UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

"Mejora de la adherencia de las armaduras pasivas al hormigón mediante el uso de fibras de acero"

PROYECTO FINAL DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN

MODALIDAD: CIENTÍFICO-TÉCNICO

ALUMNO:

GÓMEZ BENLLOCH, JOSÉ VICENTE

TUTORES:

SÁNCHEZ BOLINCHES, D. ALEJANDRO
GARCÍA TAENGUA, D. EMILIO

JUNIO 2012

ÍNDICE:

1) Introducción: los HRFA.

2) Estado del arte: adherencia de armaduras pasivas al hormigón.

3) Objetivos y metodología experimental.

4) Estudio experimental.

5) Análisis de resultados.

6) Conclusiones y líneas futuras.

7) Estudio presupuestario.

8) ANEXOS

9) Bibliografía.

1) INTRODUCCIÓN: EL MATERIAL.

1.1 Los hormigones reforzados con fibras de acero (HRFA).

El Hormigón Armado con Fibra es un material compuesto, se trata de un hormigón que contiene materiales fibrosos que aumentan su resistencia estructural. Contiene fibras cortas, de distintos tamaños que son repartidas de manera uniforme y orientadas al azar. Como Fibras se incluyen fibras de acero, fibras poliméricas y otras fibras inorgánicas. Dentro de estas diferentes fibras se da el carácter de los cambios de fibra de hormigón armado con diferentes hormigones, materiales de fibra, geometrías, la distribución, la orientación y la densidad.

La EHE-08 nos define en el Anejo 14 a las fibras como elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la masa del hormigón a fin de conferirle ciertas propiedades específicas.

Las fibras son generalmente utilizadas en el hormigón para controlar la retracción, las grietas y resquebrajamiento efecto del secado, puntos muy importantes en la durabilidad del hormigón. El refuerzo de fibras puede reducir la anchura de la grieta y aumentar la rigidez de la tensión de hormigón entre las grietas. Asimismo, la menor permeabilidad del hormigón y, por tanto, reducir la hemorragia de agua. En general, las fibras no aumentan la flexión del hormigón, por lo que no puede sustituir el refuerzo estructural de acero. Algunas fibras pueden incluso reducir la resistencia del hormigón.

También actúan como puentes entre una cara de la fisura y la otra generando un mecanismo de transferencia. Este mecanismo reduce la propagación de fisuras, contribuye a la ductilidad y aumenta la resistencia. También con la adhesión de las fibras al hormigón, aumentamos la resistencia al impacto puesto que las fibras de acero hace las veces de gancho y provoca una resistencia cinco veces mayor a la que producen las fibras lisas.

Las fibras tienen un efecto positivo sobre el anclaje de barras de refuerzo de hormigón, ya que mejoran claramente la capacidad de unión en función de la ductilidad, aunque su influencia en la resistencia de la unión, es decir, la tensión de adherencia máxima, es de relativamente poca importancia. Para mejorar la tenacidad del hormigón en aplicaciones estructurales, podemos utilizar fibras de alto módulo para sustituir parcial o totalmente el refuerzo convencional, barras o malla soldada. Otras fibras que tienen bajo módulo y pequeño tamaño (longitud de pocos milímetros de diámetro y de pocas micras) se pueden utilizar para reducir el agrietamiento por contracción y mejorar la resistencia al fuego.

Las investigaciones experimentales muestran que la inclusión de las fibras de acero en el hormigón, en adecuadas cantidades, mejoran la resistencia al corte por las siguientes razones: el aumento en la resistencia a la tracción retarda la formación y crecimiento de fisuras, una menor distancia entre fibras que la que existe entre estribos implica mayor efectividad en el mecanismo de “coser las fisuras” que tienen ambos refuerzos y por último una mejor distribución de las fisuras de tracción.

La cantidad de fibras añadidas a una mezcla de hormigón se mide como porcentaje del volumen total de los compuestos (hormigón y fibras) denominada fracción volumétrica (Vf). Vf normalmente oscila entre 0,1 a 3%.

Relación de aspecto (l / d) se calcula dividiendo largo de las fibras (l) por su diámetro (d). Las fibras de largos muy extensos pueden crear problemas.

El refuerzo de fibra es especialmente adecuado para estructuras estáticamente indeterminadas de alta capacidad de distribución de la tensión. En las estructuras donde las tensiones localizadas tanto difusas y están presentes, que es el caso usual, un sistema de refuerzo compuesto de barras y las fibras pueden representar una solución de refuerzo optimizado.

En estructuras sin barras, donde las fibras sustituyen completamente el refuerzo convencional, un nivel mínimo de redundancia del miembro estructural se requiere ya que la gran mayoría de estructuras, en edificación, son hiperestáticas.

Por el contrario, en las estructuras con barras de refuerzo, donde las fibras proporcionan un refuerzo adicional, la ductilidad es generalmente provista por un refuerzo convencional que juega una importante contribución a la resistencia a la tracción.

Otro de los aspectos importantes es que el refuerzo de fibra entra en el elemento estructural junto con los costes de hormigón, evitando así la manipulación y la colocación de la armadura. Además, las fibras requieren un área de almacenamiento más pequeña (normalmente un tanque) con respecto al refuerzo convencional (Barras o malla soldada).

El comportamiento de las fibras de los HRFA comenzó a ser conocido en el caso de cargas de tiempo limitado, sin embargo, su comportamiento a largo plazo todavía queda extensamente sin estudiar. El comportamiento a largo plazo de estructuras reforzadas con fibras de acero en el modo fisurado dependen de la capacidad de la fibra de tomar esfuerzos entre los dos labios de las fisuras.

La corrosión de las fibras en el HRFA puede resultar en el estallo de la matriz cementicia por el aumento de volumen que produce el desarrollo de la corrosión, o un debilitamiento en la capacidad del efecto de puente de las fibras entre fisuras debido a la disminución de la sección. Según los ensayos efectuados se confirma la pequeña sensibilidad del HRFA a la corrosión.

El tema de la fatiga es de interés actual debido al desarrollo de puentes, rutas, estructuras oceánicas o autopistas donde la carga de diseño puede actuar para un gran número de ciclos. Además de esto existe también una percepción de que la repetición de las cargas puede aumentar el ancho de fisura, o la deformación o puede reducir la rigidez de la estructura para cargas de servicio, aunque o ocurran más los fallos de fatiga.
La fatiga del hormigón es un proceso de desarrollo progresivo de pequeñas imperfecciones existentes en el material debido a cargas repetitivas.

1.1.1 Las fibras según el material: acero, plástico (PP), vidrio, etc.

a) FIBRAS DE ACERO:

Las fibras de acero en el hormigón armado proporcionan mayor resistencia a la tracción y mayor ductilidad, en la matriz cementicia. La adición de fibras de acero mejora muchas propiedades como la resistencia a la tracción, flexión, fatiga y en especial la resistencia al impacto y la tenacidad. Además la adición de fibras hace al material más homogéneo y lo transforma de un material frágil a uno más dúctil.

Las investigaciones experimentales muestran que la inclusión de las fibras de acero en el hormigón, en adecuadas cantidades, mejoran la resistencia al corte por las siguientes razones: el aumento en la resistencia a la tracción retarda la formación y crecimiento de fisuras, una menor distancia entre fibras que la que existe entre estribos implica mayor efectividad en el mecanismo de "coser las fisuras" que tienen ambos refuerzos y por último una mejor distribución de las fisuras de tracción.

b) FIBRAS DE PLÁSTICO:

Las fibras plásticas están formadas por un material polimérico (polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon, poliéster) extrusionado y posteriormente cortado. Estas pueden ser adicionadas homogéneamente al hormigón, mortero o pasta. Según el proceso de fabricación se clasifican en: monofilamentos extruidos (Tipo 1), láminas fibriladas (Tipo II).

Sus dimensiones pueden ser variables al igual que su diámetro y su formato:
Micro-fibras: < 0,30 mm diámetro
Macro-fibras: > 0,30 mm diámetro

Las macro-fibras pueden colaborar estructuralmente, siendo su longitud variable (desde 20 mm a 60 mm), que debe guardar relación con el tamaño máximo del árido (relación de longitud 3:1 fibra: TM).

Las micro-fibras se emplean para reducir la fisuración por retracción plástica del hormigón, especialmente en pavimentos y soleras, pero no pueden asumir ninguna función estructural. También se utilizan para mejorar el comportamiento frente al fuego, siendo conveniente en este caso que el número de fibras por kg sea muy elevado.
Además de por sus características físico-químicas, las micro-fibras se caracterizan por su frecuencia de fibra, que indica el número de fibras presentes en 1 kg, y que depende de la longitud de fibra y muy especialmente de su diámetro.

c) FIBRAS INORGÁNICAS:

De este tipo de fibras, son las fibras de vidrio, que en la actualidad tienen aplicación usual en el campo del hormigón. No se incorporan otras fibras que, aun existiendo, son usadas para otras aplicaciones fuera del campo del hormigón.

Las fibras de vidrio podrán emplearse siempre que se garantice un comportamiento adecuado durante la vida útil del elemento estructural, en relación con los problemas potenciales de deterioro de este tipo de fibras como consecuencia de la alcalinidad del medio.

Dado que los HRF pueden experimentar importantes reducciones de resistencia y tenacidad debido a la exposición al medio ambiente, se deberán tomar las medidas adecuadas tanto sobre la fibra como sobre la matriz cementícea para su protección. En este sentido, las fibras pueden presentarse con una capa protectora superficial de un material epoxídico que reduce la afinidad de las mismas con el hidróxido de calcio, proceso responsable de la fragilización del compuesto.

1.1.2 Tipos de fibras de acero: trefiladas, etc + geometrías: la longitud y la esbeltez.

Según el proceso de fabricación se clasifican en: trefiladas (Tipo 1), cortadas en láminas (Tipo II), extraídas por rascado en caliente (virutas de acero) (Tipo III) u otras (por ejemplo, fibras de acero fundidas) (Tipo IV). La forma de la fibra puede ser muy variada: rectas, onduladas, corrugadas, conformadas en extremos de distintas formas, etc. La forma tiene una incidencia importante en las características adherentes de la fibra con el hormigón.

La longitud de la fibra (lf) se recomienda sea, como mínimo, 2 veces el tamaño del árido mayor. Es usual el empleo de longitudes de 2,5 a 3 veces el tamaño máximo de árido. Otro condicionante es el diámetro de la tubería de bombeo, que exige que la longitud de la fibra sea inferior a 2/3 del diámetro del tubo. Por otro lado, la longitud de la fibra debe ser suficiente para dar una adherencia necesaria a la matriz y evitar arrancamientos con demasiada facilidad.

A igualdad de longitud, fibras de pequeño diámetro aumentan el número de ellas por unidad de peso y hacen más denso el entramado ó red de fibras. El espaciamiento entre fibras se reduce cuando la fibra es más fina, siendo más eficiente y permitiendo una mejor *redistribución* de la carga ó de los esfuerzos.

Esbeltez o aspecto (cociente longitud/diámetro): cuanto mayor es la esbeltez, mejor capacidad de “coser” la matriz (se recomienda una longitud de al menos tres veces el diámetro del mayor árido).

1.1.3 Propiedades mecánicas de los HRFA:

1.1.3.1 Resistencia a compresión.

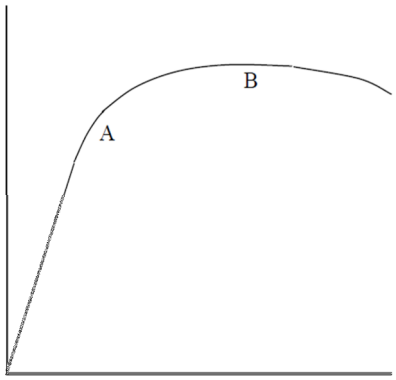
La incorporación de fibras no afecta de manera significativa a la resistencia a compresión puesto que son los áridos los que le soportan las cargas a compresión que se producen en el hormigón.

1.1.3.2 Comportamiento a flexotracción: caracterización/tipificación de los HRFA.

Según nos indica la instrucción de la EHE-08 en el Anejo 14, la resistencia del hormigón a flexotracción, se refiere a la resistencia de la unidad de producto o amasada y se

obtiene a partir de los resultados de ensayo de rotura a flexotracción, en número igual o superior a tres, realizados sobre probetas prismáticas de ancho igual a 150 mm, altura igual a 150 mm y largo igual a 600 mm, de 28 días de edad, fabricadas, conservadas y ensayadas de acuerdo con UNE-EN 14651.

Cuando una pieza de hormigón armado con fibras es sometida a flexión se observan dos tipos de comportamiento en la curva de tensión-deformación:



Hasta el punto A se puede considerar que existe proporcionalidad entre la carga aplicada y la deformación originada, se le denomina “tensión de primera fisura” o “límite elástico”. Según la norma EN 14651 nombra al punto A “límite de proporcionalidad” LOP (limit of proportionality) y es el equivalente a la “tensión de primera fisura” o “límite elástico. Posteriormente aparece un nuevo punto B a partir del cual se produce una caída en la tensión. A este punto B se le denomina “tensión de rotura” o “resistencia última”.

En el hormigón convencional, una vez fisurada la zona en tracción se produce la rotura de la pieza.

Antes de llegar a la tensión de primera fisura se puede suponer un comportamiento elástico, tanto para el hormigón como para las fibras; ya que el módulo de elasticidad de las fibras es mayor que el del hormigón (10 veces en el caso de fibras de acero), el incremento de volumen de fibras aumenta el límite elástico del compuesto. No obstante, este efecto es menor que en el caso de hormigón armado convencional para el mismo volumen de acero y fibras uniformemente distribuidas. Puesto que los mecanismos de fibras de refuerzo están principalmente activados después de la fisuración de la matriz de hormigón, las fibras tienen una influencia marginal en el comportamiento de los elementos no agrietados. Por lo tanto, la resistencia a la tracción de hormigón está relacionada con la resistencia de la matriz y no está influenciada por las fibras.

Una vez sobrepasado el límite elástico, la curva tensión-deformación deja de ser lineal, alcanzando un máximo en el punto B. El fallo se produce generalmente por arrancamiento de las fibras, sin que éstas lleguen a alcanzar su tensión de rotura salvo en aquellos casos en que se mejora la adherencia de las fibras, con lo que algunas pueden llegar a la rotura.

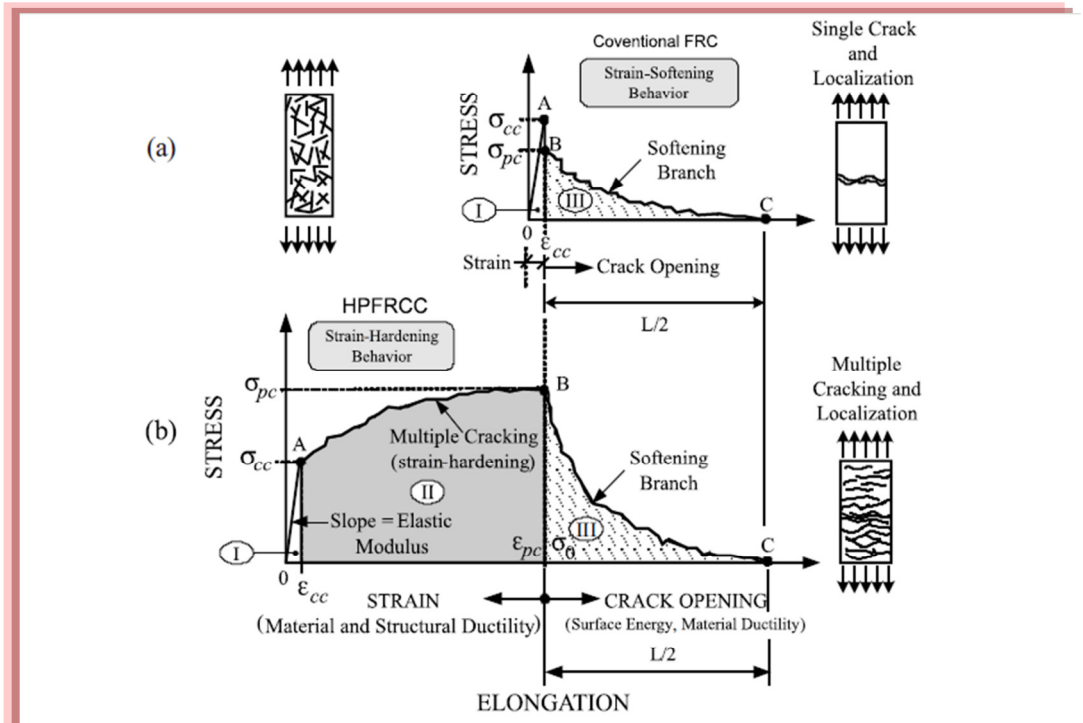


Figure 2: Typical stress-strain or elongation curve in tension up to complete separation: (a) Conventional strain-softening FRC composite; (b) Strain-hardening FRC composite or HPFRCC [40, 45]

En esta imagen podemos ver dos gráficas sobre la típica tensión-deformación o alargamiento en la curva de tensión hasta llegar a la completa separación: (a) convencional de reblandecimiento HRF compuesto y (b) de endurecimiento por deformación HRF compuesto o HPFRCC.

Como se puede presenciar en la imagen de la segunda gráfica, las fibras pueden tener dos comportamientos distintos después de la fisura: uno puede ser de "endurecimiento" (hardening, rama ascendente de la 2ª gráfica después de sobrepasar el límite elástico) y el otro puede ser de "ablandamiento" (softening, rama descendente de la 2ª gráfica). Según la cantidad de fibras empleadas en la dosificación, se dará el comportamiento de "endurecimiento" para cantidades medias-altas.

Después de la carga máxima, la disminución de tensiones con el incremento de las deformaciones es mucho menor en el hormigón armado con fibras que en el convencional y, por tanto, la energía absorbida antes de la rotura completa de la pieza ensayada es mucho mayor en el hormigón de fibras que en uno convencional, dependiendo esta diferencia del volumen de fibras empleado que cruzan las grietas activas y en su orientación. Dado que la distribución de fibras y la orientación se ven afectados por varios factores de difícil control (fluidez, viscosidad, capacidad de relleno), la dispersión de los parámetros de resistencia residual puede ser significativo. Se pone de manifiesto en la menor pendiente de la curva tensión-deformación del hormigón de fibras respecto al convencional un aumento de la tenacidad en los hormigones con fibras.

Se define la **tenacidad** como la energía absorbida para producir la separación completa de la pieza. Está representada por el área de la curva de tensión-deformación. También se puede medir mediante ensayos de impacto. La adición de fibras al hormigón aumenta hasta el doble la tenacidad del hormigón.

En las proximidades de la máxima carga de flexión, parte de la sección transversal de la pieza se agrieta y algunas de las fibras pueden sufrir deslizamientos parciales. Por ello, no es posible predecir racionalmente la carga de rotura del hormigón con fibras; sin embargo, basándose en los resultados experimentales y en las teorías de composición pueden lograrse aproximaciones empíricas.

Los factores que tienen mayor influencia en la carga máxima son el **porcentaje en volumen** de fibras y el **aspecto (esbeltez)** de las mismas.

Otros factores que afectan a la resistencia a flexión del hormigón reforzado con fibras son la orientación de las fibras y la adherencia de las fibras a la matriz (mucho árido grueso disminuye la adherencia).

En cuanto a la Tipificación, el hormigón autocompactable (HAC) se ha denominado de diversas formas. En 1989, el profesor Ozawa, introdujo el término Self Compacting Concrete (SCC), en el Congreso de Ingeniería Estructural de Asia Oriental en Singapur, vocablo y siglas que se reconocen en la actualidad en todo el mundo. También es conocido como Self Levelling Concrete, Self Placing Concrete y Concreto autocompactado (CAC).

1.2 Los HRFA autocompactables.

1.2.1 El HRFA en estado fresco: peculiaridades, problemas.

Se define el Hormigón Autocompactante (HAC) como un hormigón muy fluido, que se compacta bajo su propio peso, capaz de rellenar todos los rincones del encofrado, pasando entre las armaduras, y presentando suficiente cohesión para evitar que se produzca la segregación del árido grueso o el sangrado. Así se consigue una puesta e obra fácil, pudiendo aplicarse en situaciones antes imposibles. Además que no necesita de vibrado en obra, reduciendo así la mala ejecución del mismo por parte de mano de obra poco cualificada para ello.

Para llenar un molde de forma homogénea, el hormigón autocompactante tiene que cumplir altas exigencias con respecto a la capacidad de llenado, pasando la capacidad y la resistencia a la segregación. Impulsado por su propio peso, el hormigón tiene que llenar un molde completamente dejando salir el aire atrapado, incluso en presencia de refuerzo denso de barra de acero. Los componentes tienen que ser homogéneamente distribuidos durante el flujo y en reposo.

Es necesario que el hormigón autocompactante tenga la capacidad de paso para poder garantizar una distribución homogénea de los componentes ante la proximidad de obstáculos. La distancia mínima de la barra para evitar el bloqueo depende de la fluidez del autocompactante, el tamaño máximo de los agregados, la pasta y el contenido distribución y la forma de los agregados.

Puede apreciarse una mayor resistencia a la penetración de agua en el HAC que en el tradicional. Este comportamiento se debe a su mayor compacidad y a su mayor densidad en el caso del HAC, lo que supone una mejora en la durabilidad reduciendo el agua transportada en su interior. Al tener menos agua transportada en el interior, tendrá mayor resistencia frente a las heladas, siendo este uno de los principales puntos que recoge la EHE como factor determinante en la durabilidad.

**Peculiaridades:*

El Hormigón Autocompactante reforzado con fibras de acero (HAC-RFA) contribuye a una mayor absorción de energía en comparación con el hormigón en masa. La Auto-compactación del hormigón reforzado con fibra combina las ventajas de los hormigones autocompactables en estado fresco y muestra un rendimiento mejorado en el estado endurecido en comparación con el hormigón convencional debido a la adición de las fibras.

Los Autocompactantes con fibras pueden mantener la auto-compactabilidad a pesar de la adición de las fibras.

La forma de las fibras difiere de la de los agregados; debido a la forma alargada de largo y / o una superficie superior de la trabajabilidad del hormigón que se ve afectada. El contenido de fibra práctica es limitada: una repentina disminución de la trabajabilidad se produce en un cierto contenido de fibra, que depende de la mezcla composición y el tipo de fibra aplicada.

Para ser eficaz en el estado endurecido se recomienda elegir las fibras no más cortas que el tamaño máximo del árido. Generalmente, la longitud de la fibra es de 2-4 veces la del tamaño máximo del árido. Se recomienda reducir al volumen de agregados gruesos un 10% en comparación con hormigón simple para facilitar el bombeo.

Un espacio entre barras de aproximadamente dos veces la longitud de la fibra se requiere para evitar el bloqueo de las mismas o la formación de nudos de fibras en el vertido de los autocompactantes con fibras.

**Problemas:*

Las fibras afectan a las características de los hormigones autocompactables en estado fresco: con disminuciones de flujo de asentamiento y el valor del rendimiento, la viscosidad plástica (la resistencia al flujo) y el espaciamiento de barras necesario para evitar el bloqueo de aumento en comparación con una referencia de autocompactante sin fibras.

