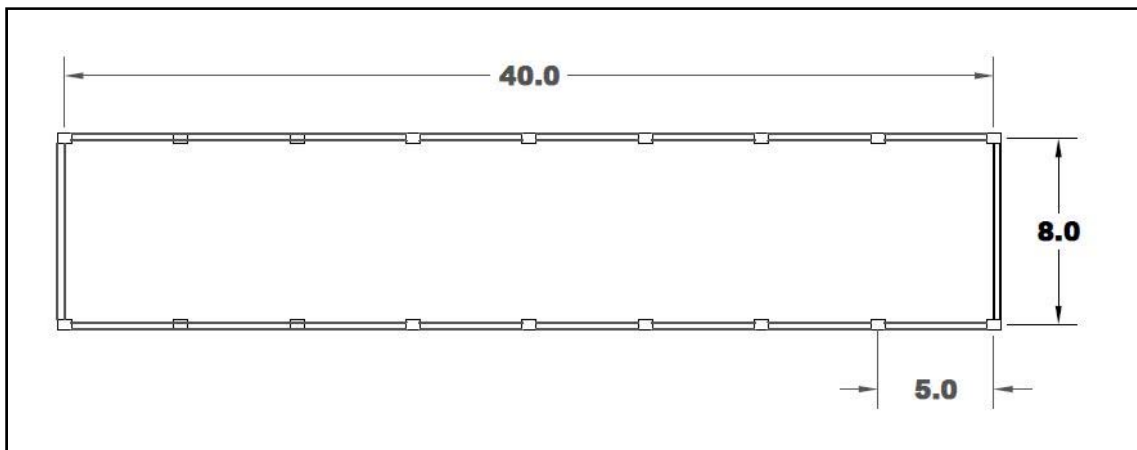


Imagen 48.- Sección en planta de la nave.

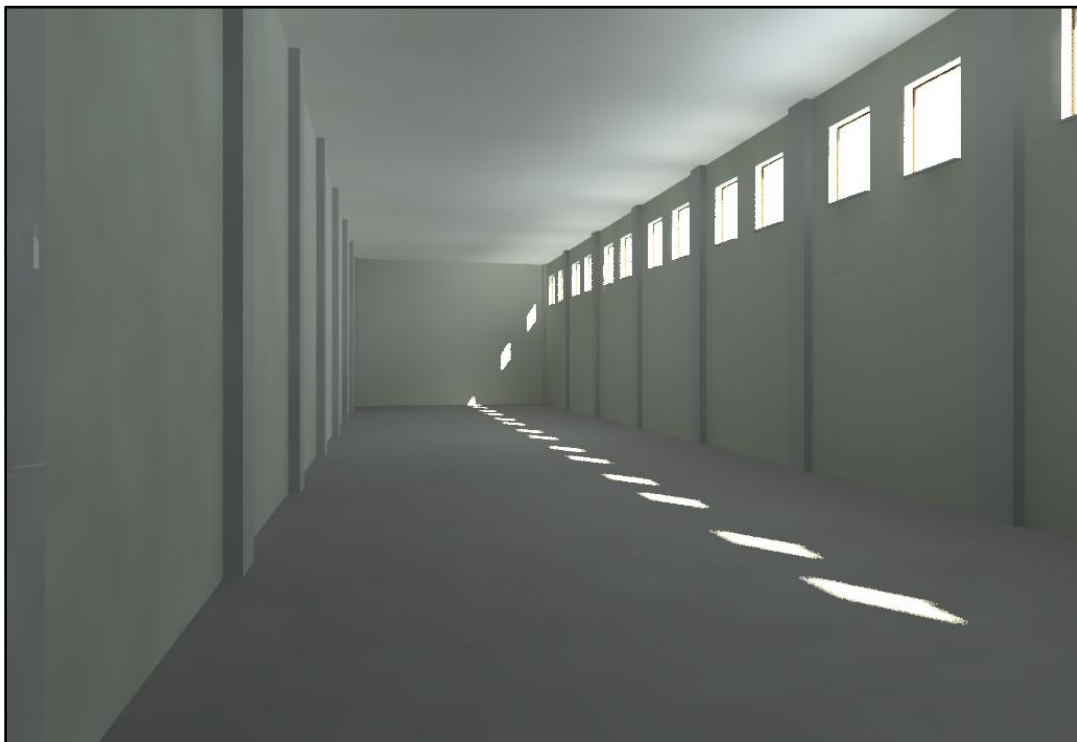


Imagen 49.- Interior actual de la nave industrial.



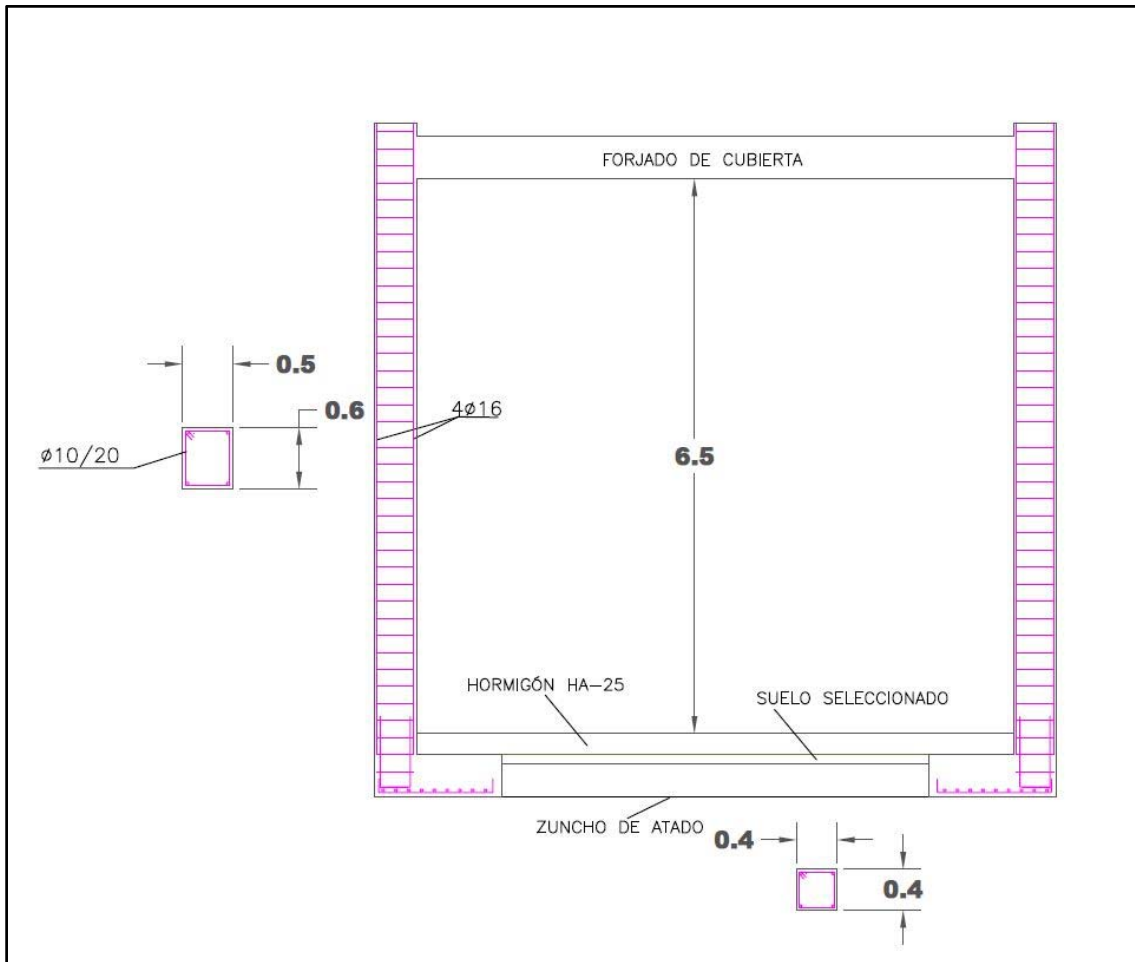


Imagen 50.-Sección con detalle del armado actual.

Esta nave ha cambiado de recientemente de dueño y por ello, también, de uso. Mientras que el propietario anterior requería de la altura completa debido a la entrada de camiones, el actual no necesita tanta altura, pero si necesita la construcción de unas oficinas para su negocio. Es por esto que se deciden colocar un forjado que cubra un área total de 80 m<sup>2</sup> y deje una altura de oficina un poco mayor de 2,5 metros.

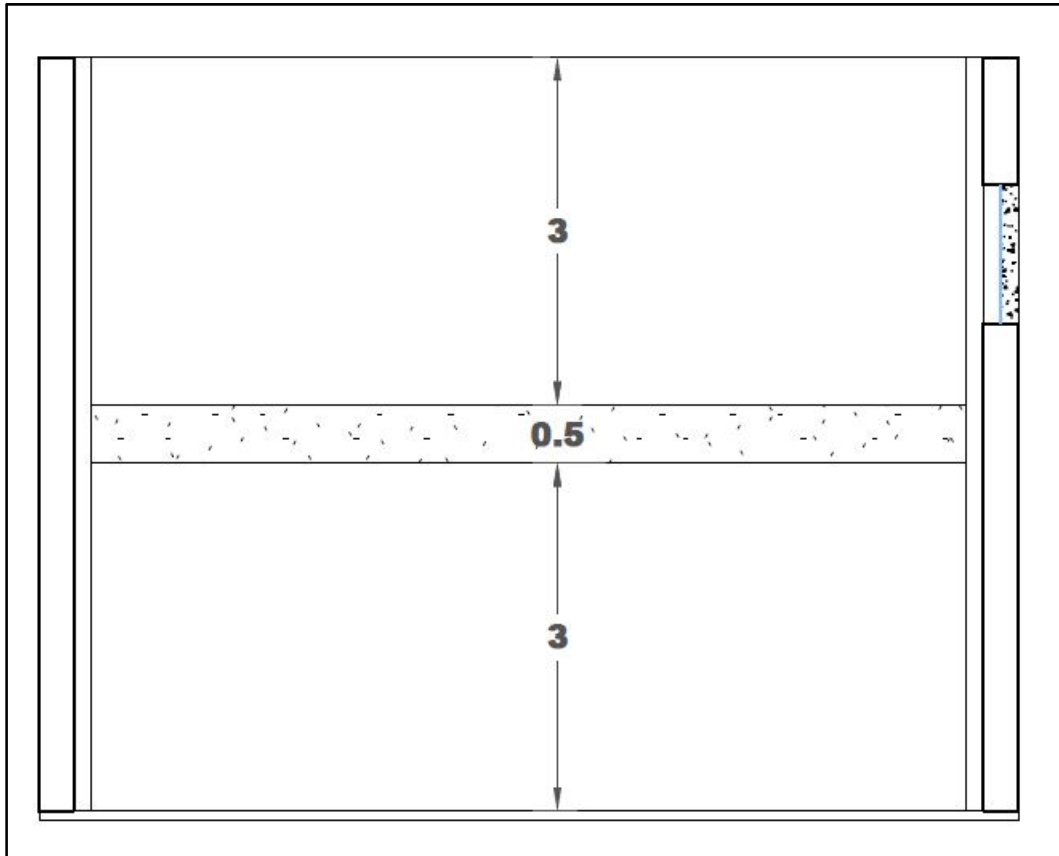


Imagen 51.-Sección tipo de la estructura a realizar

Para llevar a cabo esta obra se colocarán vigas horizontales entre los 4 primeros pilares de la estructura ya existente, y anclados mediante el uso de resinas. El forjado irá apoyado sobre estas vigas.