El tamaño, la forma y el contenido de los agregados gruesos, así como la geometría y la fracción de volumen de fibras de acero afecta a la trabajabilidad del hormigón. El contenido de fibra es el máximo contenido de fibra crítico en el cual la capacidad de compactación disminuye drásticamente.

Otro de los problemas que aparecen en los autocompactantes es la segregación, que es la migración o separación de los componentes del hormigón una vez amasado. Las partículas que tienen una densidad relativamente alta o una baja relación superficie-volumen son más propensas a la segregación. La resistencia a la segregación de los autocompactables pueden ser diferentes bajo estáticos (en reposo) y dinámicas (durante el flujo) condiciones.

1.2.2 Papel del aditivo superplastificante y el filler.

El diseño de la mezcla de los HRF a menudo se basa en algunas reglas básicas: aumentar el contenido de la pasta, la dosificación de superplastificante y el contenido de los agregados finos aumentando la relación de aspecto y el volumen de la fibra.

El aditivo superplastificante es fundamental para buscar el hormigón autocompactante reforzado con fibras que deseamos en nuestra investigación puesto que los hormigones tratados con el aditivo superplastificante se caracterizan por su bajo contenido de agua, una fluidez elevada, así como una cohesión óptima y una gran facilidad de autocompactación.

Combina diferentes mecanismos de acción. La absorción en la superficie de los finos así como su mejor dispersión durante el proceso de hidratación producen los siguientes efectos:

-Pronunciada aptitud de autocompactación. Se utiliza en hormigones autocompactantes.
-Reducción muy importante de agua de amasado (altas resistencias y gran impermeabilidad).
-Altas resistencias iniciales.
-Disminución de la fluencia y retracción.
-La carbonatación es mucho más lenta.
-No contiene cloruros ni sustancias que puedan provocar o favorecer la corrosión del acero y por lo tanto puede utilizarse sin restricciones en hormigones armados o pretensados.

La importante reducción de agua unida a su elevada fluidez da lugar a hormigones de muy altas calidades con el empleo del aditivo superplastificante.

Normalmente el porcentaje de superplastificante que se añade a la mezcla es del 2%. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la mayoría de los superplastificantes disponibles en el comercio vienen disueltos en agua, por lo cual al añadirlo a la mezcla también se está añadiendo un porcentaje de agua. Añadir una cantidad excesiva de superplastificante puede dar lugar a que el hormigón presente segregación, lo cual no es aconsejable.

En cuanto al filler en los hormigones autocompactantes, presenta unas resistencias iniciales y finales muy importantes gracias a la compacidad que proporciona el filler en especial si es muy fino y es calizo, así como la optimización de todos los componentes del mismo. Esta compacidad no sólo mejora las características resistentes sino que influye positivamente en la durabilidad del hormigón.

De los diferentes materiales posibles el filler calizo, sería en una relación coste/efectividad el más adecuado para la fabricación industrial de los hormigones autocompactantes. Dicho filler nos demanda agua y si no dispusiéramos de potentes

superfluidificantes estos hormigones tendrían resistencias muy bajas al ser muy altas las relaciones A/C.

La enorme fluidez que nos producen los nuevos aditivos superplastificantes garantizan que todas las partículas del cemento se hidraten desde el primer momento, produciendo elevadas resistencias iniciales desde el principio.

Tenemos, pues, un hormigón de alta compacidad, muy fluido, lo que nos asegura la total hidratación desde un principio de los granos de cemento y con una relación A/C sensiblemente baja.

1.2.3 El HRFA autocompactable en estado fresco: ensayos (escurrimiento, normas, etc).

Para poder cuantificar el grado de fluidez de un HAC existen una serie de ensayos, como por ejemplo, el ensayo del cono en V, el ensayo de escurrimiento, el ensayo de la caja en L, el ensayo del anillo japonés y el ensayo de cono de Abrams invertido.

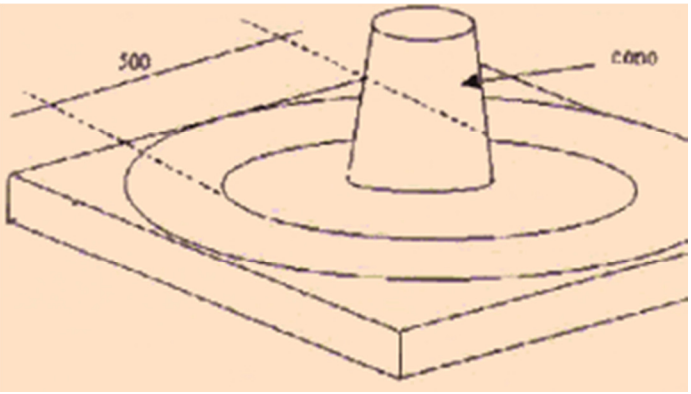
Nosotros usaremos solamente el ensayo de escurrimiento para analizar el hormigón autocompactable dosificado por nosotros según la Norma UNE 83361:2007, estimando posteriormente las correcciones oportunas para que cumpla con las características de un HAC.

<u>ENSAYO DE ESCURRIMIENTO</u>

Este test determina y cuantifica la fluidez de la masa y se relaciona también con la viscosidad de éste. El ensayo consiste en rellenar el cono de Abrams sin compactar ni picar, levantar el cono sobre una placa no absorbente húmeda (no encharcada) y controlar la expansión diametral de la masa y el tiempo de fluencia.

- Diámetro de la masa descargada = 60-70 cm
- Tiempo en el que la masa alcanza los 50 cm. =3-5 seg.

El hormigón debe fluir libremente sin indicios de exudación y formando una “torta” circular. Mediante la inspección visual de la mezcla extendida se puede observar la distribución del árido grueso y la tendencia a la segregación en el borde.



1.2.4 ¿Por qué HRFA autocompactable en este proyecto?

En nuestro proyecto usaremos el Hormigones Reforzados con Fibras de Acero autocompactable para mejorar la puesta en obra del mismo, con una consistencia fluida que se autocompacta por su propio peso dejando salir el aire atrapado y añadiendo las características de mejora que le proporcionan las fibras al hormigón en estado endurecido.

2) ESTADO DEL ARTE: ADHERENCIA DE ARMADURAS PASIVAS AL HORMIGÓN CON FIBRAS:

2.1 Definiciones, longitudes de anclaje, etc.

Según la EHE-08 nos define las longitudes de anclaje para armaduras pasivas y, dentro de este campo, las barras corrugadas como:

Art. 69.5.1 EHE-08 Anclaje de las armaduras pasivas

Las longitudes básicas de anclaje (lb) dependen de las propiedades de adherencia de las barras y del hormigón (calidad, posición de las barras, ...). Atendiendo a la posición que ocupa la barra en la pieza, se distinguen los siguientes casos:

· **Posición I (adherencia buena)**: armaduras que durante el hormigonado forman con la horizontal un ángulo entre 45º y 90º (soportes, muros,...) o que en el caso de formar un ángulo inferior a 45º, están situadas en la mitad inferior de la sección o a una distancia ≥ 300 mm de la cara superior de una capa de hormigonado *(zona inferior en vigas, losas,...).*

· **Posición II (adherencia deficiente)**, para las armaduras que durante el hormigonado, no se encuentran en ninguno de los casos anteriores *(zona superior de vigas, losas,...).*

La longitud neta de anclaje (definida en A) no podrá ser inferior al mayor de los tres valores siguientes:
· 10 ϕ
· 150 mm
· La tercera parte de la longitud básica de anclaje (definida en A) en barras traccionadas y los dos tercios de dicha longitud en barras comprimidas.

Art. 69.5.1.2 EHE-08 Anclaje de barras corrugadas
A) Longitud del anclaje en las barras corrugadas

La longitud básica de anclaje lb es la necesaria para anclar una fuerza As fyd de una barra suponiendo una tensión de adherencia constante. Dicha longitud depende, entre otros factores, del diámetro de la barra ϕ y de la calidad del hormigón y del acero, a través de la tensión de adherencia τ bd, y del límite elástico del acero fyd:

$$lb = (\phi\ fyd) / (4\ \tau\ bd)$$

2.2 Etapas en la movilización de la adherencia armadura-hormigón.

El enlace entre acero y hormigón es el fenómeno multifacético que permite que las fuerzas longitudinales desde el refuerzo se transfieran al hormigón que rodea en una estructura. Debido a esta transferencia de fuerza, la fuerza en unos cambios de barras de refuerzo a lo largo de su longitud, también hace la fuerza en el empotramiento de hormigón. Donde quiera que las

cepas de acero difieren de las cepas de hormigón, se produce un desplazamiento relativo entre el acero y el hormigón (deslizamiento), pero esta falta de cumplimiento es también el efecto de las cepas altamente localizadas en la capa de hormigón más cercana a la armadura (interfaz).

Los mecanismos resistentes en que se basa la unión de acero para hormigón son ya bien conocidos, debido a que muchos de los resultados de la prueba han sido recogidos y analizados en los últimos treinta años, recurriendo a una variedad de muestras y técnicas.

Los científicos que han contribuido al conocimiento de los muchos aspectos de la unión de acuerdo en que la interacción entre el hormigón y una barra sometida a una fuerza de tracción de salida se caracteriza por cuatro etapas diferentes:

Etapa 1: Hormigón sin fisuras.

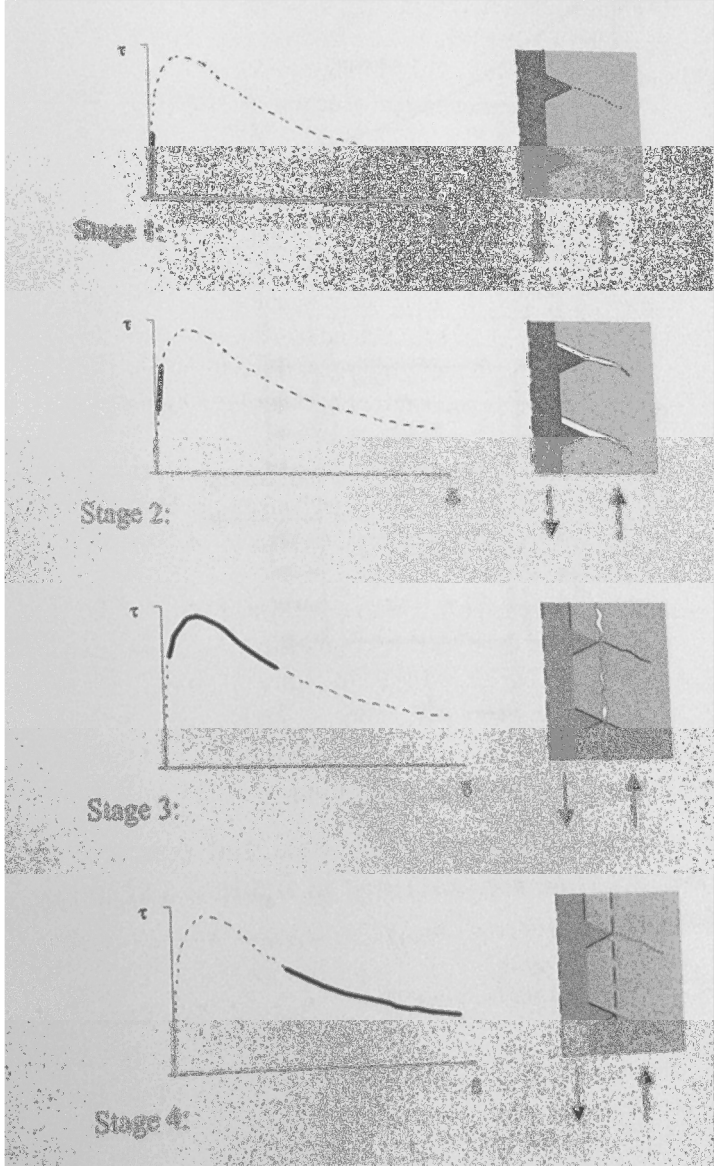
Baja tensión de adherencia, los valores de eficiencia de enlace están garantizados sobre todo por la adhesión química, y no se produce deslizamiento en la barra. La adhesión química también es acompañada por la interacción micromecánica asociada con la superficie de acero en bruto al microscopio. Nótese que el desplazamiento relativo de la barra siempre se mide con referencia al hormigón no perturbado y consta de dos partes, el deslizamiento relativo en la interfase y las deformaciones de cizallamiento en el hormigón, por lo tanto, incluso si hay deslizamiento de la barra, un cierto desplazamiento se produce debido a las cepas localizadas cerca de la interfaz.

Se desarrollan grietas sin abrir en las costillas transversales a la barra de refuerzo debido al desplazamiento relativo. Esta etapa significa el paso de la adhesión a la cizalla en el hormigón sin fisuras.

Etapa 2: Primera Fisura.

Para valores más altos de los enlaces de estrés, la adhesión química se rompe. Debido a un aumento de los desplazamientos relativos de la barra, las grietas transversales se abren, y las teclas de hormigón entre las costillas del acero son de flexión. Pero la acción de cuña de los terminales sigue siendo limitada y no hay separación de hormigón.

Imagen sobre las Etapas de Adherencia hormigón-acero:



Etapa 3: Después de la primera fisura.

Para una tensión de adherencia aún mayor, las grietas longitudinales (grietas de división) se extienden radialmente, debido a la acción de cuña que se ve reforzada por el hormigón triturado pegado a la parte frontal de las corrugas. El componente externo de la presión es resistido por el aro del hormigón circundante: como consecuencia, el hormigón que rodea ejerce una acción confinamiento en la barra, y una fuerza de unión y la rigidez están aseguradas en su mayoría por el enclavamiento entre el refuerzo, los puntales de hormigón que irradia de la barra y el anillo exterior en buen estado.

Además de las grietas transversales secundarias, aparecen grietas longitudinales que se desarrollan paralelas al acero de refuerzo. Estas grietas son las que provocan la rotura por splitting o estallido cuando el recubrimiento de la barra es pequeño, pero a medida que lo aumentamos el recubrimiento, vamos reduciendo el riesgo de rotura por splitting del hormigón.

Sin embargo, en los anclajes relativamente largos con confinamiento moderado un fallo de tracción por lo general se produce incluso después a través de la escisión, debido a la presencia simultánea de diferentes etapas a lo largo de la longitud entre sí.

En el caso de un gran refuerzo transversal o un largo recubrimiento de hormigón, el splitting es impedido a través de la acción de confinamiento, y la división de hormigón queda limitada a un núcleo agrietado alrededor de la barra.

Etapa 4: Hasta la última carga.

En barras lisas esta etapa es inmediatamente posterior a la rotura de unión adhesiva, la transferencia de la fuerza es proporcionada por la fricción y se ve muy afectada por la presión transversal, la retracción del hormigón y la fricción con la barra de rugosidad a favor, mientras que la guerra de interfaz a lo largo del plano de deslizamiento reduce los esfuerzos de compresión radial, y en el extremo de la tensión de adherencia se reduce también.

En el caso de barras corrugadas confinadas por pequeña o media armadura transversal, las grietas longitudinales (grietas de división) rompen a través de todo el recubrimiento y la separación de las barras, y la relación tiende a fallar repentinamente. Por otro lado, una cantidad suficiente de refuerzo transversal puede asegurar la eficiencia de la unión a pesar de la escisión de hormigón, debido a la acción desarrollada por el confinamiento de refuerzo.

En el caso de barras corrugadas confinadas con una gran armadura transversal, el splitting no se produce y la falta de enlace es causada por la barra traccionada.

2.3 Modos de fallo: arrancamiento, estallido (splitting).

Los fallos que se desencadenan por una falta de adherencia dependen principalmente del tipo de barra y de las condiciones de confinamiento. Pueden ser por *pull – out*, que consiste en el deslizamiento de la armadura respecto al hormigón, o por *splitting*, en el que se fisura longitudinalmente el recubrimiento según la dirección de la armadura.

Debido a que la dirección de estas fisuras coincide con la del refuerzo, exponen la armadura en toda su longitud y pueden resultar peligrosas. Factores como la separación lateral entre barras, la presión transversal, la cuantía de armadura transversal, etc., condicionan el tipo de fallo de adherencia, en estructuras de hormigón armado con barras corrugadas el fallo de adherencia más común es el asociado a la fisuración longitudinal del recubrimiento. El *splitting* ha sido analizado por numerosos investigadores en los últimos años, sobre todo en anclajes y

donde es de especial importancia, ya que un fallo de este tipo podría desencadenar una rotura imprevista.

**Fallo por Estallido (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.

** Fallo por 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 y,
- 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.

Mientras que la rama ascendente del diagrama de adherencia ha sido ampliamente analizada, no ocurre lo mismo para la rama descendente debido principalmente a la gran cantidad de factores que influyen en ella.

2.4 Distintos tipos de ensayos de adherencia, y el ensayo de arrancamiento Pull-Out Test.

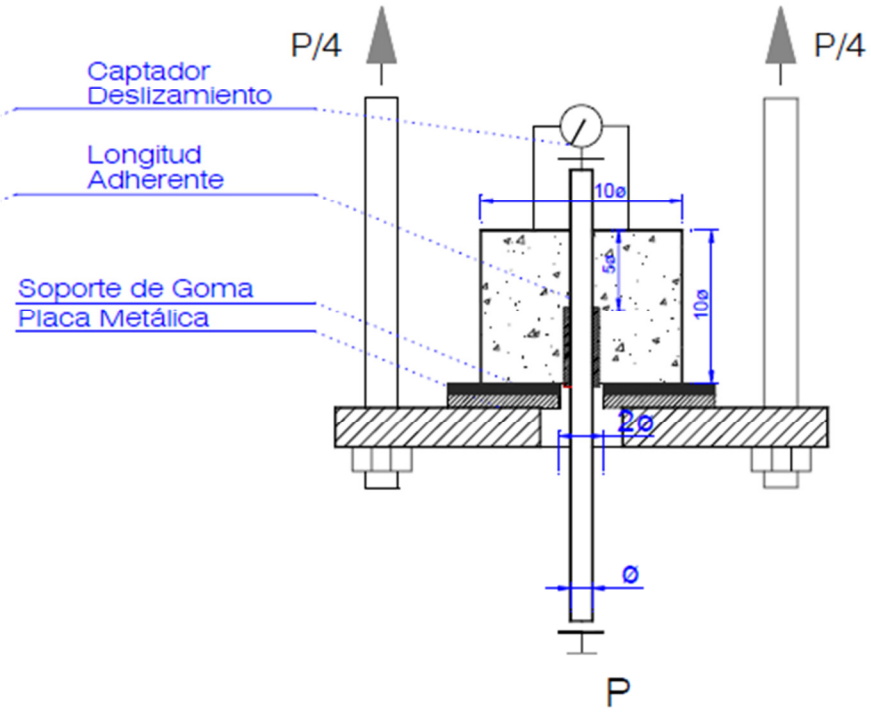
Para caracterizar el fenómeno de la adherencia se emplean curvas tensión de adherencia local – deslizamiento que se obtienen de ensayos normalizados *pull – out* o *beam test*, en las que se pueden apreciar los diferentes mecanismos resistentes que intervienen en el fenómeno de la adherencia: adhesión química, rozamiento e interacción mecánica; dependiendo la importancia de cada uno de ellos de las características superficiales de la armadura. Para barras corrugadas depende de la interacción mecánica existente entre las corrugas y el hormigón que las rodea.

** Ensayo Pull-Out:*

Este ensayo mide la fuerza necesaria que se aplica para romper la adherencia de una barra embebida en una probeta de hormigón. De este ensayo se obtienen los diagramas tipo que relacionan la tensión de adherencia local y el desplazamiento de la barra en el extremo opuesto

al que se aplica la carga respecto a la superficie de la probeta de hormigón *(extremo pasivo).* Para medir la deformación del acero se puede emplear *strain gauges* situados en la superficie de la barra cuyo número y distribución dependerá de la intención de la medida.

Los ensayos con "longitudes adherentes cortas" se refieren a aquéllos en los que la relación entre la longitud adherente y el diámetro (l/φ) es □ 5. Dentro de estos ensayos se consideran dos tipos: los que carecen de compresión transversal y se produce generalmente el deslizamiento de la barra y los que tienen algún tipo de confinamiento como cercos, espirales, anillos, etc. en los que se produce el fallo junto con la fisuración del recubrimiento. En ambos casos únicamente hay adherencia hormigón – acero en una zona de la barra, colocando en el resto unos protectores de plástico tipo "manguitos" que impiden la interacción entre los dos materiales.



2.5 Factores que influyen sobre la adherencia.

La complejidad del fenómeno de la adherencia entre el hormigón y el acero se debe a que son muchos los factores y parámetros que intervienen, tanto de carácter físico como químico. Además de los relacionados con las características de la barra hay que tener en cuenta otros aspectos tales como las propiedades del hormigón, el recubrimiento, la posición de las barras respecto a la dirección de hormigonado, el confinamiento, la historia de carga, etc.

Entre las principales causas que pueden originar, bien la degradación de la adherencia hormigón – acero o bien la aparición de fisuras paralelas a la armadura desencadenantes de un fallo de adherencia se pueden mencionar los errores de proyecto, los fallos de ejecución que

generan una mala compacidad del hormigón, longitudes de anclaje y solape insuficientes, recubrimientos escasos, etc., el deterioro de los materiales constitutivos, hormigón y acero, la agresividad medioambiental, y un nulo o insuficiente conntrol y mantenimiento, que podría evitar en muchos de los casos el deterioro de las estructuras.

2.6 Efectos que tienen las fibras sobre la adherencia.

Los materiales compuestos con matriz de cemento se comportan de manera muy diferente a como lo hacen los compuestos de matriz orgánica. Las fibras en los materiales de matriz orgánica tienen una menor deformación en la fractura y se comportan como lugares de iniciación del fallo mientras la matriz se deforma plásticamente y permanece dúctil.

En los hormigones reforzados con fibras el comportamiento de la interfase entre la fibra y la matriz tiene una gran importancia en el comportamiento mecánico final del material compuesto. Puesto que las fibras se introducen, principalmente, para mejorar la tenacidad y resistencia de las matrices frágiles, la capacidad de las fibras de interaccionar con el mecanismo que gobierna la ductilidad es importante. El aumento de la tenacidad es el resultado de la operación de varios mecanismos de absorción de energía, controlados por la resistencia de la interfase entre la fibra y la matriz. La rotura de la interfase, el desvío de las grietas y la extracción de las fibras contribuyen a aumentar la tenacidad y dependen, básicamente, de una débil adhesión en la interfase entre las fibras y la matriz.

También influye el tipo y la geometría de la fibra en la adherencia. Una fibra recta ofrece una menor resistencia a la extracción que cuando ésta tiene los extremos conformados, pues se realiza un anclaje mecánico en las terminaciones, además de la adherencia superficial. Una vez superada la carga máxima el comportamiento es similar puesto que la adherencia se debe, exclusivamente, a las fuerzas de rozamiento. La tenacidad aumenta considerablemente empleando fibras onduladas o de extremos conformados en lugar de fibras rectas. La diferencia entre una fibra de acero y otra de nylon se pone de manifiesto por la menor adherencia superficial de la fibra de nylon y la alta deformabilidad de la misma, lo que provoca que la separación de las fibras se produzca inmediatamente.