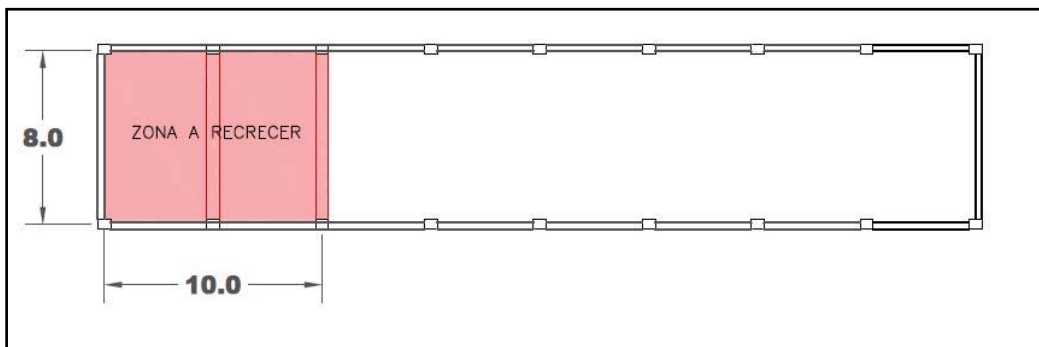


Imagen 52.-Sección en planta de la obra a realizar.



**Imagen 53.- Interior de la nave con ambas vigas ya ancladas.**



**Imagen 54.-Interior de la nave con las oficinas ya construidas.**

Fases de construcción:

1. Se procede a realizar los agujeros correspondientes en los pilares, a la profundidad de anclaje requerida. Seguidamente se rellenan con la resina y se coloca la armadura.
2. Una vez nuestra armadura está colocada, se procede a la colocación de los encofrados y del armado de la viga.
3. Finalmente se hormigona.

Por lo tanto una vez elegida la solución adecuada, tenemos que estudiarla. Como este proyecto se centra en el comportamiento que tienen las conexiones con resinas frente al fuego no nos centraremos en el predimensionamientos de las estructuras y procederemos a realizar el cálculo en función del fuego siguiendo el Eurocódigo 2, es decir suponiendo que las armaduras se han realizado in situ.

Primero tenemos que calcular la longitud de anclaje que requiere la estructura, para ello nos basaremos en lo que la EHE nos dicta:

$$Lbd = \phi^2 \times m$$

Siendo m:

**Tabla 6.- Tabla 66.52.a de la EHE**

Resistencia característica del hormigón (N/mm <sup>2</sup> )	m	
	Acero B-400-S	Acero B-500-S
25	12	15
30	10	13
35	9	12
40	8	11
45	7	10
50	7	10

En nuestro caso por estar usando un hormigón de 25 N/mm<sup>2</sup> y un acero B-500-S nuestro valor de m será de 15. Y consecuentemente el valor de lbd será:

$$Lbd = 1.6^2 \times 15 = 38.4 \text{ cm}$$

Requerimos de 39 cm de anclaje como mínimo, por ello se decide por una longitud de anclaje de 30 cm.

Una vez definida nuestra geometría, queda de la siguiente forma:

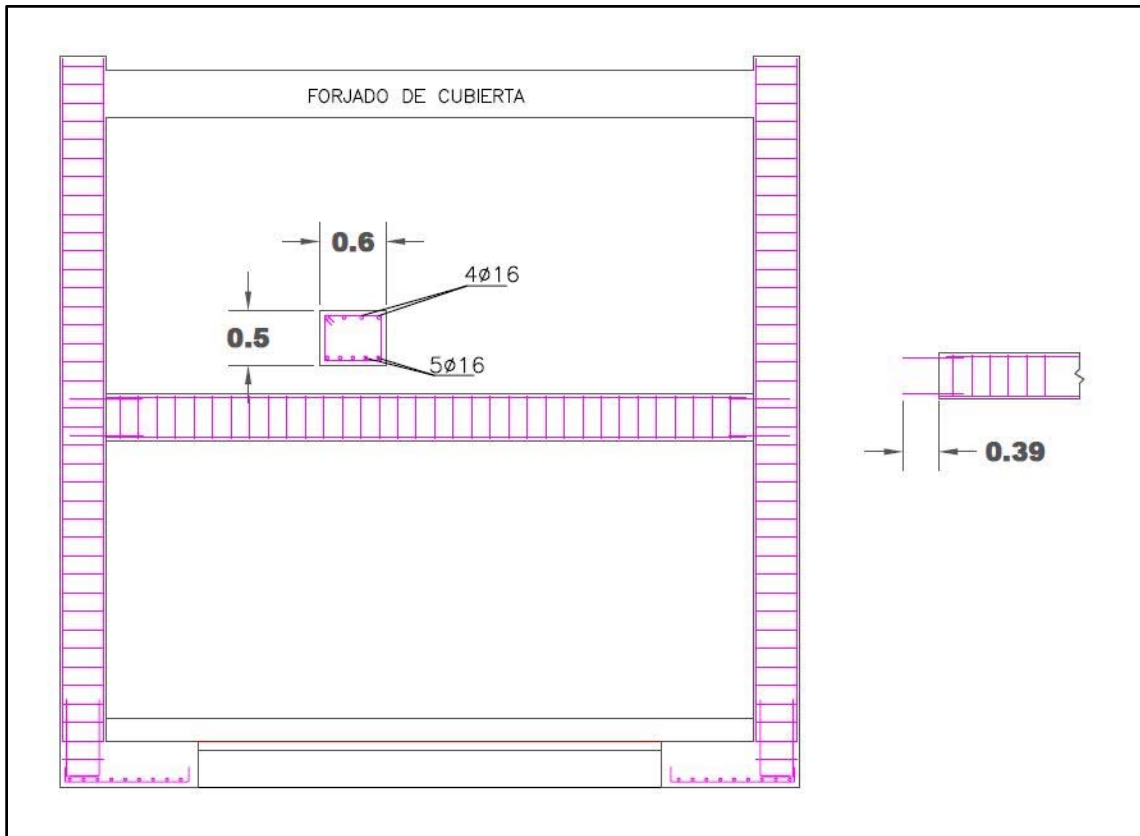


Imagen 55.-Sección tipo del armado y de la viga a colocar.

A continuación vamos a comprobar la resistencia que este forjado debería tener frente al fuego, por ello acudimos al Eurocódigo 2. Únicamente lo realizaremos en la parte superior

En nuestro caso como podemos observar en el detalle anterior que nuestro forjado posee un canto de 50 cm, para anclar en la parte superior usaremos un B-500-S de diámetro 16 mm. Tenemos que acudir a la tabla R30 - R240 (Imagen 39) y para nuestra geometría descrita y suponiendo una duración de 30 minutos, obtenemos una temperatura equivalente de 150 grados.

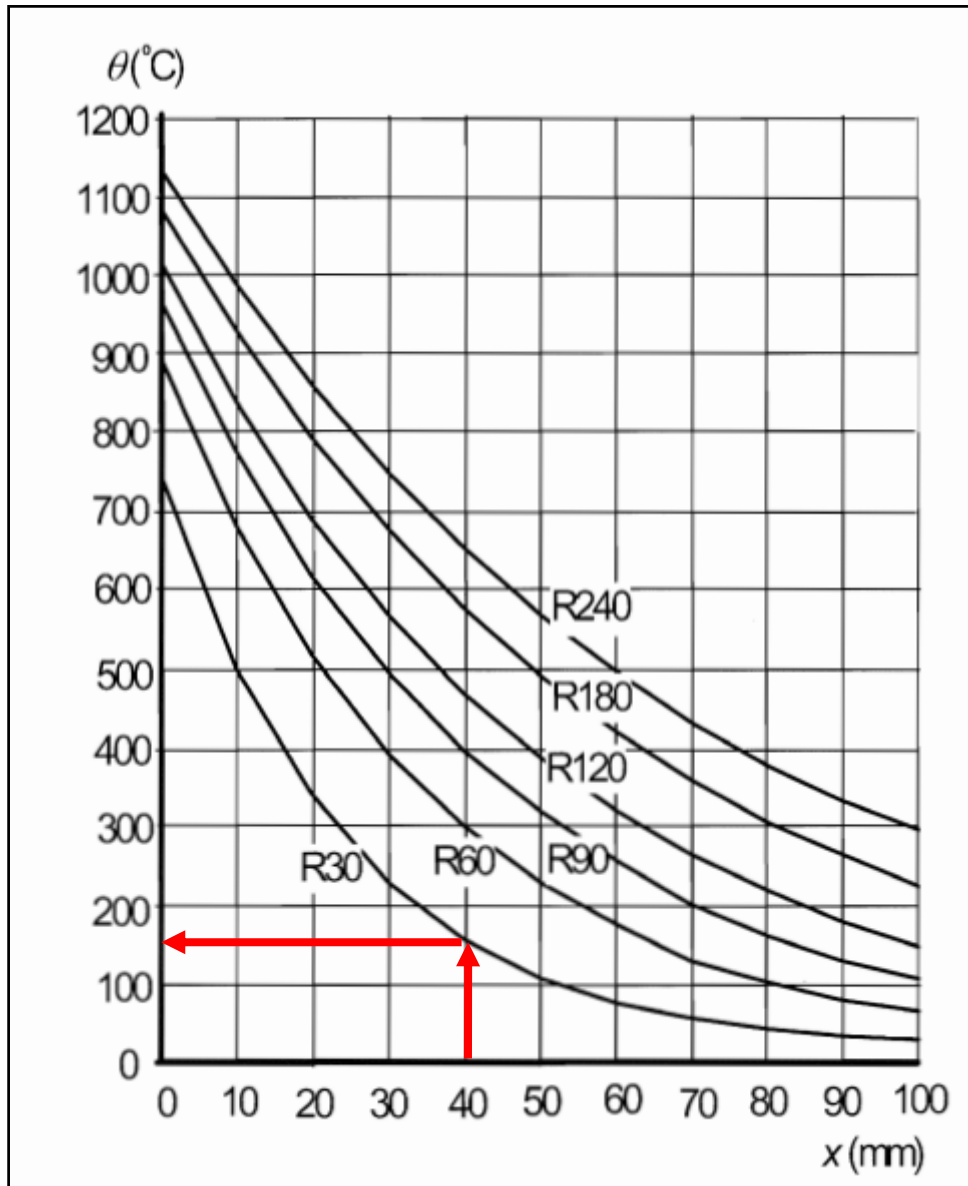


Imagen 56.- Temperatura según distancia de la armadura y tiempo de exposición. <sup>[5]</sup>

Llegados a este punto observamos la información que hemos obtenido en los ensayos acerca del  $f_{bd}$  relativo a la temperatura de 150 grados.

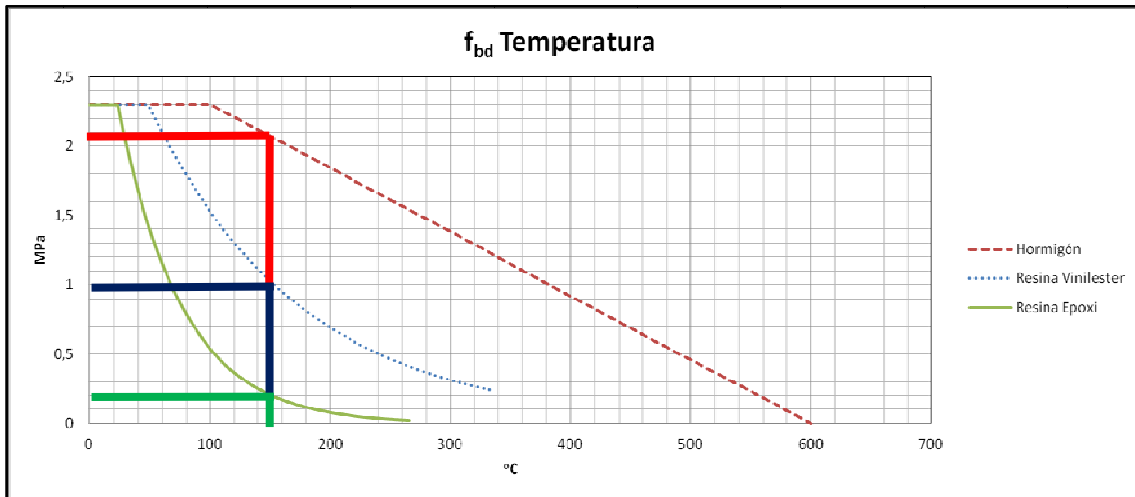


Imagen 57.-Gráficos de reducción de la resistencia según la temperatura.

Los valores que obtenemos son los siguientes:

- Vinilester: 1 MPa
- Epoxi: 0.2 MPa
- In situ: 2 MPa

Como bien podemos observar, es más que evidente que estamos trabajando suponiendo unas resistencias de cálculo que están por encima de las que en realidad tenemos.

Vemos como por ejemplo el factor de reducción en la profundidad de anclaje, que se da en este caso. Si hacemos la hipótesis que en las in-situ es necesario anclar la armadura del forjado con un determinado  $l_{bd}$  (dado por la normativa), en el post-instalado en situación de incendio tal  $l_{bd}$  no contribuye completamente en sostener la carga, es lo mismo que decir que la longitud de anclajes efectiva es menor de la que hay prescrita.

Efectuando una simple proporción obtenemos los valores realmente necesarios de longitud de anclaje debido al aumento de temperatura. A esta nueva longitud la denominaremos  $l_{bd}^*$ .

$$l_{bd} / l_{bd}^* = f_{bd} / f_{bd}^*$$

- In situ: 2  $\longrightarrow$   $2 = l_{bd}$
- Vinilester: 1/2  $\longrightarrow$   $l_{bd}^* = 0.50 l_{bd}$
- Epoxi: 0.2/2  $\longrightarrow$   $l_{bd}^* = 0.10 l_{bd}$

La problemática es evidente, pero no por ello debemos alarmarnos, ya que no esto significa que nuestro nuevo forjado en la nave industrial vaya a caerse. Esto se debe a que estamos trabajando con coeficientes de seguridad reductores, que disminuyen la resistencia real de nuestra estructura, como hemos podido observar en la tabla 3 que nos da el Eurocódigo 2.

Por lo tanto, la grafica que nos da la  $f_{bd}$  respecto a la temperatura sería en realidad la siguiente:

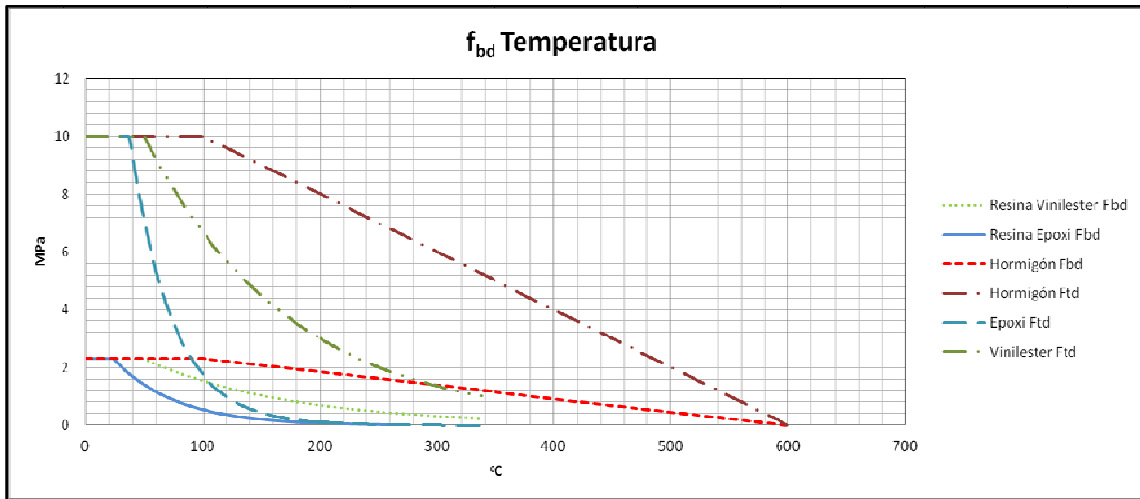


Imagen 58.- Gráficos de reducción de la resistencia según la temperatura tanto de cálculo como real.