3) OBJETIVOS Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL:

OBJETIVOS

-Dosificación y ajuste, a partir de una dosificación de referencia, de hormigones autocompactables con distintos contenidos y tipos de fibras de acero.

-Análisis del efecto del diámetro de la armadura y el recubrimiento sobre la adherencia.

-Análisis del efecto del contenido y geometría de las fibras de acero sobre la adherencia.

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Nuestra labor experimental consistirá en primer lugar partir de una dosificación, la cual iremos ajustando en el laboratorio para los distintos tipos de fibras, buscando un hormigón autocompactable. De cada amasada tomaremos muestras de probetas cilíndricas además de realizar los oportunos ensayos de escurrimiento e inspecciones visuales para ajustar al máximo la dosificación.

Una vez tengamos las dosificaciones ajustadas para las distintas cantidades y tipos de fibras que usaremos, procederemos a la fabricación de los moldes de los pull-outs. Tendremos que preparar unas tapas de madera para colocar las distintas barras a la medida oportuna para tener el recubrimiento deseado en la probeta. También estaremos muy atentos a las medidas correctas de los moldes y usaremos manguitos en la zona comprimida de la barra durante el ensayo posterior de pull-out.

Por último, una vez hayamos dejado las probetas que se curen durante 28 días, procederemos al ensayo de arrancamiento de la barra del cual obtendremos una curva y unos datos de áreas que explicaremos en el apartado 5) Análisis de resultados.

4) ESTUDIO EXPERIMENTAL:

Nuestro estudio experimental realizado en los laboratorios de materiales y de hormigón del Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil, en la Escuela de Caminos, Canales y Puertos de la UPV, se divide en dos etapas experimentales.

En la 1ª Etapa, haremos un estudio de las dosificaciones a emplear para las amasadas con distintos tipos de fibras, ajustando el Filler y el Aditivo, buscando un hormigón autocompactante. Para cada dosificación, tomaremos de muestra varias probetas cilíndricas para después de 28 días ensayarlas a compresión, y así comprobar que se ajusta nuestro hormigón a lo que buscamos y no está por debajo de lo establecido por la EHE-08. Esas dosificaciones ajustadas serán las que usaremos en la siguiente etapa.

La 2ª Etapa consistirá en la elaboración de 27 probetas Pull-out con el hormigón obtenido en la etapa anterior. Como ya hemos dicho, autocompactante, para garantizar una buena colocación y compactación en obra evitando el vibrado del mismo en las probetas, puesto que podría provocar una orientación de las fibras e interferir en el efecto de éstas sobre los resultados de los ensayos de adherencia.

1ª ETAPA:

Para ajustar correctamente la dosificación de partida para los distintos tipos y cantidades de fibras tomaremos el aditivo y el filler como variables a modificar. Buscaremos con el aditivo proporcionar una mayor trabajabilidad al hormigón, puesto que queremos hacer un hormigón autocompactante. Con el filler daremos consistencia a la pasta para así minimizar el riesgo de segregación. Al modificar el aditivo y el filler no afectamos ni a la estructura granular de arena y grava, ni a la relación de agua/cemento de la pasta, pudiendo así tener distintos niveles de aditivo y filler en cada amasada según las fibras a utilizar sin que se vea afectada su resistencia. También estaremos pendientes de la humedad de los áridos tomando muestras el día anterior a las amasadas previstas a realizar y corrigiendo la cantidad del agua a emplear. El hormigón con o sin las fibras será siempre el mismo en todos los casos a nivel de capacidad resistente, adherencia, etc.

Posteriormente seguiremos haciendo pruebas con dicho hormigón añadiéndole los distintos tipos de fibras de acero que emplearemos y ajustando las cantidades de aditivo y filler para tener una consistencia muy fluida, para que siga siendo un hormigón autocompactante.

Los **factores** que modificaremos en la 2ª Etapa de nuestro programa experimental de pull-outs serán: el tipo de fibras, la cantidad de fibras, el diámetro de las barras de acero que usaremos en los Pull-Out y por último, la relación recubrimiento/diámetro “C/D”. Los tipos de fibras de acero que emplearemos serán las 45/50, 80/50 y 80/35. A parte de estos tipos de fibras, también las estudiaremos para distintas cantidades en el hormigón. Para cada tipo de

fibras haremos hormigones sin fibras, con 40 Kg/m3 y con 60 Kg/m3. Otro de los factores serán los diámetros de las barras de acero a usar, que serán Ø 8, 12 y 16 mm.

A continuación definimos el hormigón que buscamos para nuestros posteriores ensayos de adherencia:

- Tipo de cemento CEM II/B-M 42'5R.
- Relación de Agua/Cem.= 0'60.
- Cantidad de Cemento 325 kg/m3.
- Relación de Grava/Arena = 0'90.
- Tamaño de la Arena Machacada de 0 a 4 mm.
- Tamaño de la Grava Machacada de 7 a 12 mm.
- Tamaño Máximo del Árido = 12 mm.

Como se puede observar la Relación arena/grava es próxima a 1 porque así tenemos mayor cohesión de la mezcla y disminuimos el riesgo de segregación. Los áridos empleados son machacados porque tienen más finos que los rodados y eso favorece la cohesión de la pasta, por tanto, también reduce el riesgo de segregación. El tamaño máximo de los áridos no supera los 20 mm como nos recomienda la EHE-08 para los hormigones autocompactantes en el Anejo 17.

También cabe nombrar que decidimos trabajar con una resistencia característica de 25 MPa porque buscamos un hormigón convencional de resistencia media-baja, que es el mínimo que nos marca la norma EHE-08 para edificación. Por eso tenemos esa cantidad de cemento y esa relación Agua/Cemento, buscando esa resistencia característica baja.

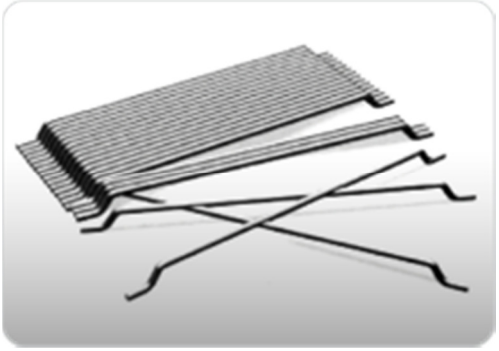
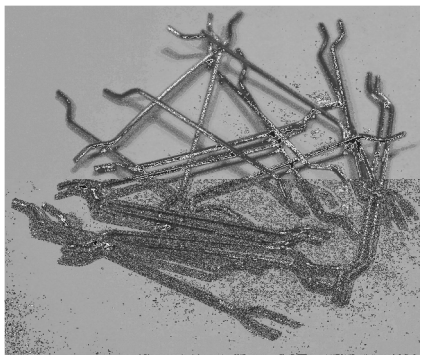
Antes de comenzar con las dosificaciones del hormigón, hablaremos sobre los **materiales y herramientas empleados en laboratorio**. Como por ejemplo el Aditivo superplastificante que hemos usado de la empresa SIKA como observamos en la siguiente imagen:

Este adivitivo como ya hemos comentado al principio de este punto, nos proporciona una mayor trabajabilidad en el hormigón en su puesta en obra, reduciendo el agua a emplear para poder hacer un hormigón autocompactante. Vemos a continuación algunas especificaciones técnicas del etiquetado de dicho aditivo:

El cemento CEM II/B-M 42’5 R. Y también el filler calizo empleado, como el de la imagen derecha que tenemos a continuación, que lo usamos para dar mayor consistencia a la pasta evitando que se produzca la segregación de la misma:

La arena y grava machacadas:

Fibras de acero:

A continuación mostraremos las herramientas que empleábamos en el laboratorio para poder elaborar nuestro hormigón. Por ejemplo las dos básculas de pesaje, siempre previo tarado del capazo o vasos empleados para los áridos, fibras o aditivo:

La amasadora y los moldes de acero para las probetas cilíndricas:

El cono de Abrams para realizar las pruebas de escurrimiento:

La cámara húmeda donde guardamos las probetas para que se curen durante 28 días para después ensayarlas, las probetas están a una humedad del 100% y temperatura constante de 20ºC. Y la máquina para el refrentado con azufre líquido de las probetas cilíndricas, así conseguimos que tengan una superficie completamente lisa las dos caras de la probeta:

La máquina para realizar los ensayos a compresión de probetas curadas a 28 días:

Por último, la máquina empleada para ensayar las probetas de pull-out:

Una vez visto el hormigón que buscamos, también los materiales y herramientas del laboratorio que usaremos, ahora detallaremos la **Dosificación inicial** de nuestro hormigón. De esta dosificación partiremos para realizar las pruebas necesarias buscando el hormigón anteriormente definido, con la característica de ser autocompactante incluso con la adición de los distintos tipos de fibras que emplearemos en las probetas de pull-out. El método usado para calcular la dosificación es el método de Bolomey puesto que usamos áridos machacados y no rodados como en el método de Fuller.

Cemento 42'5R	325 KG/m3
Agua Total*	195 KG/m3
Arena (machacada)	1050 KG/m3
Grava (machacada 7/12)	835 KG/m3
Fibras de Acero	0, 40 ó 60 KG/m3
Aditivo (0'4% s/c)	*1'33KG/m3*
Filler	*36'7 KG/m3*

(*). En cada caso haremos correcciones por humedad y absorción, por tanto, al Agua a añadir en cada amasada le descontaremos el aporte por la humedad de los áridos y le añadiremos el agua que, por absorción, será sustraída por los áridos.

Hemos diferenciado el Filler y el Aditivo de los demás componentes porque son los componentes que variaremos para obtener la dosificación que deseamos con cada tipo y cantidad de fibras empleadas para los ensayos posteriores.

Para comenzar a realizar las distintas pruebas, calculamos dicha dosificación para realizar una amasada de 20 litros de hormigón, suficiente para hacer 2 probetas cilíndricas por amasada de diámetro Ø15cm. y 30cm. de altura. Una vez calculada procedemos a realizar la amasada de hormigón, esta primera amasada no tiene fibras puesto que queremos ajustar primero las cantidades mínimas que se precisan de Aditivo y Filler necesario para que la consistencia sea la de un hormigón autocompactante sin fibras.

Dosificación inicial para realizar una amasada de **20 litros** de hormigón sin fibras:

Cemento 42'5R	6.5 KG
Agua Total*	3.9 KG
Arena (machacada)	21 KG
Grava (machacada 7/12)	16.7 KG
Aditivo (0'4% s/c)	*0.026 KG*
Filler	*0.74 KG*

Antes de comenzar a hacer pruebas con las dosificaciones variando el Filler y el Aditivo, explicaremos la matriz de **combinaciones a ensayar** que tendremos en cuenta en nuestro estudio de los 27 pull-outs. Esta matriz consta de 9 combinaciones seleccionadas con criterio estadístico, de cada una de los cuales haremos 3 probetas pull-out en cada caso, como vemos en cada caso tenemos un contenido de fibras, tipo de fibra o recubrimiento distintos. Estos 9 casos con 3 probetas cada uno, nos sirven para obtener los resultados necesarios para poder elaborar un estudio sobre la adherencia de las armaduras pasivas en el hormigón. Así también podremos saber qué dosificación estamos haciendo para cada tipo de pull-out, puesto que algunos tienen más cantidad de fibras como vemos en la siguiente tabla:

ID PULL-OUTS	Tipo Fibra Acero	Contenido Fibra	Diámetro Barra	Recubrimiento
L 1	80/50	0 KG/M3	8mm	C/D_1=20 mm
L 2	80/50	40 KG/M3	12mm	C/D_2=42 mm
L 3	80/50	60 KG/M3	16mm	C/D_3=80 mm
L 4	80/35	60 KG/M3	12mm	C/D_1=30 mm
L 5	45/50	40 KG/M3	16mm	C/D_1=40 mm
L 6	45/50	60 KG/M3	8mm	C/D_2=28 mm
L 7	80/35	0 KG/M3	16mm	C/D_2=56 mm
L 8	80/35	40 KG/M3	8mm	C/D_3=40 mm
L 9	45/50	0 KG/M3	12mm	C/D_3=60 mm

Ahora que ya sabemos los tipos de pull-outs a los que tenemos que sacar las dosificaciones, empezaremos con los que no tienen fibras “L1, L7 y L9” a partir de la dosificación inicial anterior.

Para las **correcciones por humedad** de la arena en el Agua Total, tomamos por ejemplo una muestra el día anterior a la realización de la amasada de Peso inicial 1’5 kg de arena en una bandeja que después meteremos 24 horas en un horno para secar completamente los áridos. Al día siguiente volvemos a pesar la arena seca o Peso Seco. La fórmula de la humedad (W) en porcentaje es:

$$W(\%) = \frac{Contenido\ de\ Agua}{Peso\ Seco} \cdot 100 = \frac{Peso\ inicial - Peso\ Seco}{Peso\ Seco} \cdot 100$$

El porcentaje que nos dé, por ejemplo un 1% de la arena (1050 Kg/m3) serán aproximadamente 11 Kg de agua en la arena que debemos restar al Agua Total que tenemos, para así obtener el agua necesaria para no pasarnos de la relación A/C = 0’6 con ese grado de humedad en los áridos.

L1, L7 y L9 Sin fibras:

Una vez preparados todos los componentes correctamente pesados de la dosificación inicial, añadimos en la amasadora solamente los áridos para que se mezclen bien un par de minutos para después añadir poco a poco el agua. Una vez vertida toda el agua, esperamos unos 4 minutos amasando toda la mezcla para verter el aditivo poco a poco y esperar hasta completar unos 10 minutos de amasado aproximadamente. Cuando tengamos que añadir fibras, las añadiremos al hormigón poco a poco después de verter el aditivo y amasaremos un poco más de 10 minutos. Una vez amasado el hormigón, realizamos el ensayo de escurrimiento (ensayos de escurrimiento según UNE 83.361) del mismo sobre una plataforma en la cual colocamos el cono de Abrams en el centro de la misma, y una vez relleno el cono de hormigón, lo levantamos para ver cómo se escurre y se reparte sobre la plataforma para comprobar si la consistencia del mismo es la deseada. Véanse las siguientes fotos del proceso:

Para buscar la dosificación correcta sin fibras, realizamos 2 amasadas. En la primera prueba con la dosificación inicial el resultado no fue el esperado puesto que nos salió un hormigón poco compactable con una consistencia mayor a la esperada, quedándose lejos de la Fluida que buscamos nosotros sin llegar a la segregación. Utilizamos todo el Filler de la dosificación inicial y un 0'8% s/c de aditivo.

En la segunda prueba, decidimos reducir el Filler una tercera parte del inicial y aumentar el Aditivo hasta 1% s/c. Cabe recordar que el Aditivo tiene un "punto de saturación" que suele situarse en torno al 1'5% ó 2% s/c del cual no pasaremos en nuestra dosificación. Además, nuestra dosificación ya lleva bastante agua, por eso debemos ajustar bien la cantidad de aditivo sin excedernos para evitar el riesgo de segregación en la amasada de hormigón. Por tanto la dosificación final para los casos de pull-out sin fibras será la siguiente:

L1, L7 y L9:

	KG Para amasar 20 litros		KG/M3
Cem 42'5R	6,5		325
Agua Total	3,9	(corregir por humedad)	195
Arena (machacada)	21		1050
Grava (machacada 7/12)	16,7		835
Filler	0,5	(2/3 del inicial)	25
Aditivo	0,065	(1% s/c)	3,25
Fibras	0		0

<u>L2 Con fibras (80/50) "40 Kg/m3"</u>:

Ahora comenzamos a dosificar con fibras, debemos tener en cuenta que las fibras disminuyen la trabajabilidad, por lo tanto nos tocará seguramente aumentar el aditivo. Volveremos a tomar la dosificación inicial y corregiremos también el Agua total con la humedad de los áridos. En este caso también realizamos dos pruebas, tomamos de referencia la dosificación anterior para el caso de sin fibras pero tuvimos finalmente que aumentar el aditivo a 1'1% s/c, por el tema que comentábamos anteriormente de la trabajabilidad con las fibras.

L2:

	KG Para amasar 20 litros		KG/M3
Cem 42'5R	6,5		325
Agua Total	3,9	(corregir por humedad)	195
Arena (machacada)	21		1050
Grava (machacada 7/12)	16,7		835
Filler	0,5	(2/3 del inicial)	25
Aditivo	0,072	(1'1% s/c)	3,6
Fibras (80/50)	0,8		40

L5 Con fibras (45/50) "40 Kg/m3":

Al igual que antes, también corregiremos el Agua total por humedad de los áridos y tomaremos la dosificación anterior para guiarnos, puesto que no variará mucho de un tipo de fibras a otro. Después de hacer dos pruebas, nos vemos obligados a aumentar el aditivo hasta un 1'2% s/c para obtener la dosificación adecuada para este tipo de probetas con fibras. Por tanto la dosificación final será:

L5:

	KG Para amasar 20 litros		KG/M3
Cem 42'5R	6,5		325
Agua Total	3,9	(corregir por humedad)	195
Arena (machacada)	21		1050
Grava (machacada 7/12)	16,7		835
Filler	0,5	(2/3 del inicial)	25
Aditivo	0,078	(1'2% s/c)	3,9
Fibras (45/50)	0,8		40

L8 Con fibras (80/35) "40 Kg/m3":

Volvemos a repetir el proceso anterior, tomamos de referencia la primera dosificación con fibras y corregimos el Agua total por humedad. En la primera prueba tomamos un 1'1% s/c de aditivo, aumentamos luego a 1'2% y finalmente volvemos a aumentar a 1'3% donde observamos que se produce la segregación de los elementos del hormigón como observamos en la siguiente imagen:

Se aprecia como en el centro se concentra la mayoría de la grava con las fibras, y luego como se reparte o separa más la lechada de cemento, arena, agua y aditivo con respecto de la grava más pequeña quedando una masa totalmente segregada. Por tanto nos quedamos con un porcentaje del 1'2% s/c de aditivo para este caso. Dosificación final:

L8:

	KG Para amasar 20 litros		KG/M3
Cem 42'5R	6,5		325
Agua Total	3,9	(corregir por humedad)	195
Arena (machacada)	21		1050
Grava (machacada 7/12)	16,7		835
Filler	0,5	(2/3 del inicial)	25
Aditivo	0,078	(1'2% s/c)	3,9
Fibras (80/35)	0,8		40

<u>L4 Con fibras (80/35) "60 Kg/m3"</u>:

A partir de ahora comenzamos con mayor cantidad de fibras por m3 de hormigón, pasamos de 40Kg a 60Kg. Volvemos a repetir el proceso de la corrección del Agua total por humedad y tomamos de referencia la dosificación anterior, partiremos de un 1'2% s/c de aditivo. Después de realizar varias pruebas, tenemos que aumentar el aditivo a 1'3% y también para evitar la segregación al tener más fibras, aumentamos el filler en 0'1 Kg para 20 litros de hormigón. Por tanto la dosificación nos queda así:

L4:

	KG Para amasar 20 litros		KG/M3
Cem 42'5R	6,5		325
Agua Total	3,9	(corregir por humedad)	195
Arena (machacada)	21		1050
Grava (machacada 7/12)	16,7		835
Filler	0,6	(2/3 inicial + 100gr)	30
Aditivo	0,084	(1'3% s/c)	4,2
Fibras (80/35)	1,2		60

L6 Con fibras (45/50) "60 Kg/m3":

Después de corregir por humedad, tomamos de referencia la dosificación anterior de fibras para 60Kg/m3. Para no excedernos con el Aditivo, empezamos la prueba con 1'2% s/c, con el resultado de que está a punto de segregar el hormigón. Decidimos aumentar el Filler en 0'1 Kg más para 20 litros de hormigón y obtenemos el hormigón esperado. La dosificación final es la siguiente:

L6:

	KG Para amasar 20 litros		KG/M3
Cem 42'5R	6,5		325
Agua Total	3,9	(corregir por humedad)	195
Arena (machacada)	21		1050
Grava (machacada 7/12)	16,7		835
Filler	0,7	(2/3 inicial + 200gr)	35
Aditivo	0,078	(1'2% s/c)	3,9
Fibras (45/50)	1,2		60

L3 Con fibras (85/50) "60 Kg/m3":

Para finalizar con las dosificaciones de los pull-outs, repetimos el proceso de corrección por humedad. Volvemos a tomar la dosificación anterior, pero como para este tipo de fibras hay más número de fibras puesto que pesan menos, comenzaremos probando con un 1'3% de aditivo s/c. Después de realizar esta prueba, observamos que necesitamos más aditivo 1'4% para que la consistencia sea más fluida pero para evitar la segregación también aumentamos el filler 0'15 Kg más. Con estas modificaciones, la dosificación final queda de este modo:

	KG Para amasar 20 litros		KG/M3
Cem 42'5R	6,5		325
Agua Total	3,9		195
Arena (machacada)	21		1050
Grava (machacada 7/12)	16,7		835
Filler	0,85	** (0,74 el inicial)	42,5
Aditivo	0,091	(1'4% s/c)	4,55
Fibras	1,2		60

** Nos tocó aumentar el filler con respecto a la dosificación inicial para evitar la segregación de la pasta.

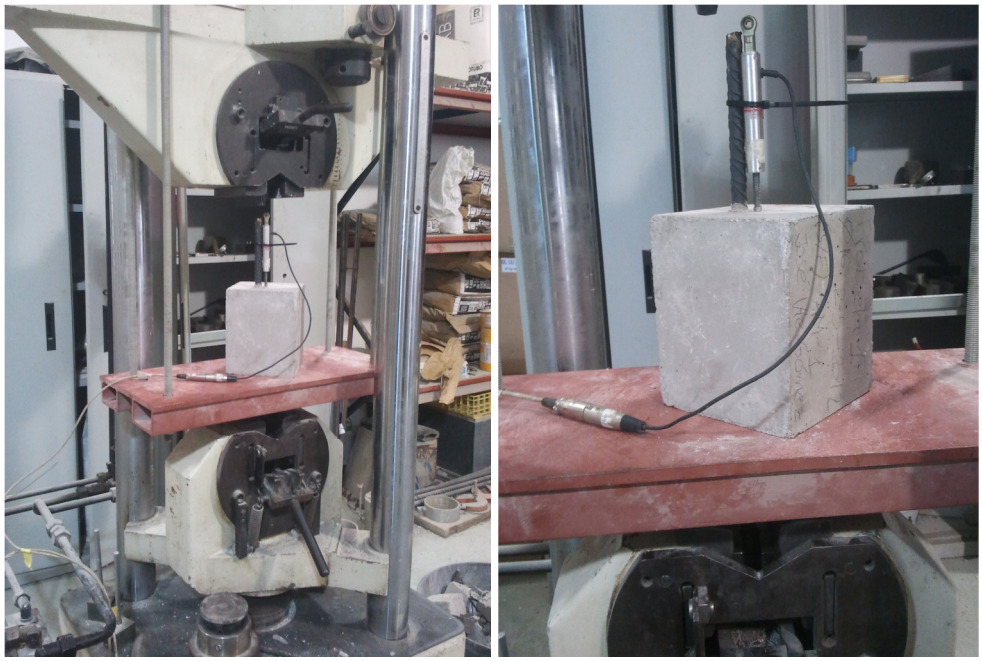
Ahora que ya tenemos todas las dosificaciones para los distintos tipos de pull-outs, tenemos que esperar a que se curen durante 28 días las probetas de cada amasada en la cámara húmeda del laboratorio. Después de ensayarlas a compresión (ver tabla de resultados de probetas comprimidas al final del Anejo 2, *página 117*), y comprobar que nuestro hormigón es superior a los 25 Mpa que nos exige como mínimo la EHE-08 en edificación, podemos pasar a la 2ª Etapa de nuestro estudio experimental.