En esta gráfica tenemos por un lado las resistencias obtenidas en laboratorio tanto del hormigón como de ambas resinas, Epoxi y Vinilister. Mientras que por otro lado, las resistencias menores son las resistencias de laboratorio disminuidas según la tabla 3, que es la reducción que nos indica el Eurocódigo que tenemos que realizar para los casos de barras embebidas en hormigón, pero que a día de hoy se aplican también en las resinas.

Aquí ya podemos observar que a pesar de que las resistencias reales vienen reducidas considerablemente al suponer que están colocadas in-situ en vez de a posteriori, nunca llegan a alcanzar las que estamos teniendo con nuestros coeficientes de seguridad. No obstante, esto no quiere que estamos trabajando del lado de la seguridad, pero las empresas cuentan con ese margen que el cual aprovechan para conseguir que las estructuras resistan.

También observamos que no siempre estamos trabajando con esa sobreestimación, si no que en función de la resina que estemos usando, estas empiezan a decaer hasta alcanzar las resistencias de cálculo. Por ejemplo en las resinas vinilister se ve claramente como llegados a los 100 grados las resistencias reales de los materiales se vuelven parejas a las de cálculo. En las resinas epoxi esto no resulta tan evidente, pero con la caída de la resistencia esta sí que empieza a aproximarse a la de cálculo.

Por lo tanto, podemos afirmar que trabajar en modo que no tengamos en cuenta los coeficientes de seguridad puede resultar bastante peligroso.

En nuestro caso, para poder solventar nuestra problemática y conseguir trabajar de una forma segura proponemos las siguientes soluciones:

### **Solución 1: Aumentar la longitud de anclaje.**

Podemos intentar aumentar la longitud de anclaje, hasta llegar a la verdaderamente requerida por nuestra estructura. Esta solución presenta una doble problemática, por un lado tenemos unas restricciones geométricas que nos podrían impedir llegar a la



longitud requerida. Mientras que por otro parte, como bien es sabido, la resistencia de anclaje tiene un máximo el cual aunque sigamos aumentando la longitud esta no aumentaría, por lo que en determinados casos tampoco nos valdría.

**Solución 2: Aumentar la distancia a la cara externa.**

Aumentar la distancia de la barra respecto a la superficie externa, de modo que la temperatura de la barra sea menor, ya que tarda más en verse afectada por el fuego. Esta sería la solución más recomendable pero al cambiar la posición de la armadura, la resistencia de esta se vería afectada. Para que esto no suceda debemos mantener constante el momento de cálculo del armado, por lo tanto veríamos un aumento en el tamaño de las armaduras como se deduce de la siguiente igualdad.

$$M = A_S \times F_{TD} \times Z = A'_S \times F_{TD} \times Z'$$

Por lo tanto, procedemos al cálculo

$$M = A_S \times F_{TD} \times Z = 16889.20 \text{ KNxcm}$$

- $A_S = 4 \times \pi \times 0.8^2 = 8.04 \text{ cm}^2$
- $Z = 50 - (4 \times 2) = 42 \text{ cm}$
- $F_{td} = 50 \text{ KN/cm}^2$

Por lo tanto, sabiendo que según el Eurocódigo 2 nuestra resina debería tener una resistencia de 2 MPa como hemos calculado antes, vamos a proceder a la inversa, es decir vamos a ver qué recubrimiento necesitaríamos y seguidamente ver como tenemos que variar nuestro armado.

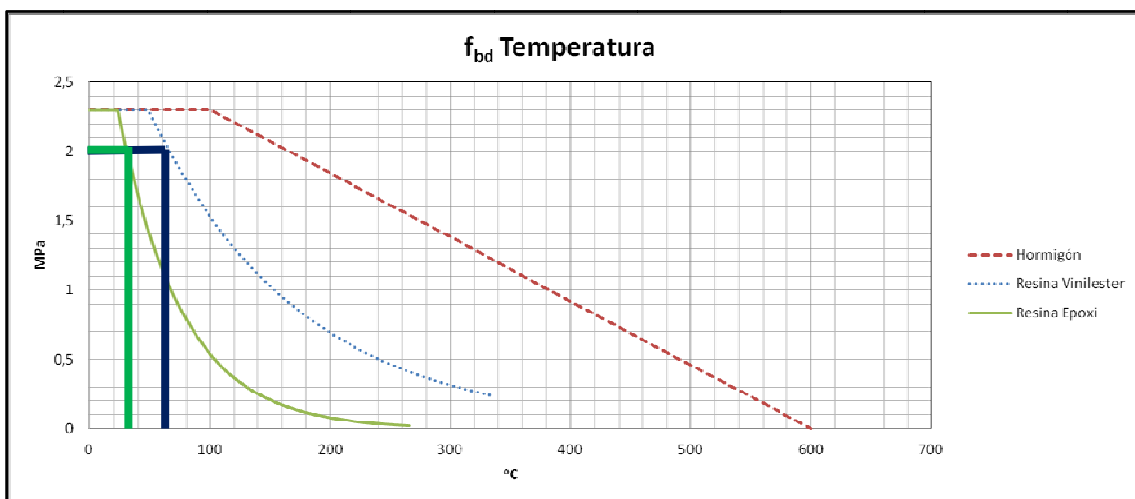


Imagen 59.- Gráficos de reducción de la resistencia según la temperatura, obtención de temperaturas.

Por lo tanto para resinas Epoxi nuestra temperatura equivalente será de 30 grados mientras que la vinilester será de 60 grados. Ahora vamos a ver que distancia de recubrimiento necesitamos.

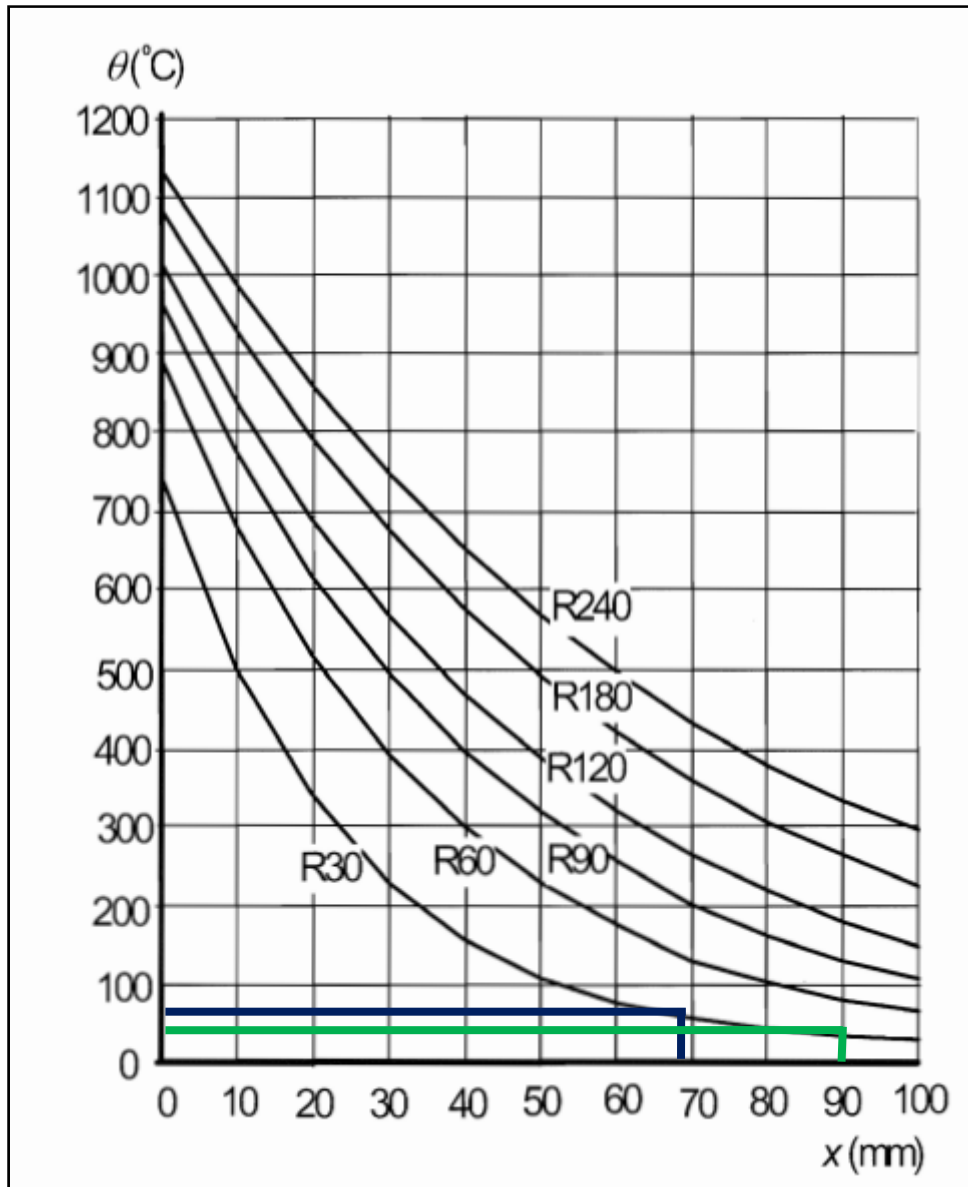


Imagen 60.- Temperatura según distancia de la armadura y tiempo de exposición, obtención del recubrimiento.

Por lo tanto queda de la siguiente forma:

Tabla 7.-Tabla de relación entre armado y tipo de colocación.

Colocación	Armado de la sección	Recubrimiento
In situ (Según EC2)	4 $\phi$ 16	4 cm
Resina Vinilester		7 cm
Resina Epoxi		9cm

Ahora tendremos que ver que armado necesita la sección para cada caso.