- **2ª ETAPA:**

En esta segunda etapa, nos dedicaremos a elaborar los pull-outs que posteriormente ensayaremos, y analizaremos los datos obtenidos como nos explica el Anejo 1 "Líneas básicas del diseño y análisis de experimentos" de Pedro Serna y Emilio García Taengua. Para ello, debemos antes preparar los moldes, mediante unas chapas de madera para colocar correctamente las barras de acero según el recubrimiento de hormigón que deban tener en cada caso. Nuestros pull-outs tendrán unas medidas de 15x15x20cm (ancho x alto x longitud) como se ve en estas imágenes:

Cabe destacar que en el ensayo de tracción de los pull-outs, hay una zona de la barra de acero que se ve comprimida, es la zona donde se apoya la probeta sobre una bandeja fija y se tracciona la barra hacia abajo. Como no queremos que la barra trabaje a compresión, sino únicamente a tracción en el hormigón, en dicha zona de compresión de la probeta colocaremos un manguito alrededor de la barra de acero para que no esté en contacto con el hormigón. Por ejemplo en la siguiente imagen que tenemos una probeta que ha roto por splitting y se ve perfectamente la zona del manguito, que es la zona inferior de la probeta donde por la tracción de la barra y la base donde apoya el hormigón se ve comprimida por ambas fuerzas:

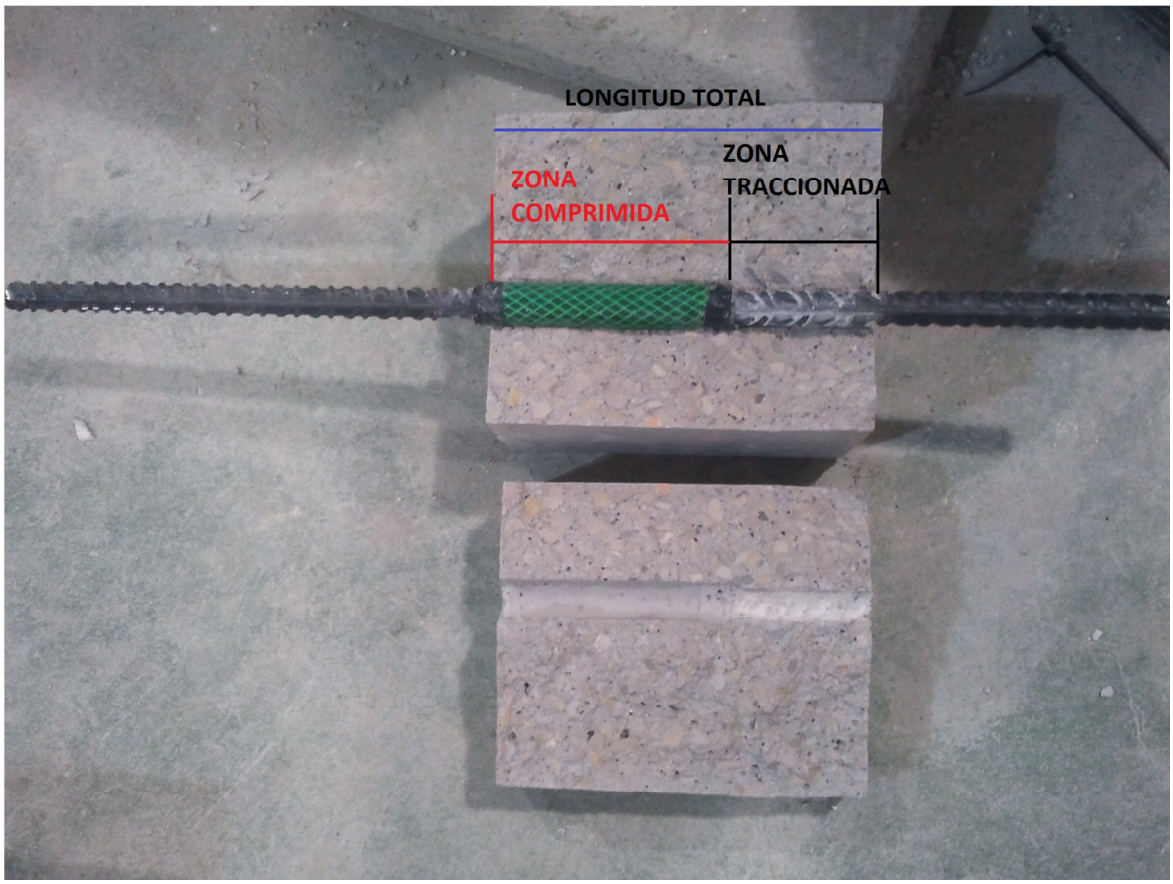
En estas imágenes se aprecia mejor la plataforma donde apoya el pull-out y la abrazadera que tiene abajo para sujetar bien la barra para traccionarla:



A continuación veremos en una tabla las longitudes de tracción que tienen que tener las barras en los pull-outs según su diámetro y de cuánta longitud tiene que tener los manguitos para las zonas comprimidas. Para la zona obtener la longitud que tiene que tener la barra en la zona de tracción se calcula multiplicando por 5 el diámetro de la barra:

Diámetro nominal de la barra, D en mm.	Long. Total, mm	Longitud zona embebida o traccionada, mm	Zona comprimida Longitud manguito, mm
8	200	40	160
12	200	60	140
16	200	80	120

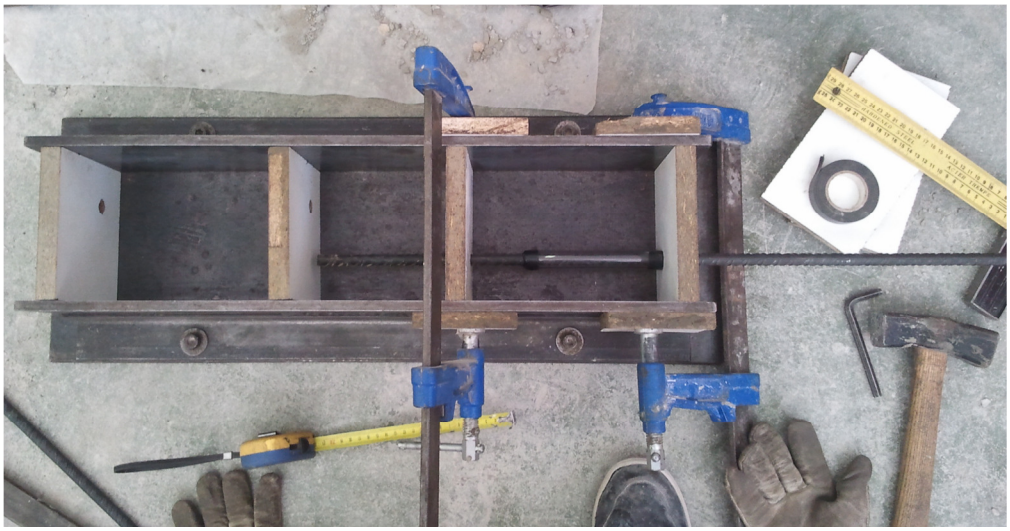
También debemos recordar que la barra debe sobresalir de la probeta en la zona traccionada al menos 15 centímetros. Si nos fijamos en la imagen, el trozo de barra de la derecha fuera del pull-out mide como mínimo 15cm. de longitud:



Ahora que ya hemos citado las características específicas de los pull-outs, a continuación hablaremos de su preparación. Para garantizar el recubrimiento que nos exigen los distintos casos, elaboramos unas chapas de madera como las de la siguiente imagen que nos garanticen la sujeción de la barra durante el hormigonado y también el recubrimiento mínimo tanto en la cara inferior como en la cara lateral más desfavorable:

Como en la siguiente imagen donde se aprecia que se trata del recubrimiento mínimo de 2’5, esta probeta fallará por splitting como veremos en el análisis de resultados debido a un recubrimiento tan pequeño de la armadura. Se aprecia como la madera hace que tenga la barra el recubrimiento que le corresponde tanto abajo como a la izquierda de la barra:

Los moldes que emplearemos son de acero, que previamente pintaremos con desencofrante para que no se adhiera el hormigón al molde. Se puede observar en la imagen como ya están colocadas las chapas de madera a la derecha junto a la barra con el manguito en la zona que será comprimida en el ensayo posterior:



Una vez ya tenemos los moldes listos con las chapas de madera, las barras bien colocadas con sus manguitos en la zona y con la longitud correcta, sólo nos queda hormigonar con las dosificaciones obtenidas en la Etapa 1ª.

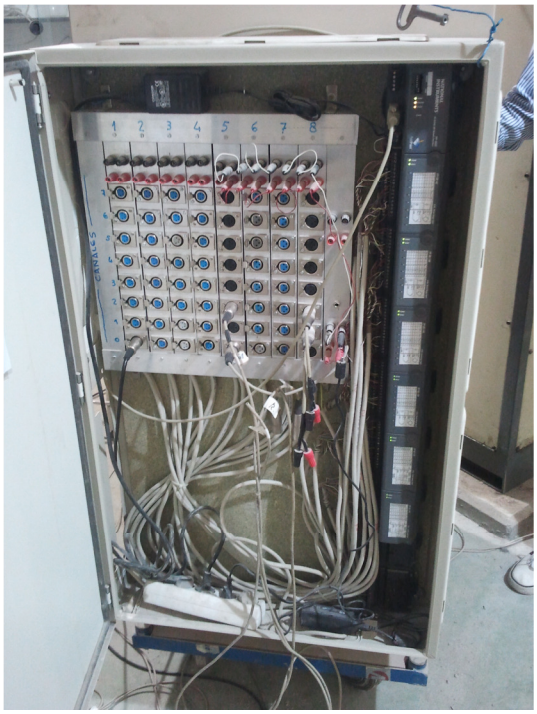
Después de tener los pull-outs hormigonados, los dejaremos en el molde durante 24 horas al igual que hicimos con las probetas cúbicas y después las desmoldearemos y dejaremos que se curen durante 28 días antes de realizar el ensayo. Cabe citar que no meteremos los pull-outs en la cámara húmeda para que no se oxiden las armaduras con la humedad.

Una vez tengamos todo, procederemos a hormigonar como se muestra en la siguiente imagen:

Y posteriormente a las 24 horas a desmoldear los pull-outs:

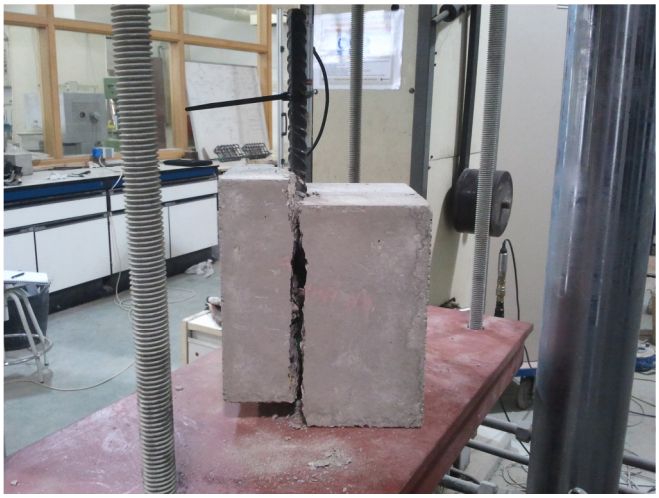
Para finalizar, faltaría ensayarlos en la máquina que hemos visto al principio de este punto. Le colocamos unos captadores que nos ayudan a medir la longitud de la barra mientras que vamos traccionando y la máquina nos muestra la tensión que estamos haciendo y nos dibuja unas gráficas del área de tensión-deformación que soporta cada pull-out.

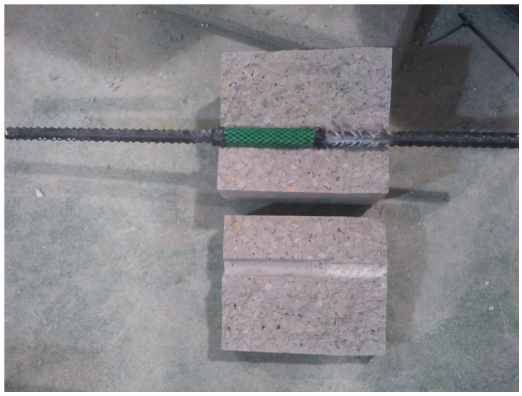
Vemos a continuación algunas fotos del ensayo a tracción de los pull-outs, como los captadores de longitud sujetos con bridas a las barras, el ordenador que nos da las gráficas, etc.:



Por último veremos unas cuantas imágenes de las probetas pull-out que han fallado por splitting y por tanto no nos sirven para nuestra toma de datos, y también algunas imágenes de los ensayos a compresión.

Primero las probetas que han fallado por splitting:





Ensayos a compresión de probetas cilíndricas de hormigón sin fibras (imagen izquierda y central) y con fibras (imagen derecha):

En esta imagen observamos como una probeta cúbica después de ensayarla a compresión, a pesar de que el hormigón está totalmente partido por la compresión, las fibras no dejan que se lleguen a separar completamente ambas partes por eso se dice que las fibras tienen la propiedad de “coser” el hormigón.

5) ANÁLISIS DE RESULTADOS:

En el análisis de los resultados, primero de todo realizaremos un análisis preliminar de los datos obtenidos con el fin de detectar los datos anómalos, es decir, los que se desvían mucho del conjunto y que por tanto deben ser rechazados antes de proceder al análisis completo de los resultados.

Análisis preliminar de los datos

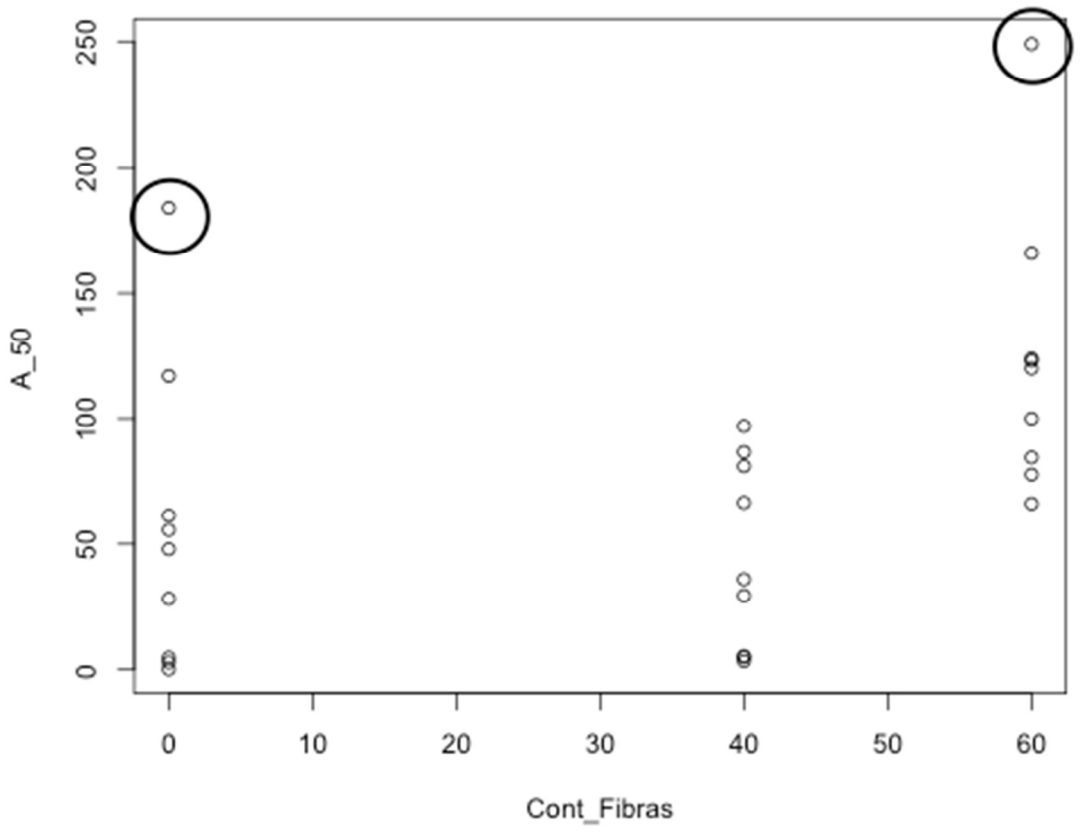
La probeta **L 7-2** no tiene resultado de deslizamiento porque ha fallado por splitting, por tanto no debemos tener en cuenta los demás resultados numéricos de dicha probeta porque el modo de fallo ha sido distinto al que buscamos. Como el modo de fallo de la probeta no ha sido por arrancamiento, no existe una tensión máxima o tensión pico porque no se ha llegado a alcanzar, por tanto tampoco se puede definir de forma consistente el área bajo la curva porque la energía aplicada al cargar no ha sido absorbida tensodeformacionalmente sino disipada con el estallido de la probeta. Por tanto no es una probeta que se pueda analizar de forma conjunta con las que no han fallado por splitting.

De los grupos de probetas que no han fallado por splitting, se detecta una probeta cuyos resultados son datos anómalos, la probeta **L3-2:**

ID	Fibras	Cont_Fibras	Rec_Diam	Diámetro	Tau_max	A_max	A_80	A_50
L3-1	80_50	60 kg/m3	5.0	16 mm	23.17	23.54	86.60	166.00
L3 -2	80_50	60 kg/m3	5.0	16 mm	25.08	25.58	**120.00**	**249.00**
L3 -3	80_50	60 kg/m3	5.0	16 mm	17.60	14.55	50.10	100.00

ID	Fibras	Cont_Fibras	Rec_Diam	Diámetro	Tau_max	A_max	A_80	A_50
L7-1	80_35	0	3.5	16	21.20	19.50	65.90	117.00
L7-2	80_35	0	3.5	16	**24.24**	**28.15**	**28.15**	**28.15(split)**
L7-3	80_35	0	3.5	16	21.10	30.20	102.00	184.00

Se ve claramente que si se toman los datos de las áreas hasta el 80% de la tensión máxima en la región postpico: son puntos que quedan muy aislados, y son atribuibles a erros de producción y/o ensayo, que se retiran del análisis. En la imagen siguiente se puede apreciar bien a la dispersión de resultados de estas dos probetas con respecto a las demás.



Una vez hayamos retirado esos dos puntos anómalos, con el resto de los resultados procederemos al análisis.

ANÁLISIS DE EFECTOS SOBRE LA TAU MÁXIMA (tensión de adherencia máxima)

El análisis de la varianza de Tau máxima se lleva a la siguiente tabla:

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)
Fibras	2	17.7	8.83	0.427	0.658
Cont_Fibras	1	36.0	36.02	1.744	0.202
Rec_Diam	1	50.4	50.36	2.438	0.135
Diametro	1	21.0	20.95	1.014	0.327
Residuals	19	392.4	20.65		

En este trabajo se adopta el siguiente criterio: se consideran efectos **estadísticamente significativos** sobre la variable respuesta, en nuestro caso la tau máxima (tensión de adherencia o tensión pico), los correspondientes a **p-valores <0.10** (confianza del 90%), y **muy siginificativos** los correspondientes a **p-valores <0.05** (confianza del 95%).

Por tanto, a la vista de la tabla anterior: ninguno de los factores tiene un efecto significativo sobre la tensión de adherencia máxima, puesto que ninguno es inferior a 0.10. Eso quiere decir que cambiar de tipo de fibras, de contenido de fibras, de relación Recubrimiento/Diámetro, o de diámetro de la barra, no determina variaciones en la tensión de adherencia máxima. Esto está de acuerdo con la bibliografía, puesto que la tensión de adherencia máxima depende básicamente de la resistencia a compresión simple del hormigón, que se ve afectada por estos factores.

Para completar nuestro análisis de resultados usaremos el diagrama de caja o box-and-whisker. Un **diagrama de caja** (box-and-whisker) es un gráfico, basado en los cuartiles de una distribución normal, mediante el cual se visualiza el conjunto de datos obtenidos en los ensayos de pull-out. Está compuesto por un rectángulo, la "caja", y dos brazos, los "bigotes". Dentro de cada caja, observamos una línea gruesa que en cada caso nos está indicando la media. La amplitud de la caja y los bigotes informan sobre la dispersión. Los puntos que quedan fuera son raros pero no anómalos, que ya han sido descartados anteriormente.

Es un gráfico que suministra información sobre los valores mínimo y máximo, los cuartiles Q1, Q2 o mediana y Q3, y sobre la existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución. Primero es necesario encontrar la mediana para luego encontrar los 2 cuartiles restantes (Q1 y Q3). A continuación veremos una imagen donde se muestra la visualización de este diagrama y en qué consiste.

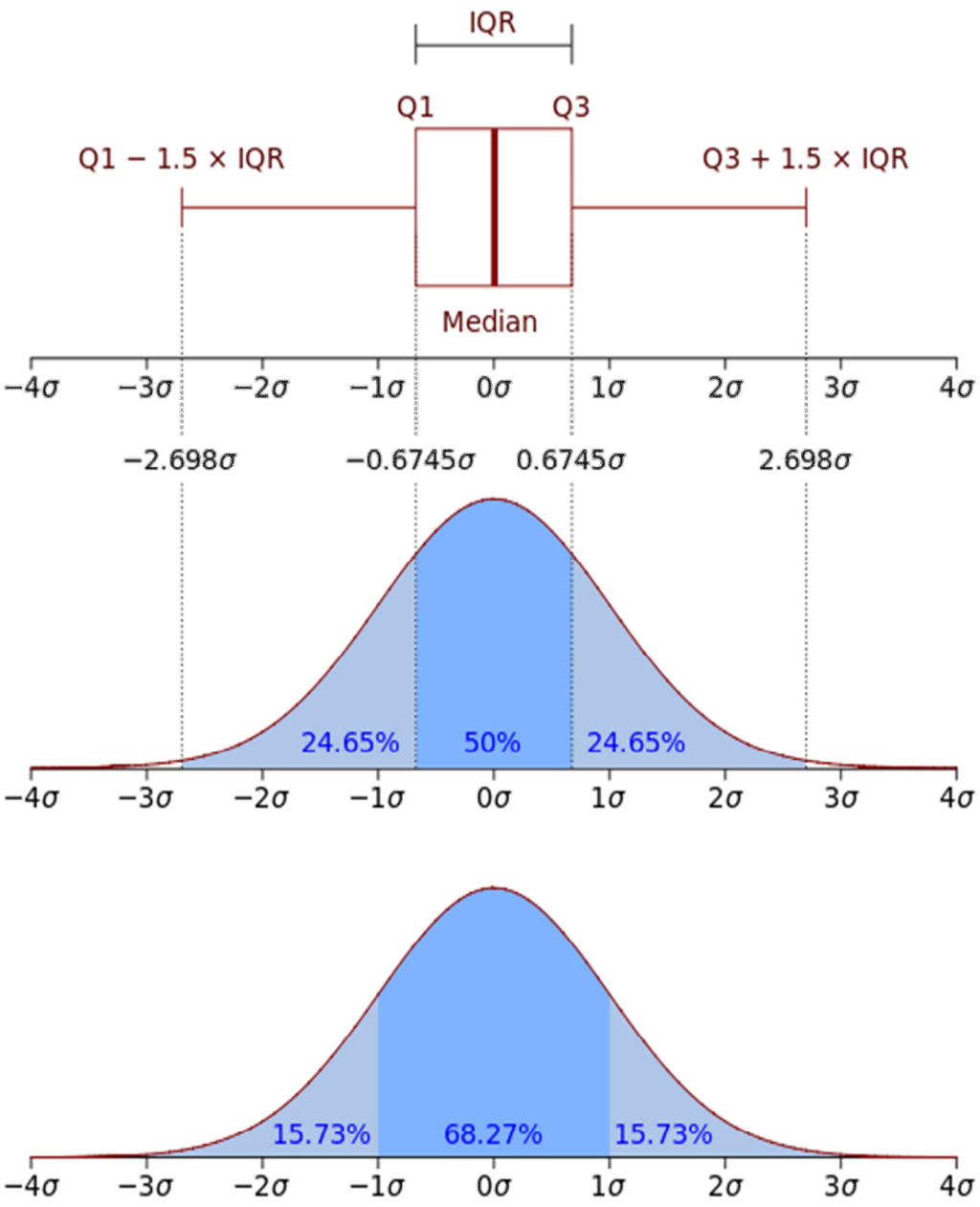


Imagen de los componentes de diagrama de cajas (box-and-whisker)

En los gráficos tipo box-and-whisker (diagrama de caja) se ve que no hay diferencias al variar fibras, contenidos, etc, porque las cajas correspondientes a niveles diferentes de cada uno de estos factores se solapan, situándose aproximadamente en la misma franja horizontal en cada caso.

Gráfico de Tau máx. (eje vertical) frente al tipo de fibra (eje horizontal):

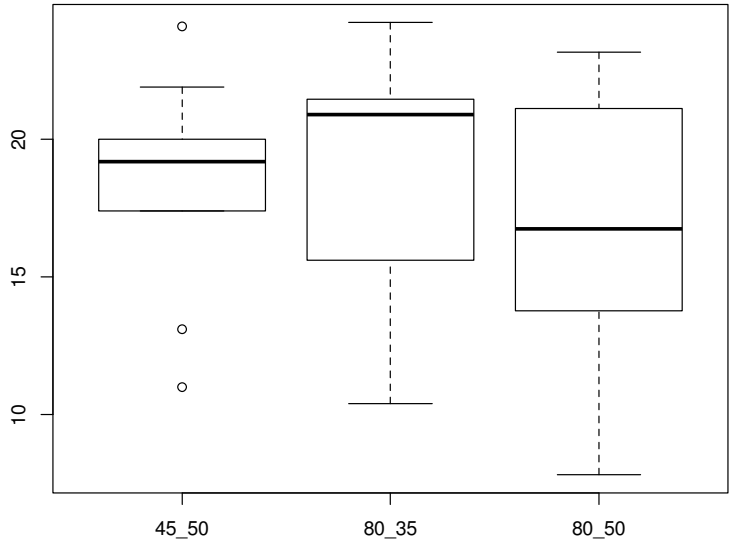


Gráfico de Tau máx. (eje vertical) frente al contenido de fibras en kg/m3 (eje horizontal):

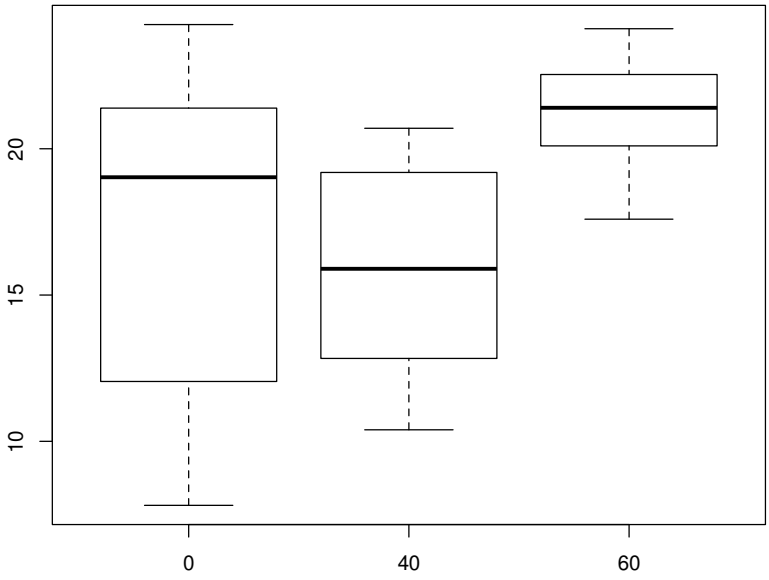
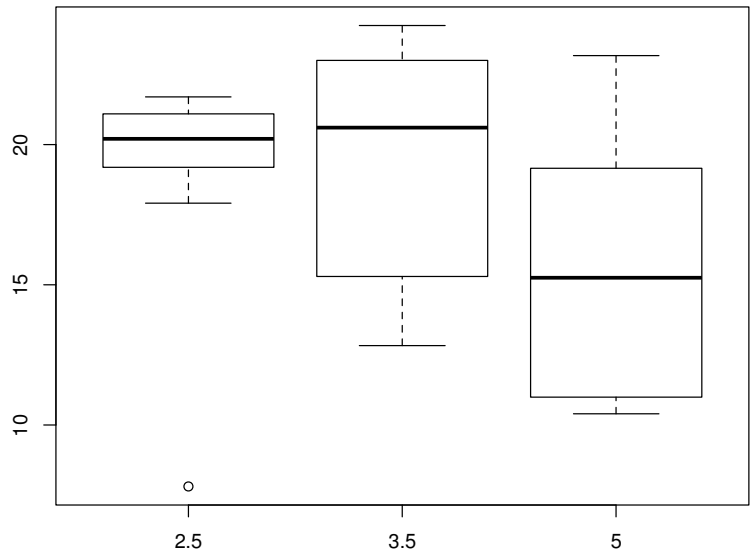


Gráfico de Tau máx. (eje vertical) frente al Recubrimiento/Diámetro (eje horizontal):



ANÁLISIS DE EFECTOS SOBRE EL ÁREA HASTA EL PICO

Ahora analizamos el área que tenemos en las gráficas de los pull-outs hasta el pico de tensión máxima. El análisis de la varianza lleva a la siguiente tabla:

```
            Df   Sum Sq   Mean Sq      F value      Pr(>F)
Fibras       2   323.6    161.82       3.728        0.0431 *
Cont_Fibras  1   93.6     93.62        2.157        0.1583
Rec_Diam     1   13.2     13.22        0.305        0.5874
Diametro     1   171.3    171.31       3.946        0.0616 .
Residuals   19   824.8    43.41
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
```

Como observamos el elemento **muy significativo** de todos es el tipo de fibras puesto que el p-valor es inferior a 0.05, que como habíamos definido anteriormente, corresponde a efectos estadísticamente **muy significativos** correspondientes a **p-valores <0.05** (confianza del 95%).

También es un efecto **significativo** el diámetro de las barras.

En cambio el contenido en fibras no llega a ser significativo, aunque por poco. Esto se debe a la gran dispersión de los valores cuando no hay fibras. Sin embargo, en el gráfico sí que llega a apreciarse una cierta tendencia creciente entre 40Kg/m3 y 60Kg/m3.

Gráfico frente a tipo de fibras: se ve que las fibras 80/35 se distinguen claramente de las otras dos, dan más ductilidad pre-pico porque son las más esbeltas por su gran longitud y menor diámetro (esbeltez=35 frente a esbeltez=50 de las otras dos).

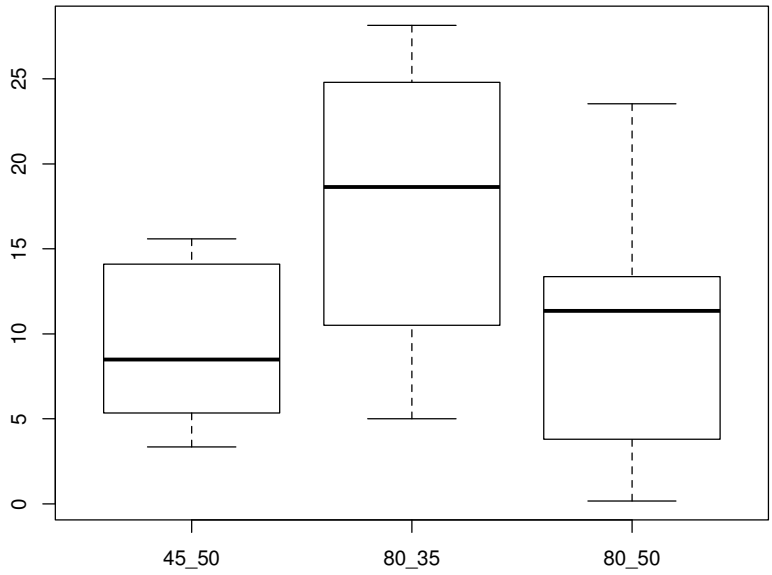


Gráfico del área pre-pico frente al diámetro de las barras: tendencia creciente.

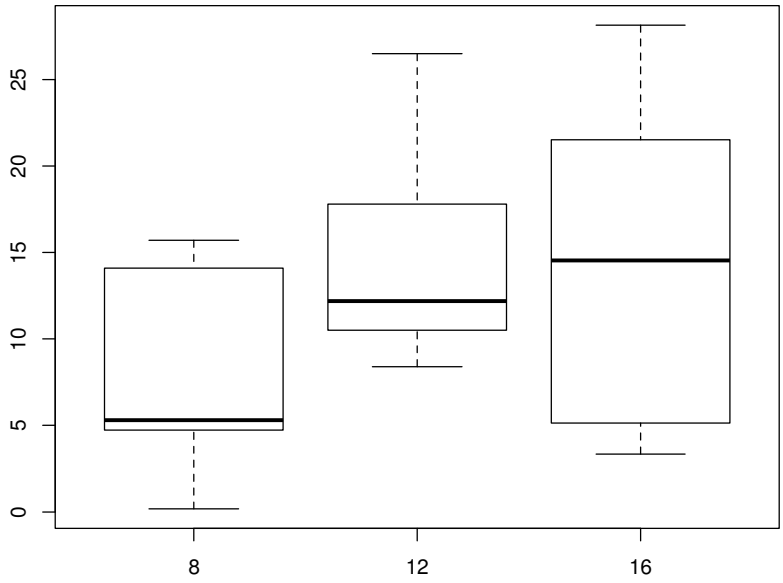
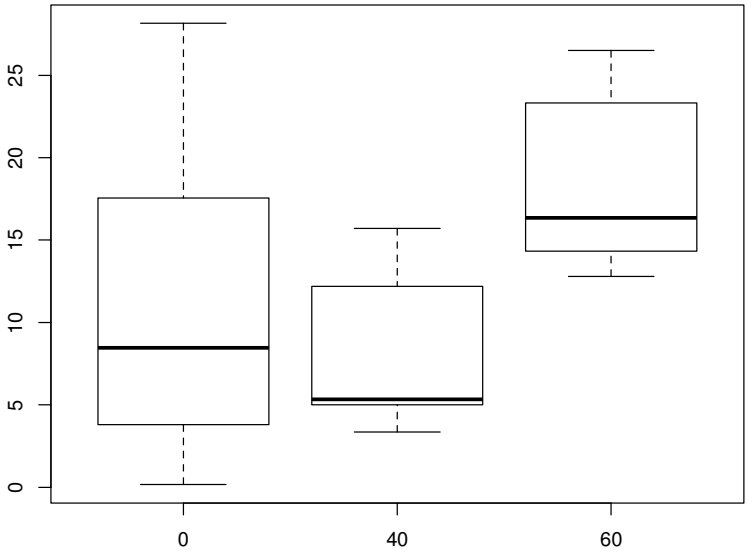


Gráfico del área pre-pico frente al contenido en fibras: No es el dato más importante de todos pero observamos que el mayor valor nos lo da los 60Kg/m3 porque con más fibras "cosemos" mejor el hormigón que con respecto a 40Kg/m3 y sin fibras.



ANÁLISIS DE EFECTOS SOBRE EL ÁREA A_80

El análisis de la varianza sobre el área hasta el 80% de la máxima tensión de adherencia alcanzada lleva a la siguiente tabla:

```
            Df Sum Sq Mean Sq F value  Pr(>F)
Fibras       2   2662  1331.2   3.976 0.03610 *
Cont_Fibras  1   2832  2832.2   8.460 0.00901 **
Rec_Diam     1    924   924.4   2.761 0.11299
Diametro     1   1142  1141.8   3.411 0.08041 .
Residuals   19   6361   334.8
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
```

Se puede apreciar que el contenido en fibras y el tipo de fibras son ambos elementos **muy significativos**, porque una vez superada la tensión pico influye positivamente a la hora de “coser” el hormigón que tengamos fibras de acero.

También se observa que el diámetro de la barra es un elemento **significativo** para que mejore la adherencia. Por último, también vemos en la tabla que el recubrimiento/diámetro por muy poco también lo podemos considerar como un elemento **significativo** por el valor muy próximo a 0.1 que tiene.

Gráfico del área A80% frente al tipo de fibras:

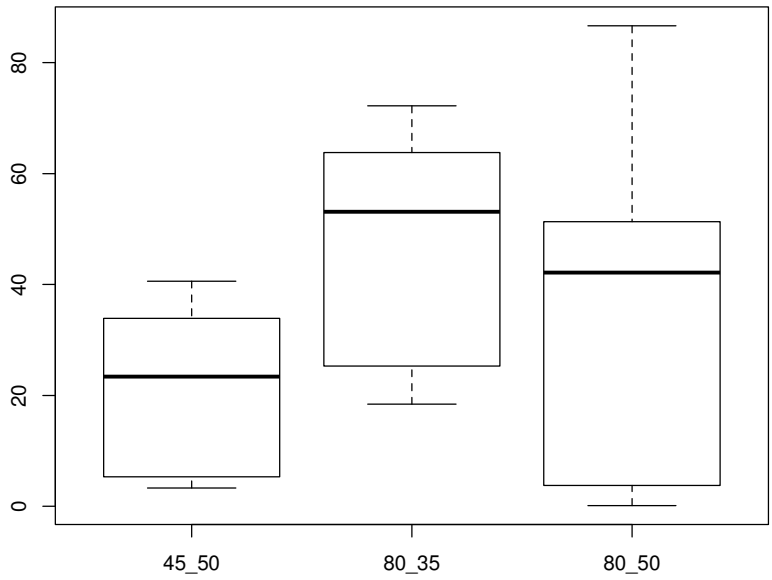
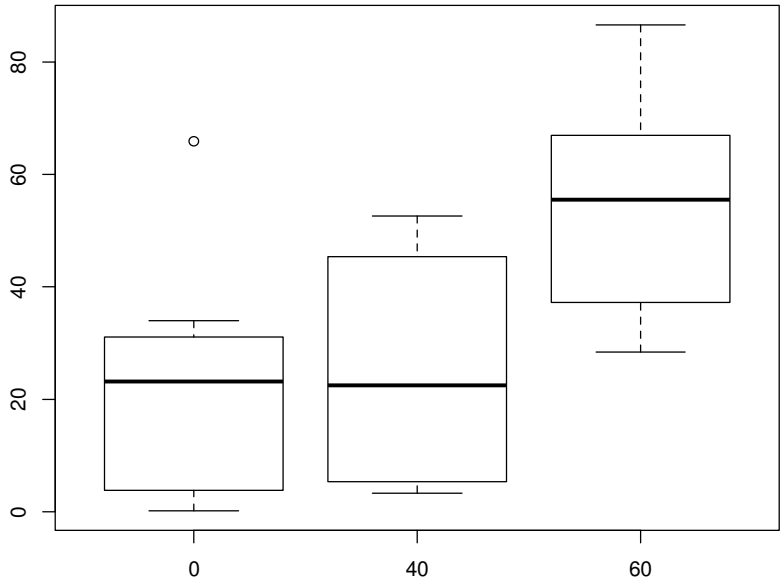


Gráfico del área A80% frente al contenido en fibras: es clara la tendencia creciente, quizá se ve mejor en el gráfico de dispersión (segundo gráfico).



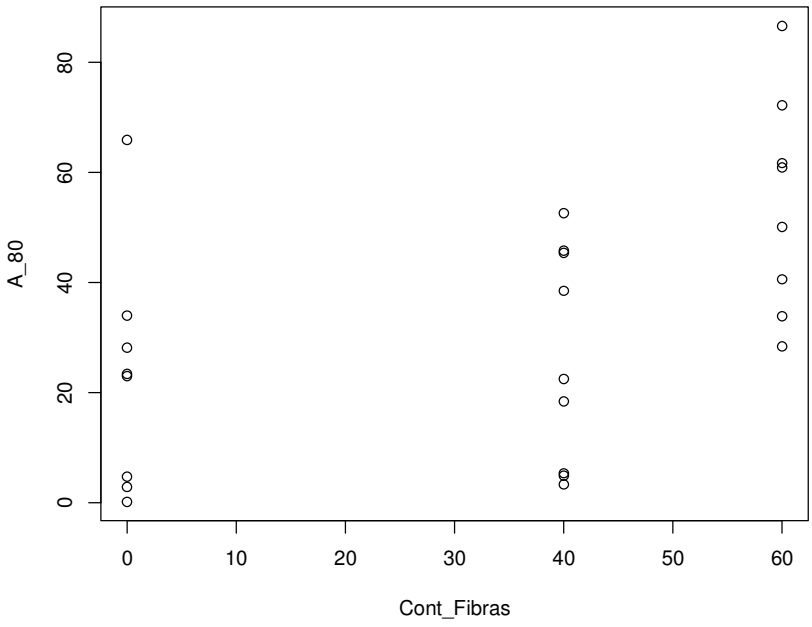


Gráfico del área A80% frente al diámetro: no tenemos una explicación clara, se necesitarían más ensayos para aclararlo. Quizá tenga que ver con la sección relativa de corruga con respecto a la sección nominal de la barra.

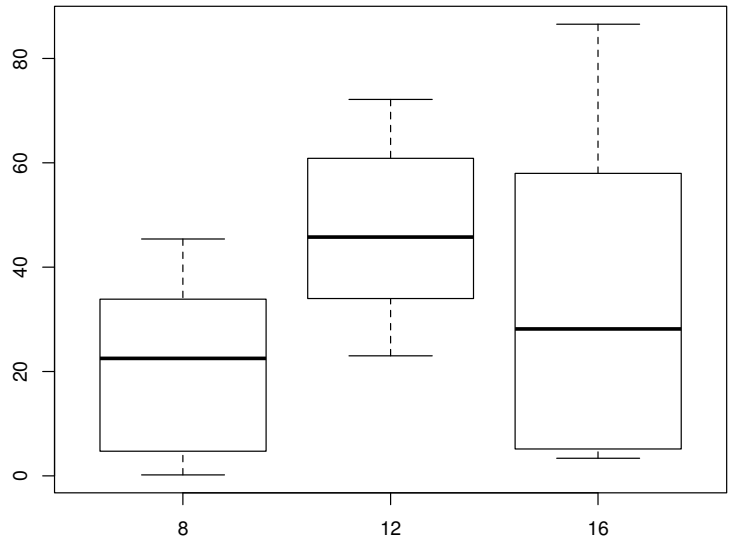
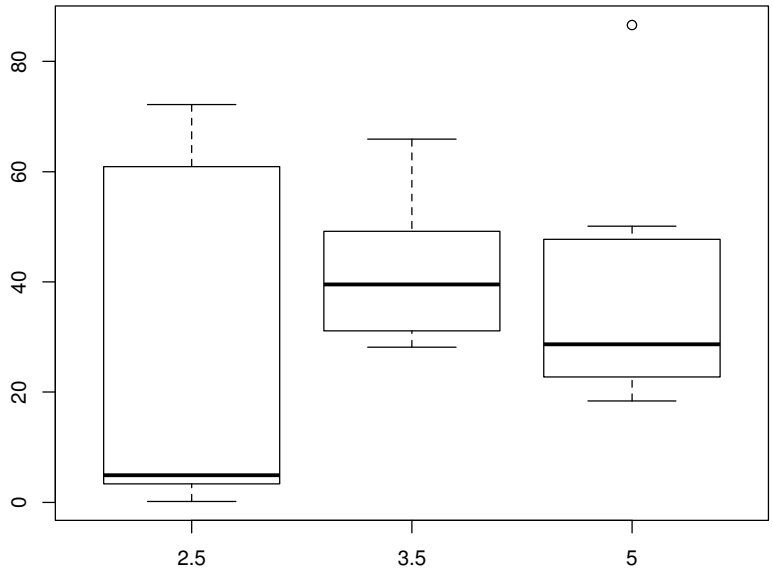
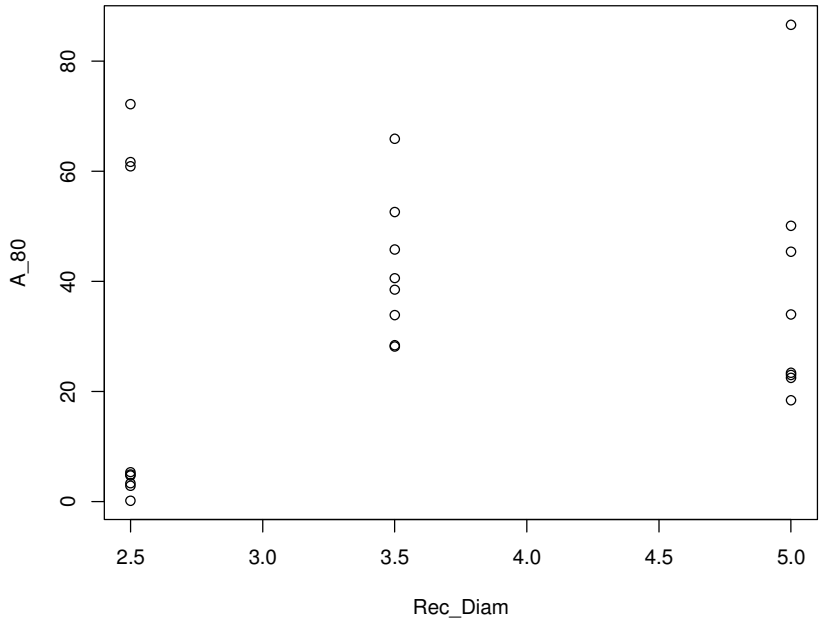