Resina Vinilester

$$M = A'_s \times F_{TD} \times Z' = 16889.20 \text{ KNxcm}$$

- $Z' = 50 - (4 + 7) = 39 \text{ cm}$
- $F_{td} = 50 \text{ KN/cm}^2$
- $A'_s = 8.66 \text{ cm}^2$

Realizando el cálculo para obtener el numero de barras necesarias, obtenemos:

$$n^{\circ} \text{ de barras} = \frac{A'_s}{\pi \times \frac{\phi^2}{4}} = \frac{8.66}{\pi \times \frac{1.6^2}{4}} = 4.3 \sim 5 \text{ barras}$$

Resina Epoxi

$$M = A'_s \times F_{TD} \times Z' = 16889.20 \text{ KNxcm}$$

- $Z' = 50 - (4 + 9) = 37 \text{ cm}$
- $F_{td} = 50 \text{ KN/cm}^2$
- $A'_s = 9.13 \text{ cm}^2$

Realizando el cálculo para obtener el numero de barras necesarias, obtenemos:

$$n^{\circ} \text{ de barras} = \frac{A'_s}{\pi \times \frac{\phi^2}{4}} = \frac{9.13}{\pi \times \frac{1.6^2}{4}} = 4.54 \sim 5 \text{ barras}$$

Por lo tanto, podemos afirmar que para conseguir la misma resistencia frente al fuego deberíamos de cambiar nuestro armado dependiendo de la resina. Esto queda reflejado en la tabla 4 que quedaría finalmente completada.

**Tabla 8.- .-Tabla de relación entre armado y tipo de colocación, completa.**

Colocación	Armado de la sección	Recubrimiento
In situ (Según EC2)	4φ16	4 cm
Resina Vinilester	5φ16	7 cm
Resina Epoxi	5φ16	9cm

## 9.-Conclusiones

A lo largo de este trabajo hemos dado a conocer los anclajes químicos con una elevada profundidad. Sabemos ya su uso y aplicación además de conocer los diversos factores que influyen en la adherencia de estos entre el hormigón y las barras corrugadas.

Junto a todo esto se ha explicado el proceso de evaluación de dichos anclajes, y finalmente, se ha expuesto la evaluación de las armaduras post-instaladas frente al fuego aplicándola en el laboratorio. Con los datos obtenidos por la investigación en esta tesis, se ha realiza una aplicación práctica que nos ha permitido ver la importancia del buen conocimiento del comportamiento de los materiales con los que trabajamos frente al cambio de las condiciones del entorno.

Del estudio realizado con las barras post-instaladas mediante resinas hemos podido observar que a mayor carga, mayor es el desplazamiento inicial de esta, pero no es hasta en el momento que se alcanza la rotura cuando los desplazamientos que se dan son de una cuantía importante y en un espacio de tiempo muy reducido.


También hemos observado que a medida que aumentábamos la carga la temperatura de rotura era menor, es decir, la máxima resistencia de rotura disminuye. Por lo tanto podemos afirmar que este comportamiento que se da es el mismo que el que nos encontrábamos con las barras embebidas en el hormigón.

No obstante, que la resistencia de los materiales disminuye con el fuego era algo que ya sabíamos a priori, pero simplemente hemos confirmado esto. Una vez que lo hemos afirmado hemos visto que a pesar de tener un comportamiento parecido no es el mismo que el de las barras embebidas, como hasta ahora se estaba adoptando. Por ello hemos creado nuestros graficas de coeficientes de reducción de la resistencia para las distintas resinas que hemos analizado.

Consecuentemente, podemos afirmar que nuestros coeficientes de reducción hasta ahora eran erróneos, ya que estábamos suponiendo una resistencia de cálculo mayor a la que en verdad poseen. También cabe resaltar que no solo hay variación entre un anclaje con resina y uno con hormigón, sino que la variación existente entre resinas es también bastante grande. Teniendo la resina epoxi un comportamiento peor frente al fuego que la viniléster.

Finalmente, de nuestro caso práctico hemos podido observar la problemática existente, la suposición de unas resistencias mayores a las que tenemos. Además hemos aportado diferentes soluciones para solventar el problema. De todo esto hemos sacado una conclusión clara, dado que a día de hoy no existe una normativa acerca del cálculo estructural de las barras post-instaladas in situ en casos de incendio, es necesaria la redacción de una normativa. De este modo trabajaremos del lado de la seguridad y evitaremos que las distintas empresas, ya sean de fabricantes de resinas, o la empresa que calcule la estructura, dejen de calcular variando los coeficientes de seguridad.

Con todo esto queda demostrado que debemos de conocer bien el comportamiento de nuestros materiales pues son los que nos definen tanto el diseño de la obra como su duración, y por ello su importancia es más que elevada. De modo que ante la presencia de nuevos materiales que nos permiten avanzar en el sector de la construcción hemos de tener la suficiente capacidad de reacción para poder conocer bien el material y poder desarrollar la normativa necesaria que nos aporte garantías y seguridad en nuestras obras.



El autor del documento,  
Fernando Fernández García

## **10.-Bibliografía**

- [1] Eurocódigo 2 : Proyecto de estructuras de hormigón Parte 1. Reglas generales y reglas para edificación ENV 1992-1-1 : 1992
- [2] Apéndice 1: Hilti HIT-RE 500 Mortero adhesivo por inyección.
- [3] Instituto del cemento y el hormigón de Chile: Seminario anclajes para el hormigón.
- [4] Technical Report 23: Assessment of post-installed rebar connections
- [5] Eurocódigo 2: EN 1992-1-2. Reglas para el proyecto de estructuras de hormigón frente al fuego
- [6] Manual de Würth técnicas de anclaje.
- [7] Technical Report 20: Evaluation of Anchorages in Concrete concerning Resistance to Fire
- [8] Tesis. Valutazione del degrado delle proprietà di aderenza relative a barre d'armatura post inserite- Andrea Nino Consiglio
- [9] UCAM: "Resistencia al fuego de los hormigones de altas prestaciones "
- [10] Structural Fasteners: Post-Installed rebars - Giovanni Muciaccia