Gráfico del área A80% frente al recubrimiento/diámetro: de nuevo, se ve tendencia ascendente si nos fijamos en las medias (rayas gruesas en negrita), pero la relativa gran dispersión de los resultados para 0 kg/m3 impide que se vea más claramente:





ANÁLISIS DE EFECTOS SOBRE EL ÁREA A_50

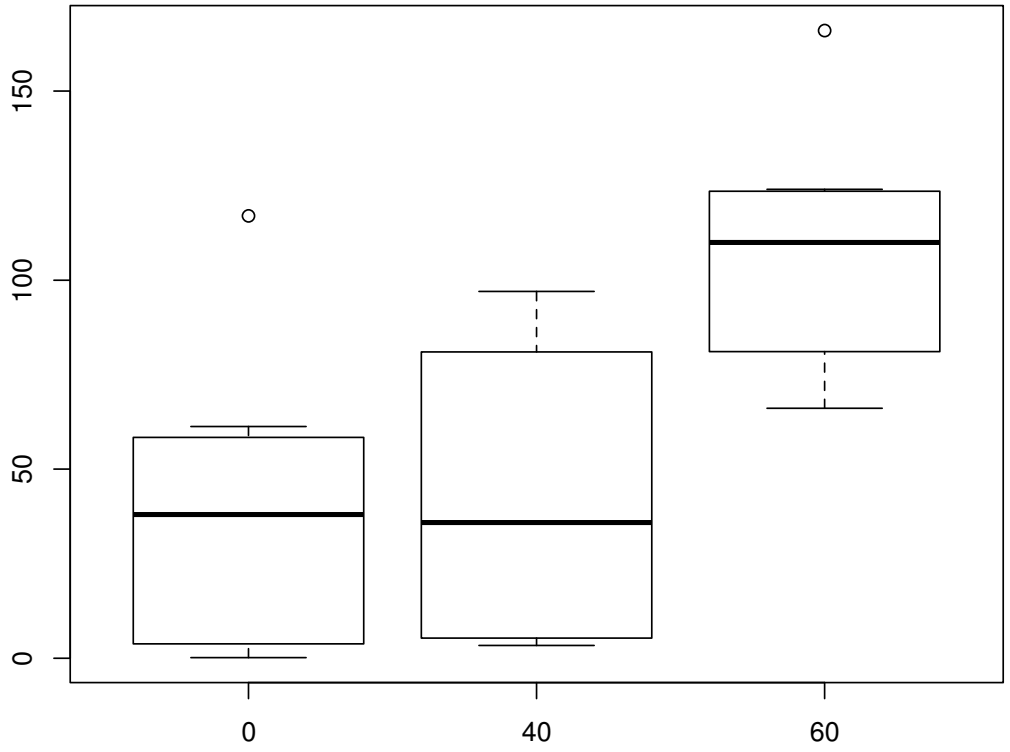
El análisis de la varianza sobre el área hasta el 50% de la máxima tensión de adherencia alcanzada lleva a la siguiente tabla:

```
            Df Sum Sq Mean Sq F value  Pr(>F)
Fibras       2   6480    3240   2.352 0.12229
Cont_Fibras  1  13277   13277   9.638 0.00584 **
Rec_Diam     1   4677    4677   3.395 0.08106 .
Diametro     1   2165    2165   1.572 0.22517
Residuals   19  26174    1378
---
Signif. codes:  0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1
```

Observamos que el nuevamente el contenido en fibras es un elemento **muy significativo**, por la mejoría que supone a la de “coserlo” y aumentar la adherencia entre el hormigón y la armadura pasiva.

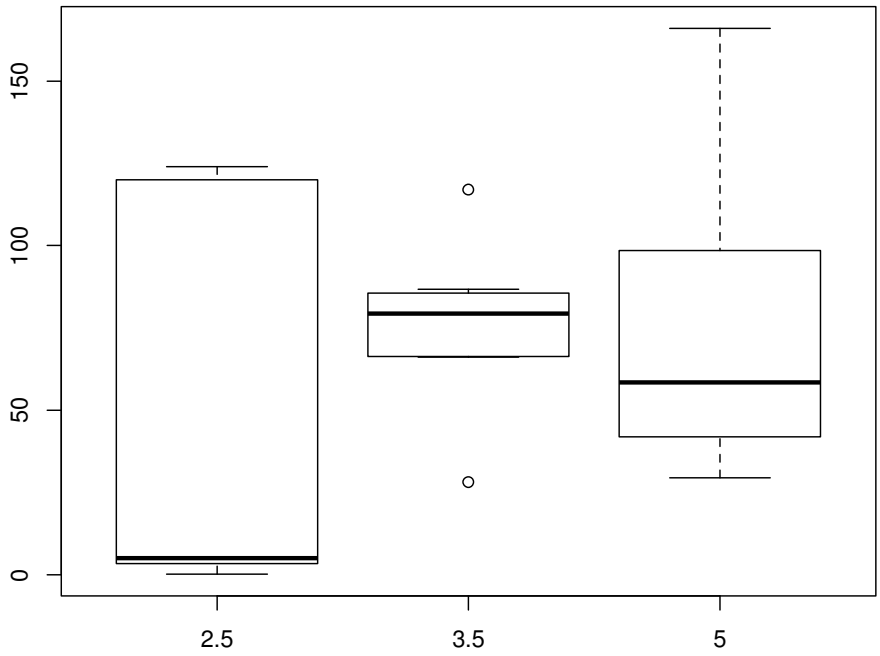
También se aprecia que el recubrimiento/diámetro es otro elemento que pasa a formar parte de los elementos **significativos** en pro de la mejora de la adherencia entre hormigón-acero.

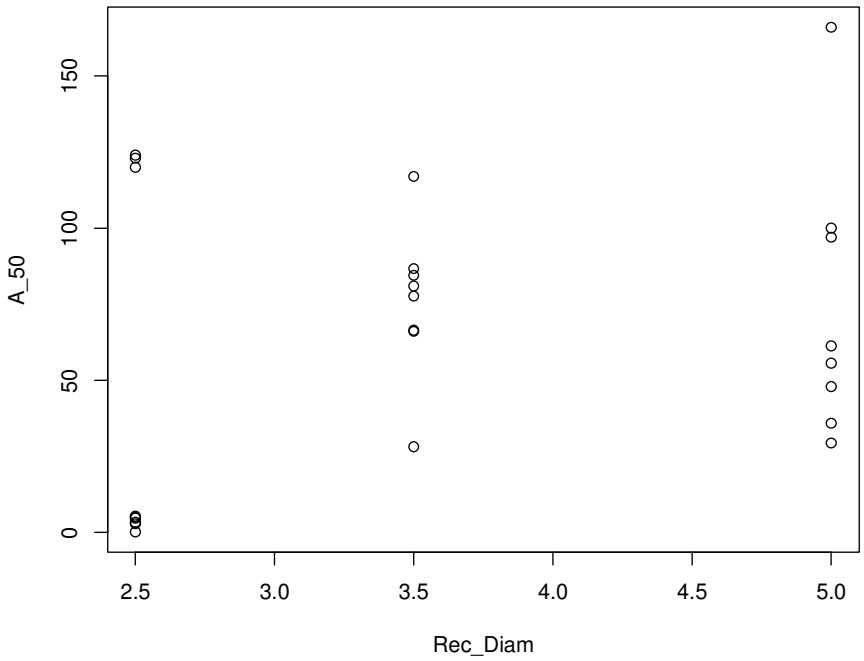
Gráfico del área A50% frente al contenido en fibras:



Apreciamos en el gráfico cómo la media del área al 50% asciende, para 40Kg/m3 hay un poco más de dispersión que cuando no hay fibras y por eso las medias salen similares, pero aumenta notablemente para 60Kg/m3.

Gráfico del área A50% frente al ratio recubrimiento/diámetro:





Después de analizar el gráfico del área A80% y a 50% del recubrimiento/diámetro, observamos que tenemos un problema de dispersión para el caso de recubrimiento/diámetro = 2.5. Seguramente este suceso se deba a que éste es el caso límite en que las probetas pull-out fallan por splitting puesto que tenemos puntos con áreas muy bajas en el caso este de rec./diám. = 2.5.

Para que esto no sucediera, posiblemente hubiera sido más acertado diseñar la investigación del experimento con unos parámetros para recubrimiento/diámetro = 3, 4, y 5 en lugar de los niveles empleados (2.5, 3.5 y 5) que se aproxima el valor 2.5 mucho más al fallo por splitting, imposibilitando la obtención de datos númericos en dichas probetas que han fallado.

Si nos fijamos en los resultados obtenidos en las tablas anteriores, podemos decir que todos los elementos son influyentes incrementando el área de trabajo que soporta el material antes los esfuerzos de arrancamiento a los que se ha visto sometido. Pero los elementos **muy significativos** en nuestro hormigón, han sido principalmente el “tipo de fibras” y el “contenido de fibras”, en especial el contenido de fibras después de superar la tensión pico de adherencia. Mejora el comportamiento del hormigón un mayor contenido en fibras, en este caso 60Kg/m3 frente a los 40Kg/m3 o sin fibras, puesto que las fibras tienen la propiedad de “coser” el hormigón aumentando la ductilidad del material.

6) CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS:

CONCLUSIONES

Como hemos podido comprobar, la incorporación de fibras de acero en los hormigones, autocompactante en nuestro caso, mejora la adherencia con las armaduras pasivas de acero incrementando el área bajo curva, o energía que es capaz de absorber el material ante un esfuerzo de tracción de la misma barra, como en los ensayos de pull-out realizados. Es decir, que con la incorporación de fibras de acero, mejoramos considerablemente sus características mecánicas, excepto la resistencia a compresión que no se ve afectada por las fibras.

Además, la contribución de las fibras de acero a la adherencia de las armaduras pasivas, es importante porque controlan la microfisuración que se produce alrededor de la armadura traccionada y proporcionan mayor ductilidad al material, proporcionándole una gran ventaja frente al hormigón convencional para las estructuras.

LINEAS FUTURAS

En cuanto a líneas futuras, tenemos muchos campos en los que podríamos seguir investigando con las fibras, por ejemplo como en los siguientes:

-Es necesario profundizar más en cómo se canaliza el efecto de las fibras a través de los distintos parámetros que caracterizan/cuantifican la capacidad adherente del hormigón.

-Deberíamos hacer cálculos presupuestarios en cada obra de hormigón armado para ver si es más económico incorporar las fibras en hormigones convencionales para mejorar sus propiedades ante solicitaciones de tracción. Con ello podríamos reducir la cantidad de acero de refuerzo que gastamos en las estructuras de hormigón sustituyendo dicho acero de refuerzo por fibras junto a una cantidad menor de acero en la estructura.

-También deberíamos centrarnos en desarrollar una formulación concreta para el cálculo de longitudes de anclaje con la incorporación de fibras, puesto que El Anejo 14 de la EHE-08 dice que la adherencia se ve mejorada al incorporar fibras pero no da ninguna formulación para tenerla en cuenta en dicho cálculo.

Además de esto, debemos recordar que para futuras investigaciones convendría tener en cuenta el problema del fallo de probetas por splitting, anulando por completo los resultados numéricos de dichas probetas. Para ello recomendamos no utilizar una relación recubrimiento/diámetro tan al límite del fallo por splitting como es el caso de c/d= 2.5 y usar una superior como por ejemplo una relación c/d= 3.

7) ESTUDIO PRESUPUESTARIO:

- Recopilación de datos y cálculos previos:

Amasadas realizadas: 8 de pruebas de dosificación.
17 de pull-outs.
Total: **25 Amasadas.**

Cemento: **6.5 Kg/amasada**

Arena: **21 Kg/amasada**

Grava: **16.7 Kg/amasada**

Aditivo: 1'2% s/c = **0.08 Kg/amasada**
(Hemos sacado la media de Aditivo empleado por amasada)

Filler: **0'7 Kg/amasada** (hemos sacado la media de Filler empleado por amasada)

Agua: **3'9 Kg/amasada** (no tenemos en cuenta la corrección por humedad)

Acero: Barras corrugadas de Acero B-500SD de 0'7m de longitud.

Ø 8mm = 9 barras x 0'7m x 0.395 Kg/m = 2.5 Kg
Ø 12mm = 9 barras x 0'7m x 0.888 Kg/m = 5.6 Kg
Ø 16mm = 9 barras x 0'7m x 1.580 Kg/m = 10 Kg
Total: **18.1 Kg**

Fibras de Acero:

L2 = 3 Amasadas x 0'8 Kg/Amasada = 2.4 Kg
L5 = 3 Amasadas x 0'8 Kg/Amasada = 2.4 Kg
L8 = 3 Amasadas x 0'8 Kg/Amasada = 2.4 Kg
Total: 7.2 Kg

L2 = 3 Amasadas x 1'2 Kg/Amasada = 3.6 Kg
L2 = 3 Amasadas x 1'2 Kg/Amasada = 3.6 Kg

L2 = 3 Amasadas x 1'2 Kg/Amasada = 3.6 Kg

Total: 10.8 Kg

Total: 7.2 + 10.8 = **18 Kg**

Maderas: 20 x 20 x 2 cm

2 maderas x 27 probetas pull-out = 54 maderas.

Área maderas = 54 x (0'2 x 0'2) = **2.16 m2**

Manguitos: longitud del manguito más largo que usaremos 0'16m.

27 pull-outs x 0'16 = **4.5 m**

Probetas: 27 pull-outs
8 probetas cúbicas 10x10x10 cm
22 probetas cilíndricas 15Ø x30cm

Horas de técnico de laboratorio:

Amasadas de prueba = 0.5h preparación y pesaje
0.5h amasado y ensayo escurrimiento
0.5h limpieza
Total: **1.5h/amasada dosificación**

Amasadas de pull-outs = 1.5h operaciones de pesaje, amasado y limpieza.
4h preparación de 3 moldes (*trabaja sólo un 25%, asignación de técnico de ayuda*)
Total: 1.5h/amasada + 1h(moldes) = **2.5h/amasada pull-outs**

Técnico de Ayuda preparación moldes = **4h/amasada pull-outs**

Desmoldear probetas = **0.5h/probeta pull-out**
0.3h/probeta cilíndrica
0.1h/probeta cúbica

Ensayar probetas = **0.5h/probeta pull-out**
0.25h/probeta cilíndrica y cúbica a compresión

Redacción del proyecto, impresión, encuadernación y grabación en CD = **60h**

- Presupuesto:

CÓDIGO	RESUMEN	PARTES IGUALES	CANTIDAD	PRECIO	IMPORTE
	CAPÍTULO 01 PFG_HORMIGÓN CON FIBRAS				
	SUBCAPÍTULO P01 Estudio Experimental:				
P01.1	**m3** Agua.				
		25	0,0039	1,89	
					0,18
P01.2	**t** Cemento portland CEM II 42'5R, según norma UNE-EN 197-1:2000 a granel.				
		25	0,0065	98,11	
					15,94
P01.3	**kg** Aditivo fluidificante para hormigones de calidad y difícil puesta en obra, y en hormigón bombeado, suministrado en envases de 30 kg.				
		25	0,08	1,66	
					3,32
P01.4	**t** Arena triturada de naturalez silícea, sin lavar, de granulometría 0/4, a pie de obra, considerando transporte con camión de 25t, a una distancia media de 30 km.				
		25	0,021	14,83	
					7,79
P01.5	**t** Grava triturada caliza de granulometría 7/14, lavada, a pie de obra, considerando transporte con camión de 25t, a una distancia media de 30 km.				
		25	0,0167	16,45	
					6,87
P01.6	**t** Filler de aportación.				
		25	0,0007	74,66	
					1,31
P01.7	**kg** Fibras de acero.				
		1	18	2,5	
					45,00
P01.8	**kg** Acero corrugado B-500SD, suministrado en Jaulas y colocado en obra, para estructuras de hormigón.				
		1	18,1	1,44	
					26,06
P01.9	**l** Desencofrante para moldes de hierro y madera formulado en base aceite.				
		1	5	1,98	
					9,90

P01.10	**u** Par de guantes para riesgos mecánicos fabricados en algodón tejido punzonado con refuerzo de serraje vacuno en la palma, con certificado CE.				
		1	1	3,47	
					3,47
P01.11	**u** Mascarilla antipolvo, doble filtro, con certificado CE.				
		1	1	9,36	
					9,36
P01.12	**m2** Tablero aglomerado revestido, de 19mm de espesor.				
		54	0,04	6,89	
					14,88
P01.13	**m** Mangueras de distintos diámetros para fabricación de manguitos, cubrir las barras de acero en pull-outs.				
		1	4,5	1,6	
					7,20
P01.14	**h** Técnico de laboratorio				
	Descomposición				
	Amasadas de prueba de dosificaciones	8	1,5	7,5	90
	Amasadas de pull-outs	17	2,5	7,5	318,75
	Ayudante preparación de los 9 tipos de moldes pull-out	9	4	7,5	270
	Desmoldear probeta pull-out	27	0,5	7,5	101,25
	Desmoldear probeta cilíndrica	22	0,3	7,5	49,5
	Desmoldear probeta cúbica	8	0,1	7,5	6
	Ensayar probeta pull-out	27	0,5	7,5	101,25
	Ensayar probetas a compresión	30	0,25	7,5	56,25
					993
	TOTAL SUBCAPÍTULO P01 Estudio Experimental				1144,28
	SUBCAPÍTULO P02 Redacción y materialización del proyecto:				
P02.1	**h** Técnico laboratorio	1	60	7,5	
					450,00
P02.2	**u** Materialización del proyecto				
	Descomposición				
	Impresión a color	1	125	0,35	43,75
	Encuadernación	1	1	2,5	2,5
	Grabación en CD	1	1	0,5	0,5
					46,75
	TOTAL SUBCAPÍTULO P02 Redacción y materialización del proyecto				496,75

TOTAL CAPÍTULO 01 PFG_HORMIGÓN CON FIBRAS			1641,03
Estimación Costes Indirectos	**13%**		1854,37
IVA	**21%**		2243,79
		TOTAL	**2243,79**

8) ANEXOS:

ANEJO 1

Líneas básicas del diseño y análisis de experimentos

Serna, P., Taengua, E.G.

Dpto. de Ing. de la Construcción y Proyectos de Ing. Civil

Universitat Politècnica de València

1. Objetivo del texto

En el presente escrito se pretende exponer el procedimiento general del Diseño de Experimentos, desarrollado a partir de los trabajos de Taguchi [1].

2. Introducción

Frecuentemente, cuando se plantea una investigación experimental, se pretende analizar de qué factores depende una propiedad determinada (diseño factorial) y, en su caso, obtener una función que relacione el valor de dicha propiedad con los de los valores que pueden tomar los factores[1].

Ante un problema como éste, el procedimiento a seguir es el siguiente:

1. Definición de la/s característica/s a estudiar, que serán las variables respuesta.
2. Selección de los factores a considerar en el experimento y decisión de los niveles de variación a estudiar para cada factor.
   Debe seleccionarse el número de factores y los niveles a estudiar con criterio económico: reducirlos a un número mínimo pero intentando controlar el máximo de efectos. Reducir en exceso los factores o niveles puede conducir a la pérdida del sentido del estudio y con ello a resultados incorrectos.
3. Decisión del número de pruebas a realizar y definición de las mismas.

Así, si se desea conocer de qué depende el módulo de elasticidad de un hormigón fabricado con áridos reciclados, se puede pensar en un conjunto de factores y niveles de los mismos como la que se presenta en la tabla 1.

FACTORES	NIVELES DE VARIACIÓN
Calidad del hormigón de origen de los áridos recibidos (f_c)	f_c = 25 ; 35

[1] Puede haber experimentos que, por naturaleza, no puedan organizarse según un diseño factorial, como los de carácter sociológico (v.g. encuestas), aunque en ciencia e ingeniería la mayoría de experimentos se pueden someter a un diseño factorial. Es por ello que en adelante cuando hablemos de diseño de un experimento nos estaremos refiriendo a diseños factoriales.

Contenido en desclasificados (%)	6% ; 10 %
Calidad del hormigón objetivo ($f_{c,obj}$)	$f_{c,obj}$ = 20 ; 40
Sustitución del árido grueso por árido reciclado (%)	20% ; 100 %
Criterio de sustitución	2 niveles: mg (-10% ; +10%)

Tabla 1. Ejemplo de planteamiento de factores y niveles para un experimento.

En la decisión de qué factores considerar en el experimento juega un papel importante tanto el conocimiento empírico o teórico que se tenga del fenómeno estudiado como la intuición de lo que pueda ser o no influyente. El acierto en la elección de los niveles también es importante: un factor puede aparecer como significativo simplemente porque la diferencia entre los niveles del mismo sea grande.

El número de pruebas de que conste el experimento deberá surgir de un compromiso entre: el nivel de resolución o fiabilidad que se quiere tener de las conclusiones (tanto mayor cuantas más pruebas se hagan) y la minimización del tiempo invertido en el experimento. En este sentido, recurrir al uso de fracciones factoriales será de gran ayuda.

Un estudio completo de esta programación exigiría realizar un plan de ensayos que contemplaría 2 x 2 x 2 x 2 x 3 = 48 combinaciones distintas.

Para reducir el número de ensayos es frecuente optar por plantear un ensayo tipo y sobre él analizar el efecto de las variaciones de cada factor por separado. En el ejemplo propuesto anteriormente, el caso tipo podría ser: un hormigón base de 25 MPa, del que se fabrican áridos reciclados con un porcentaje de desclasificados del 6%, se utilizará para fabricar un H40 sustituyendo el 20% del árido grueso manteniendo la granulometría. El efecto del contenido en desclasificados se analizaría añadiendo 1 ensayo que coincidiría con el ensayo base en todo, salvo en el factor que se estudia, que tomaría el valor del 10%. Los otros factores se analizarían del mismo modo actuando siempre alrededor del ensayo base. De este modo, el estudio se realizaría con solo 6 ensayos.

Sin embargo, este modo de proceder no es estadísticamente el más adecuado. Para compaginar la economía en esfuerzo experimental pero manteniendo el rigor científico en el diseño del programa de ensayos, nos apoyaremos en principios estadísticos.

3. Consideraciones para el diseño de experimentos

Cuando se plantea diseñar un programa de ensayos, se deben tener en cuenta aspectos como:

- Los objetivos de experimentos con un número considerable de factores pueden no conseguirse con diseños que intenten esclarecer uno a uno el efecto de los distintos factores. Es incorrecto presuponer que el valor óptimo de la variable respuesta es el óptimo de los óptimos parciales conseguidos variando solamente un factor cada vez y dejando el resto fijos.
- Principios erróneos como el mencionado pueden conducir a pérdidas de tiempo y recursos o a resultados no concluyentes.
- Factores no controlados comprometen las conclusiones del experimento.
- La no observancia de un mismo procedimiento y condiciones en todas las pruebas que constituyen el experimento puede enmascarar el efecto de los distintos factores.

Un uso efectivo de los principios estadísticos en el diseño de experimentos permite un diseño económico y eficiente de los mismos, que permite evaluar los efectos individuales y sus interacciones [2].

Aquí plantearemos un procedimiento para el diseño de experimentos, cuyo soporte estadístico es el análisis de la varianza o ANOVA.

El procedimiento que se propone consiste en seleccionar un número reducido de pruebas, de manera que del estudio de sus resultados sea posible extraer suficientes información para garantizar un análisis de la influencia de los distintos factores con garantías.

4. Terminología

- **Factor.** Variable controlable experimentalmente que se supone puede tener un efecto sobre la llamada variable respuesta.
- **Variable respuesta.** Resultado de un experimento.
- **Prueba.** Combinación de los factores, cada uno a un nivel de variación determinado, a la cual va asociada una observación experimental de la variable respuesta.
- **Niveles.** Valores prefijados que puede tomar un factor.
- **Diseño o experimento.** Especificación de un conjunto de pruebas experimentales, obtenidas asignando diferentes valores a los factores y pudiendo haber replicaciones.
- **Replicación.** Repetición de una prueba (o de un conjunto de ellas) dos o más veces.

- **Efecto.** Cambio en la variable respuesta que se produce entre 2 condiciones experimentales. En concreto, el efecto que produce un factor sobre la variable respuesta es la variación del valor de la misma al variar el factor.
- **Interacción entre 2 o más factores.** Existe si el efecto de uno de ellos depende de los niveles de los otros factores implicados en la interacción.
- **Orden de una interacción.** Número de factores implicados en la misma. Los efectos de las interacciones de orden mayor que 2 suelen ser inexistentes, [2].

5. Procedimiento para el diseño del experimento

Se plantearán diseños de tipo fracción factorial, en los que el número de pruebas se ve reducido en relación al diseño factorial completo de acuerdo con criterios que son válidos desde un punto de vista estadístico.

Los planes factoriales altamente fraccionados, más conocidos como **orthogonal arrays**, nacieron de los trabajos de Taguchi [1], orientados a generalizar y facilitar la aplicación del Diseño de Experimentos en círculos industriales, y por extensión a los investigadores en general, sin precisar de grandes conocimientos estadísticos. Con ellos se consigue [2] estudiar el efecto de un número elevado de factores con pocas pruebas, a cambio de desestimar el efecto de las interacciones de orden elevado (de más de 2 efectos, cuya importancia sería de todas formas despreciable).

La elección del orthogonal array que conviene utilizar en cada caso depende del número de factores a estudiar y los niveles de variación de cada uno. Los más comunes se muestran en el anejo “Catálogo de orthogonal arrays”. La denominación que se les da es del tipo *Lx*, donde x es el número de pruebas de que consta el array.

Por ejemplo, si se pretende diseñar un experimento que permita el estudio de hasta 7 factores a 2 niveles sobre una variable respuesta dada, se puede recurrir al orthogonal array L8, mostrado en la tabla 2.

En ella cada columna *j* corresponde a un factor, mientras que cada fila *i* corresponde a una prueba de las que conforman el experimento. Así pues, el elemento *ij* indicará el nivel al que se debe fijar el factor *j* en la prueba *i*.

Prueba	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Tabla 2. Orthogonal array L8.

Una buena fracción factorial no confunde nunca efectos simples entre sí. Sin embargo, debido al tan reducido número de pruebas con que se trabaja, es habitual que los efectos de las interacciones se confundan con los efectos simples de los factores estudiados. Por ello cada orthogonal array se acompaña de una tabla de doble entrada que recibe el nombre de tabla de interacciones. En la mayoría de casos en que se recurre a un orthogonal array para diseñar un experimento no se utilizan todas las columnas del mismo, puesto que el número de factores considerados normalmente es menor al número de factores que permite estudiar el orthogonal array. En esos casos conviene elegir las columnas a utilizar intentando no tomar aquéllas en las que se confunden interacciones de otras columnas también escogidas, y para eso se utiliza la tabla de interacciones. En la tabla 3 se muestra como ejemplo la tabla de interacciones del orthogonal array L8.

1	2	3	4	5	6	7
1	3	2	5	4	7	6
	2	1	**6**	7	4	5
		3	7	6	5	4
			4	1	2	3
				5	3	2
					6	1

Tabla 3. Tabla de interacciones del orthogonal array L8.

Elegidas dos columnas cualesquiera del orthogonal array, por ejemplo la 2 y la 4, en la tabla de interacciones se observa que la interacción de los efectos simples de estas columnas se recoge en la columna 6. Si tomásemos también esta columna del orthogonal array para otro factor, al estudiar su efecto estaríamos confundiendo el efecto simple de cada factor con los efectos simples de los otros dos.

Si por exigencias del propio experimento el número de factores es tal que obliga a emplear columnas del orthogonal array que incluyan interacciones, cuando posteriormente se analicen los resultados del experimento habrá que tener en cuenta que los efectos simples de los factores incluirán también parte del efecto de determinadas interacciones. Puesto que a la vista de la tabla de interacciones se puede saber cuáles son las que inerfieren cada efecto simple, o bien se pueden plantear experimentos adicionales destinados a clarificarlo, o bien se puede tener de antemano conocimiento de la importancia o no de las interacciones en cuestión.

Por último, es bastante común que se quieran considerar en un experimento un número de factores y/o niveles que no coincidan exactamente con ningún orthogonal array de los que se manejan usualmente. En ese caso, Romero y Zúnica [3], proponen unos "trucos" para la adaptación de un orthogonal array al número deseado de factores y/o niveles, y que son totalmente válidos porque no alteran las propiedades fundamentales del orthogonal array[2]. Son los siguientes:

1. En una columna de un factor a 3 niveles es posible acomodar un factor a 2 niveles haciendo equivalentes 2 de los 3 niveles primitivos. Se tiene un ejemplo en la tabla 4.
2. En cualquier diseño con factores a 2 niveles es posible acomodar un factor a 4 niveles usando 2 columnas cualesquiera y la correspondiente a su interacción. Se tiene un ejemplo en la tabla 5.
3. En un diseño con factores a 2 niveles es posible acomodar un factor a 3 niveles usando el truco 2 y luego haciendo equivalentes 2 de los nuevos 4 niveles.

Nº prueba	FACTOR A
1	1
2	2
3	3
4	1
5	2
6	3
7	1
8	2
9	3

Nº prueba	FACTOR A
1	1
2	2
3	1
4	1
5	2
6	1
7	1
8	2
9	1

Tabla 4. Ejemplo del truco 1.

Nº prueba	FACTOR A	FACTOR B		A * B
1	1	1	1 * 1 →	1
2	1	2	1 * 2 →	2
3	1	1	1 * 1 →	1
4	1	2	1 * 2 →	2
5	2	1	2 * 1 →	3
6	2	2	2 * 2 →	4
7	2	1	2 * 1 →	3
8	2	2	2 * 2 →	4

Tabla 5. Ejemplo del truco 2.

[2] Ciertas propiedades fundamentales de los orthogonal arrays, que son intrínsecas a la construcción de los mismos y que garantizan la fiabilidad de las conclusiones que de su uso se extraen. No han sido descritas en el presente escrito por excederse del alcance del mismo.

6. Indicaciones para el desarrollo del experimento

Lo más aconsejable es que la secuencia de realización de las pruebas no siga ningún orden, ya que una secuenciación excesiva de las pruebas podría introducir interferencias anómalas en el experimento, como errores por distracción del experimentador en las últimas pruebas.

Si se incluyen ***replicaciones*** o repeticiones de las pruebas, ha de actuarse, siempre que sea posible, de forma equilibrada: se hablará de ***diseño balanceado o equilibrado*** cuando todas las pruebas se repitan un mismo número de veces. Esto permitirá analizar el error experimental (ya que una misma prueba no proporciona 2 veces el mismo resultado exactamente). Además, las replicaciones aumentan los grados de libertad del experimento, teniéndose un análisis más robusto.

7. Análisis de los resultados: ANOVA

Una vez realizado el experimento y obtenidos los resultados, la variabilidad en los valores que ha tomado la variable respuesta se debe a:

1. A la variación de los factores estudiados según sus niveles.
2. A factores no considerados y al *ruido* experimental, que es el propio error inherente a cualquier experimento.

La variabilidad de la variable respuesta se recoge en lo que se llama la suma de cuadrados del experimento, que conceptualmente se asimila a la suma de errores al cuadrado:

$$SC_{total} = \sum_i (x_i - \bar{x})^2$$

Siguiendo la idea de que la variabilidad total del experimento es la suma de una variabilidad debida a los factores y de una variabilidad no controlada o *residual*, se tiene:

$$SC_{total} = \sum SC_{factores} + SC_{residual}$$

Resulta obvio que la influencia de un factor determinado sobre la variabilidad de la variable respuesta será tanto más importante cuanto mayor sea la suma de cuadrados asociada a éste, o dicho de otro modo: a mayor suma de cuadrados de un factor, más influyente es.

No obstante, la afirmación anterior se tiene que matizar, porque no es lo mismo un factor con 2 niveles de variación que uno con 4 niveles. En este sentido, es fácil entender que un factor para el que se han considerado muchos niveles de variación producirá mayor variabilidad en la respuesta que un factor considerado a pocos niveles.

Para relativizar la influencia de cada factor en la variabilidad de la variable respuesta en función del número de niveles considerado para cada uno, se introduce el concepto de *grados de libertad* tanto del experimento como de los factores, y a continuación el concepto de *cuadrado medio*, que es el cociente entre la suma de cuadrados y los grados de libertad del factor (la relativización de la suma de cuadrados según el número de niveles del factor).

Si el experimento consta en total de un número N de pruebas, entonces se dice que el experimento tiene N-1 grados de libertad totales.

Un factor F_i para el que se consideran N_{fi} niveles, tendrá N_{fi}-1 grados de libertad.

La diferencia entre los grados de libertad totales y la suma de los grados de libertad de todos los factores es igual a los grados de libertad del *residuo*. En este sentido, se habla de residuo como un factor más, y es el que agruparía toda la parte de variación que no queda explicada por los factores.

En resumen, se tiene:

Grados de libertad totales: $glt = N - 1.$

Grados de libertad de los factores: $glf = \sum_i (N_{fi} - 1).$

Grados de libertad residuales: $glr = glt - glf.$

En general se recomienda que $glr \geq 4$ para que un ANOVA se pueda considerar robusto, esto es, para que las conclusiones que de él se derivan se puedan considerar como tales. Hay diversas formas de aumentar los grados de libertad residuales en fase de diseño del experimento:

- Aumentar el número de pruebas.
- Reducir el número de factores considerados.
- Replicar el diseño (realizar todas las pruebas 2 veces).

El análisis de la varianza se suele hacer con la ayuda de paquetes informáticos, por lo que interesa comentar cómo se deben interpretar los resultados de los mismos, tanto en forma de tablas como salidas gráficas.

8. Análisis de la varianza (ANOVA) con Statgraphics*

Este epígrafe no pretende ser un manual del software Statgraphics, sino una iniciación a la interpretación de las tablas de anova y los gráficos del análisis de la varianza necesarios para poder pretender realizar un buen diseño del experimento.

Tras introducir los datos y resultados del experimento en el programa y solicitar el análisis de la varianza, el programa realiza contrastes de hipótesis y se obtiene una tabla de anova, que tiene el siguiente aspecto:

Analysis of Variance for DIAMETER - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	DF	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:ADMIXTURE	21896,8	2	10948,4	3,55	0,0397
B:CEMENT	11193,6	2	5596,82	1,82	0,1781
C:FILLER	23011,3	3	7670,43	2,49	0,0769
D:GRAVEL	6543,29	2	3271,64	1,06	0,3571
E:SAND	15466,4	3	5155,48	1,67	0,1912
F:WATER	10467,2	2	5233,59	1,70	0,1982
RESIDUAL	104776,0	34	3081,66		
TOTAL (CORRECTED)	191167,8	48			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

* Statgraphics Plus 5.1, © 1994 – 2001 Statistical Graphics Corp.

Cada fila de la tabla corresponde a uno de los factores considerados. En la columna **Df** se indican los grados de libertad de los factores y los que quedan para el residuo.

Antes de comenzar a sacar conclusiones debemos comprobar que el número de grados de libertad residuales es superior a 4.

Observando los p-valores mostrados en la columna **P-Value**, aquellos factores con p-valor *igual o inferior a 0,05* serán considerados estadísticamente significativos: tienen un efecto considerable sobre la variable respuesta. El valor límite de p-valor igual a 0,05 resulta de admitir una confianza del 95%.

Los factores con p-valores muy grandes son claramente no significativos. La forma lógica de proceder con ellos es eliminarlos y repetir el análisis sin tomarlos en consideración. Se procede así porque, ya que se conoce que un factor no es influyente, al no considerarlo se están ganando grados de libertad para el residuo, y con ello se clarifica más la consideración de significancia o no de los efectos de los otros factores.

En el caso de la tabla anterior, el factor ADMIXTURE aparece con un p-valor = 0,0397, por lo que su efecto sobre DIAMETER es estadísticamente significativo. Para FILLER se tiene un p-valor = 0,0769, próximo a 0,05 aunque superior. El factor GRAVEL, con un p-valor = 0,3571 es claramente no influyente. No considerándolo se obtiene:

Analysis of Variance for DIAMETER - Type III Sums of Squares

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:ADMIXTURE	22554,0	2	11277,4	3,65	0,0361
B:CEMENT	9618,87	2	4809,44	1,56	0,2258
C:FILLER	24604,4	3	8201,46	2,65	0,0633
D:SAND	16382,1	3	5460,7	1,77	0,1711
E:WATER	10868,1	2	5434,04	1,76	0,1878
RESIDUAL	111328,0	36	3092,22		
TOTAL (CORRECTED)	191167,0	48			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

En esta segunda tabla de anova se tiene el factor FILLER con un p-valor = 0,0633, se ha visto disminuido respecto del valor que tenía en la tabla anterior y queda aún más cercano a 0,05. Por ello, en este caso se podría concluir que dicho factor también es influyente, aunque esta afirmación ya no cuenta con un nivel de confianza del 95%, sino del 100 – 6,33 = 93,67%. Por lo tanto, solo ADMIXTURE y FILLER tienen un efecto estadísticamente significativo sobre la variable respuesta DIAMETER; el resto, no.

Existe también una forma gráfica para deducir las conclusiones anteriores, referentes a qué factores son influyentes y cuáles no: son los **gráficos de intervalos LSD** (siglas de *Least Significative Difference*). En ellos se representa un segmento para cada nivel del factor seleccionado. En el caso de factores de tipo cualitativo[3], cuando los segmentos se solapan entre sí, la influencia del factor no es estadísticamente influyente; cuando los segmentos claramente no se solapan, el factor es influyente. En la figura 1 se muestra un ejemplo de cada caso. En el caso de factores de tipo cuantitativo no se puede concluir que un factor sea significativo o no a partir de un gráfico de intervalos LSD, éste simplemente aportaría información de la tendencia (crecimiento, decrecimiento, forma cuadrática, etc) en la variable respuesta producida por la variación del factor.

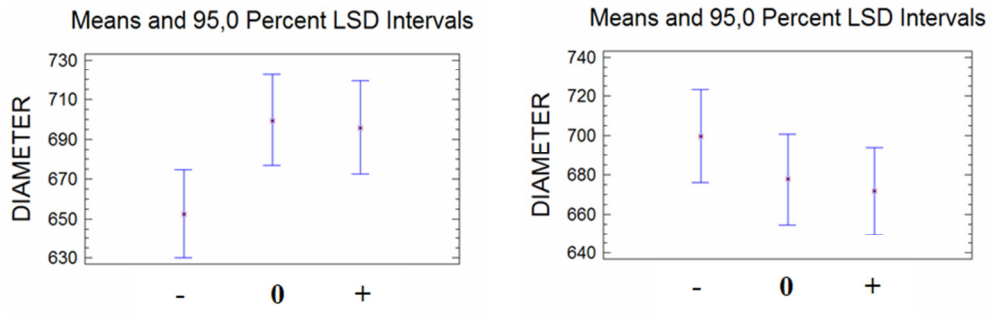


Fig. 1. Comparación del gráfico LSD de un factor cualitativo influyente con otro no influyente.

9. Estudios de regresión con Statgraphics

Tras determinar con el análisis de la varianza los factores que tienen un efecto estadísticamente significativo sobre una variable respuesta, el objetivo último de un estudio de regresión es llegar a obtener una expresión matemática que estime los valores de una variable aleatoria Y a partir de los valores de una o más variables (aleatorias o no) de las que la primera depende, X_i, que ecuación que constituirá la formulación matemática de un modelo.

Las consideraciones teóricas y cálculos que se realizan en un estudio de regresión no se tratarán en el presente texto porque los estudios de regresión en la práctica se llevan a cabo con la ayuda de un paquete informático. Aquí se seguirá utilizando el Statgraphics.

[3] Un factor de tipo cualitativo es aquél que no es continuo. Por ejemplo, el hecho de usar cohesionante o no en la fabricación del hormigón, tendríamos el factor COHESIONANTE con dos niveles: sí y no, que normalmente se denotan por 1 y 0.

En una primera aproximación, se considerarán solo aquellos factores cuyo efecto ha resultado ser estadísticamente significativo en el análisis de la varianza. Tras ello, se obtiene una tabla como la siguiente:

Multiple Regression Analysis

Dependent variable: DIAMETER

Parameter	Estimate	Standard Error	T Statistic	P-Value
CONSTANT	-1243,88	8601,97	-0,144604	0,8857
ADMIXTURE	3375,4	2230,37	1,51338	0,1375
FILLER	-119,846	73,6768	-1,62665	0,1111
ADMIXTURE^2	-274,921	185,952	-1,47845	0,1466
FILLER^2	0,397021	0,245933	1,61435	0,1108
WATER/CEMENT	1009,53	403,822	2,7228	0,0093

Analysis of Variance

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
Model	57841,7	5	11568,3	3,73	0,0068
Residual	133326,0	43	3100,6		
Total (Corr.)	191167,0	48			

R-squared = 30,2571 percent
R-squared (adjusted for d.f.) = 22,1474 percent
Standard Error of Est. = 55,683
Mean absolute error = 40,6141
Durbin-Watson statistic = 2,84462 (P=0,0008)
Lag 1 residual autocorrelation = -0,423571

Para interpretar los resultados, la atención debe centrarse especialmente en lo que ha sido recuadrado en rojo: las columnas **Parameter**, **P-Value** y los valores de **R-squared**.

En la columna **Parameter** encontraremos, además de los factores que han sido considerados en el estudio de regresión, un factor llamado CONSTANT que el programa considera por defecte y que se correspondería con la constante aditiva de la ecuación, lo que en una recta sería la ordenada en el origen.

El **P-Valor** de nuevo indica la significancia de la introducción del factor en cuestión en el modelo. Así, los que aparezcan con un p-valor > 0,05 son aquéllos cuya consideración o no consideración en el modelo no afecta especialmente al nivel de ajuste obtenido. Dichos factores deben ser excluídos del modelo porque no contribuyen demasiado al buen ajuste del modelo y sin embargo sí que complican la ecuación obtenida añadiendo términos innecesarios.

Una vez eliminados, se repite el análisis con solo los factores con p-valores < 0,05. Diremos que un ajuste o estudio de regresión es "bueno" cuando los valores que proporciona la ecuación encontrada en función de los factores se aproximan considerablemente a los valores realmente observados. El parámetro **R-squared** o R^2 es una medida de este ajuste: un R^2 próximo al 100% indica que la ecuación que se ha encontrado con la regresión es prácticamente la "exacta", mientras que un R^2 bajo indica que no se ha conseguido un buen ajuste. El programa también proporciona un valor **R-squared (adjusted for d.f.)**, que no es más que el valor de R^2 "relativizado" al tamaño del experimento, y solo sirve para comparar la calidad de las regresiones conseguidas en experimentos con distinto número de pruebas.

Se tiene que llegar a un compromiso entre la exactitud (maximizar el R^2 del ajuste) y la simplicidad de la ecuación. Para aumentar el valor del R^2 se procederá a ir modificando los factores considerados, interacciones e incluso funciones de los factores (exponencial, elevado al cuadrado, etc), retirando los que presenten p-valores > 0,05. Es importante destacar que la ecuación que se encuentre debe revestir un cierto significado físico, y en la mayoría de casos no tendrá sentido considerar funciones extrañas.

El mismo programa proporcionará el valor de la ecuación correspondiente al ajuste, y en este punto hay que recordar que no siempre se podrá llegar hasta esta situación: puede que la variable que se trata de relacionar con los factores presente demasiada variabilidad no controlada, que no se hayan considerado los factores adecuados, o que simplemente el experimento esté mal concebido.

Por último, cualquier paquete informático ofrece salidas gráficas interesantes también a nivel de los estudios de regresión. Por ejemplo, el Statgraphics ofrece la posibilidad de representar, una vez hecha la regresión, los valores observados frente a los calculados de la variable respuesta, de forma que cuanto más centrada esté la nube de puntos en torno a la recta bisectriz, mayor será la precisión de la ecuación obtenida. En la figura 2 se compara la gráfica de observados-calculados en un regresión con buen ajuste con la obtenida en una regresión con mal ajuste.

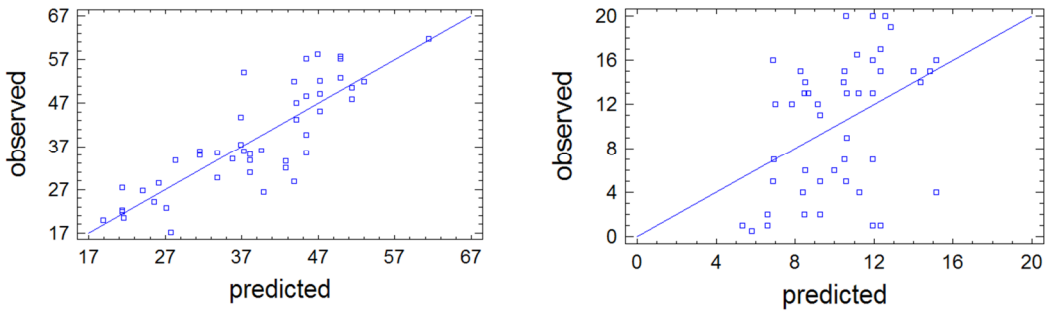


Fig.2. Comparación de un buen ajuste (izquierda) con un mal ajuste (dcha.).

Anejo: Catálogo de orthogonal arrays [4]

L8

Permite estudiar hasta 7 factores (todos a 2 niveles) en 8 pruebas.

Orthogonal array

Prueba	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2

Tabla de interacciones

1	2	3	4	5	6	7
1	3	2	5	4	7	6
	2	1	6	7	4	5
		3	7	6	5	4
			4	1	2	3
				5	3	2
					6	1

[4] Tomados de Romero y Zúnica, [3].

L16

Permite estudiar hasta 15 factores (todos a 2 niveles) en 16 pruebas.

Orthogonal array

Prueba	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2
4	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
5	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2
6	1	2	2	1	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1
7	1	2	2	2	2	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1
8	1	2	2	2	2	1	1	2	2	1	1	1	1	2	2
9	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
10	2	1	2	1	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1
11	2	1	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1
12	2	1	2	2	1	2	1	2	1	2	1	1	2	1	2
13	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	1
14	2	2	1	1	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2
15	2	2	1	2	1	1	2	1	2	2	1	2	1	1	2
16	2	2	1	2	1	1	2	2	1	1	2	1	2	2	1

Tabla de interacciones

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	3	2	5	4	7	6	9	8	11	10	13	12	15	14
	2	1	6	7	4	5	10	11	8	9	14	15	12	13
		3	7	6	5	4	11	10	9	8	15	14	13	12
			4	1	2	3	12	13	14	15	8	9	10	11
				5	3	2	13	12	15	14	9	8	11	10
					6	1	14	15	12	13	10	11	8	9
						7	15	14	13	12	11	10	9	8
							8	1	2	3	4	5	6	7
								9	3	2	5	4	7	6
									10	1	6	7	4	5
										11	7	6	5	4
											12	1	2	3
												13	3	2
													14	1

L9

Permite estudiar hasta 4 factores a 3 niveles en 9 pruebas.

Orthogonal array

Prueba	F1	F2	F3	F4
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

No se acompaña tabla de interacciones porque cada interacción doble se “reparte” entre los efectos simples de los otros factores.

L18

Permite estudiar 1 factor a 2 niveles y hasta 7 factores a 3 niveles en 18 pruebas.

Orthogonal array

Prueba	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

Tampoco se acompaña tabla de interacciones porque sucede lo mismo que en el L9.

L27

Permite estudiar hasta 13 factores a 3 niveles en 27 pruebas.

Orthogonal array

Prueba	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

Tabla de interacciones

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	3	2	2	6	5	5	9	8	8	12	11	11
	4	4	3	7	7	6	10	10	9	13	13	12
	2	1	1	8	9	10	5	6	7	5	6	7
		4	3	11	12	13	11	12	13	8	9	10
		3	1	9	10	8	7	5	6	6	7	5
			2	13	11	12	12	13	11	10	8	9
			4	10	8	9	6	7	5	7	5	6
				12	13	11	13	11	12	9	10	8
				5	1	1	2	3	4	2	4	8
					7	6	11	13	12	8	10	9
					6	1	4	2	3	8	2	4
						5	13	12	11	10	9	8
						7	3	4	2	4	3	2
							12	11	13	9	8	10
							8	1	1	2	3	4
								10	9	5	7	6
								9	1	4	2	3
									8	7	6	5
									10	3	4	2
										6	7	7
										11	1	1
											13	12
											12	1
												11

ANEJO 2

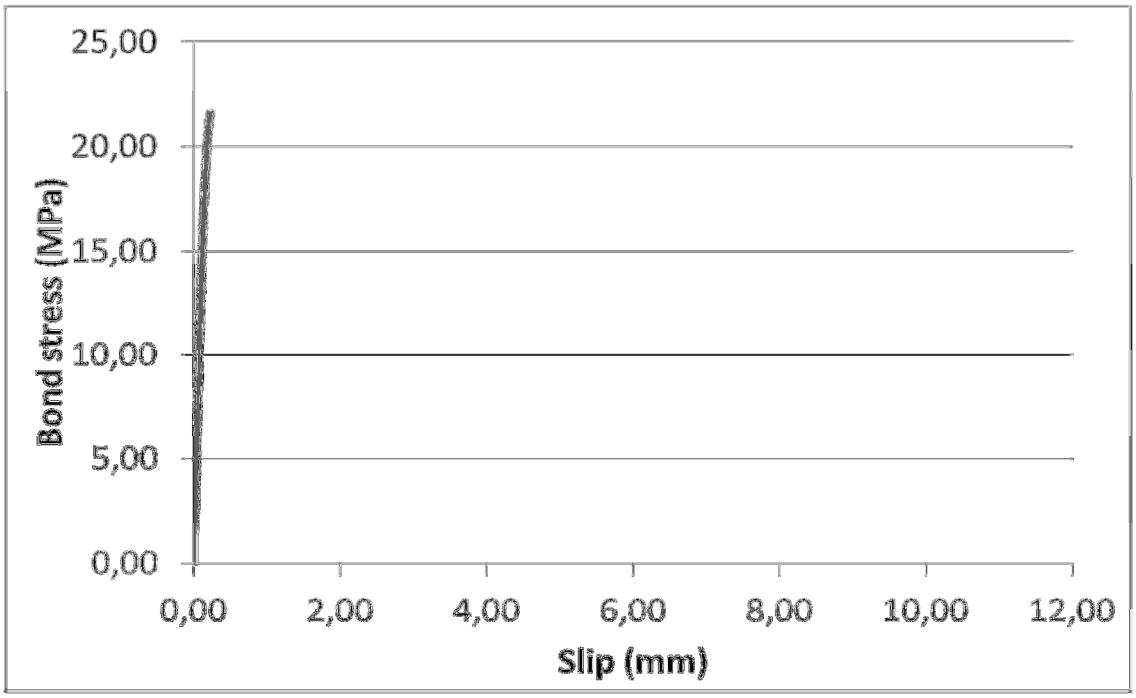
GRÁFICAS Y TABLAS DE RESULTADOS ENSAYOS PULL-OUT

GRÁFICA ENSAYO L1 PROBETA 1

Diámetro de la barra	8	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	2,5	
Contenido de Fibras	0	Kg/m3
Tipo de Fibras	Sin fibras	

Curva final tracción-deslizamiento

Splitting/Estallido



Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

- Tensión máxima de adherencia: 21,6 MPa
- Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia: 1 mm
- Área hasta el pico: 2,9 mmMPa
- Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia: 2,9 mmMPa
- Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia: 2,9 mmMPa

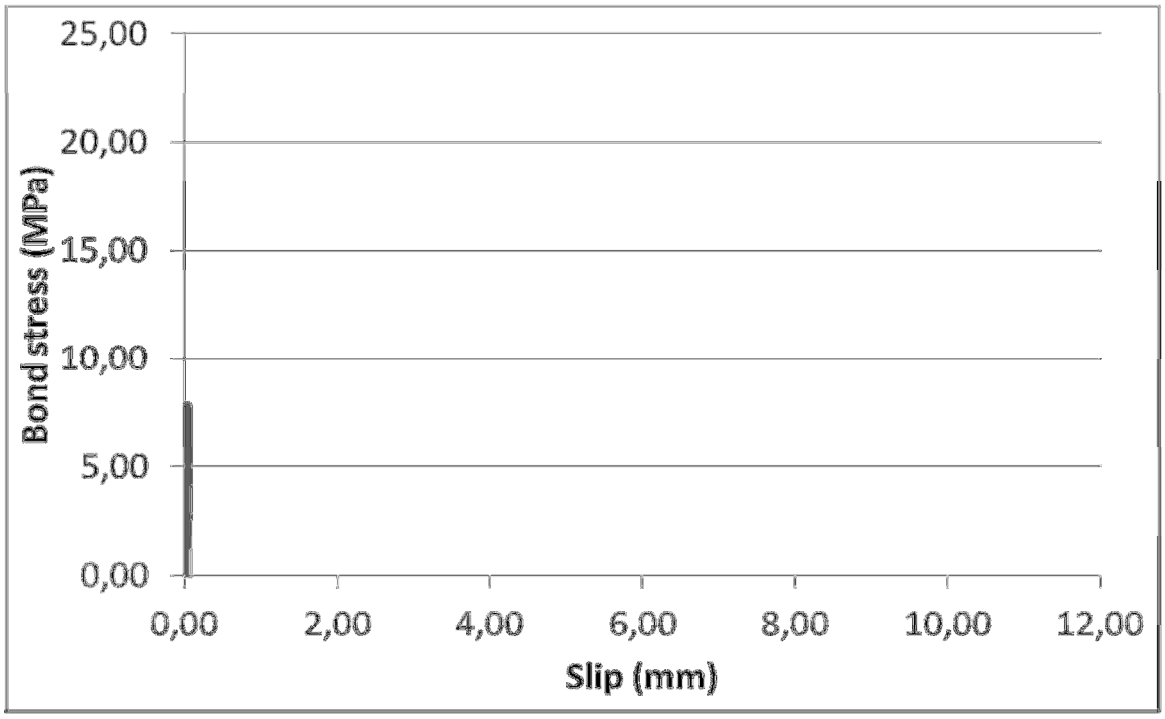
Rotura por **Splitting/Estallido**, resultados numéricos iguales en las áreas porque el modo de fallo ha sido por Estallido del recubrimiento de la barra y no por arrancamiento.

GRÁFICA ENSAYO L1 PROBETA 2

Diámetro de la barra	8	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	2,5	
Contenido de Fibras	0	Kg/m3
Tipo de Fibras	Sin fibras	

Curva final tracción-deslizamiento

Splitting/Estallido



Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	7,8	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	1	mm
▪ Área hasta el pico	0,2	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	0,2	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	0,2	mmMPa

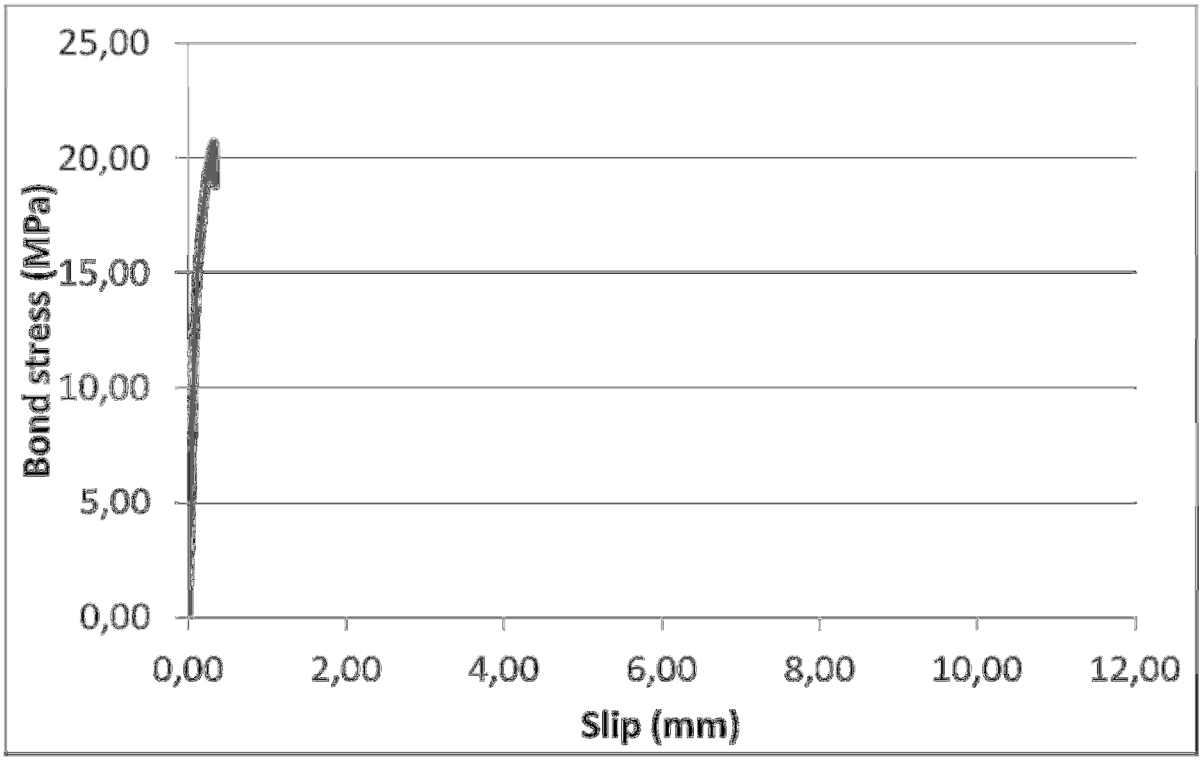
Rotura por **Splitting/Estallido**, resultados numéricos iguales en las áreas porque el modo de fallo ha sido por Estallido del recubrimiento de la barra y no por arrancamiento.

GRÁFICA ENSAYO L1 PROBETA 3

Diámetro de la barra	8	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	2,5	
Contenido de Fibras	0	Kg/m3
Tipo de Fibras	Sin fibras	

Curva final tracción-deslizamiento

Splitting/Estallido



Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

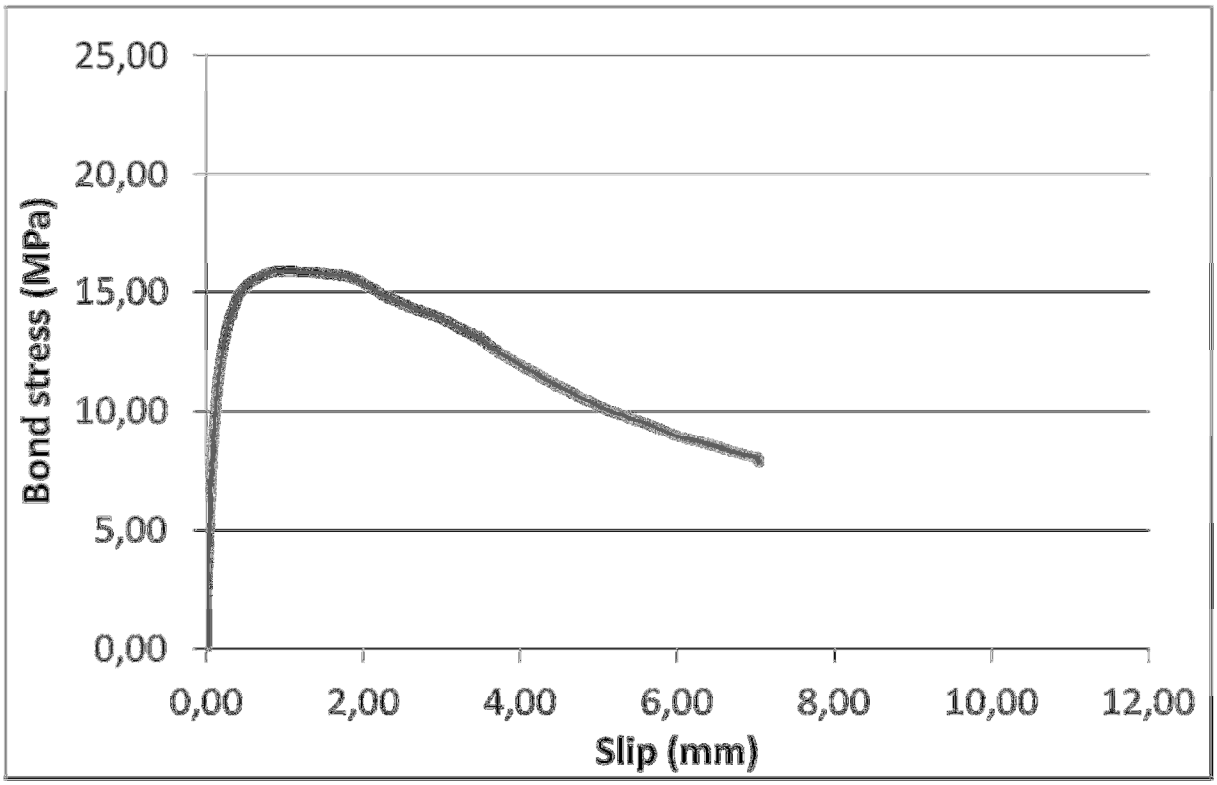
- Tensión máxima de adherencia: 20,7 MPa
- Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia: 1 mm
- Área hasta el pico: 4,7 mmMPa
- Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia: 4,7 mmMPa
- Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia: 4,7 mmMPa

Rotura por **Splitting/Estallido**, resultados numéricos iguales en las áreas porque el modo de fallo ha sido por Estallido del recubrimiento de la barra y no por arrancamiento.

GRÁFICA ENSAYO L2 PROBETA 1

Diámetro de la barra	12	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	3,5	
Contenido de Fibras	40	Kg/m3
Tipo de Fibras	80/50	

Curva final tracción-deslizamiento



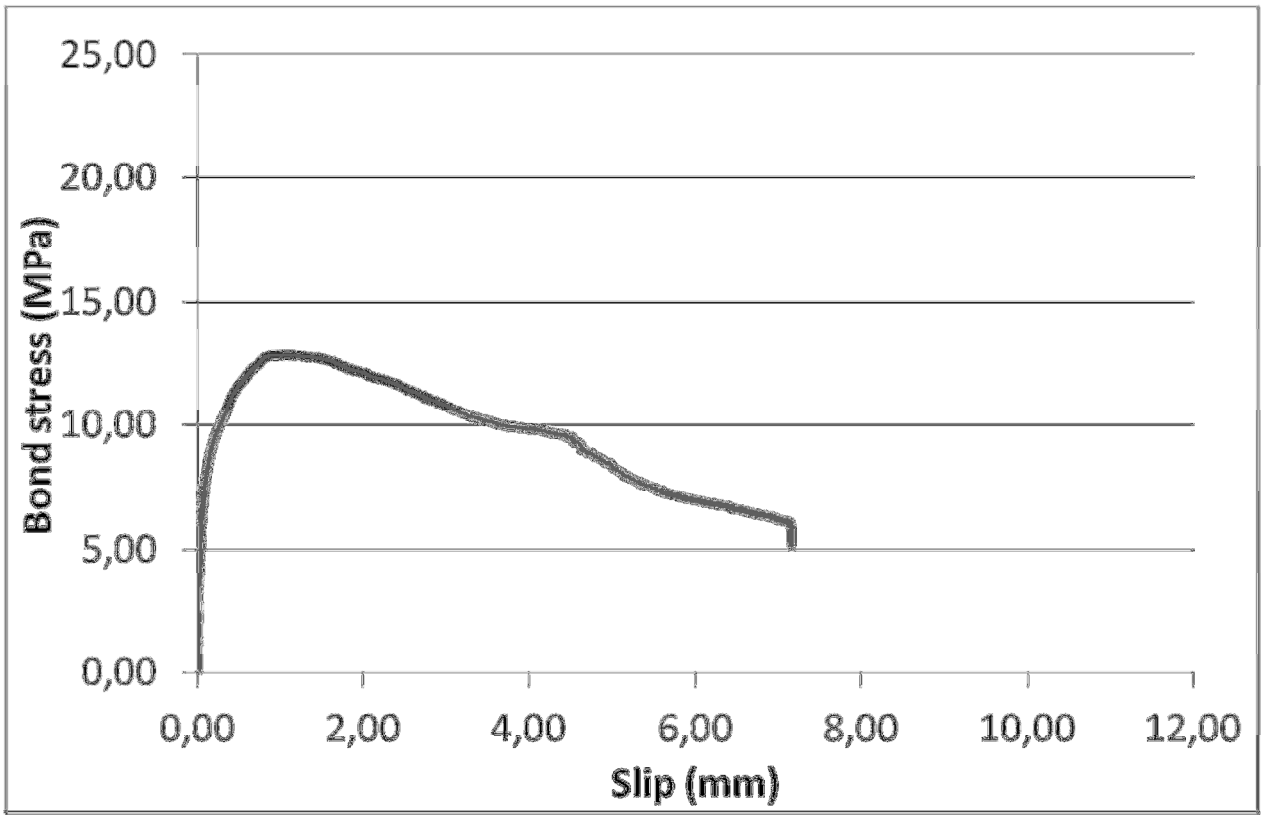
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	15,9	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	1	mm
▪ Área hasta el pico	12,2	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	52,6	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	86,7	mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L2 PROBETA 2

Diámetro de la barra	12	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	3,5	
Contenido de Fibras	40	Kg/m3
Tipo de Fibras	80/50	

Curva final tracción-deslizamiento



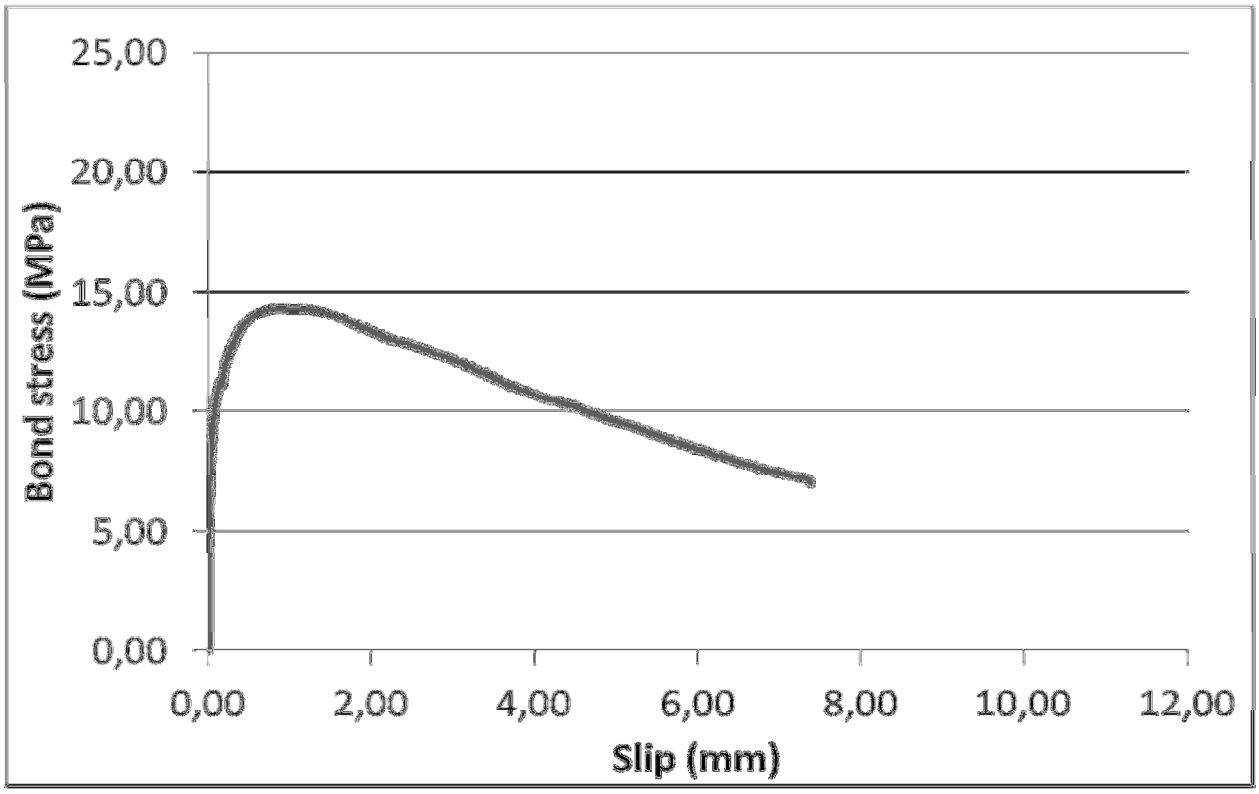
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	12,8	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	1,1	mm
▪ Área hasta el pico	12,2	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	38,5	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	66,5	mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L2 PROBETA 3

Diámetro de la barra	12	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	3,5	
Contenido de Fibras	40	Kg/m3
Tipo de Fibras	80/50	

Curva final tracción-deslizamiento



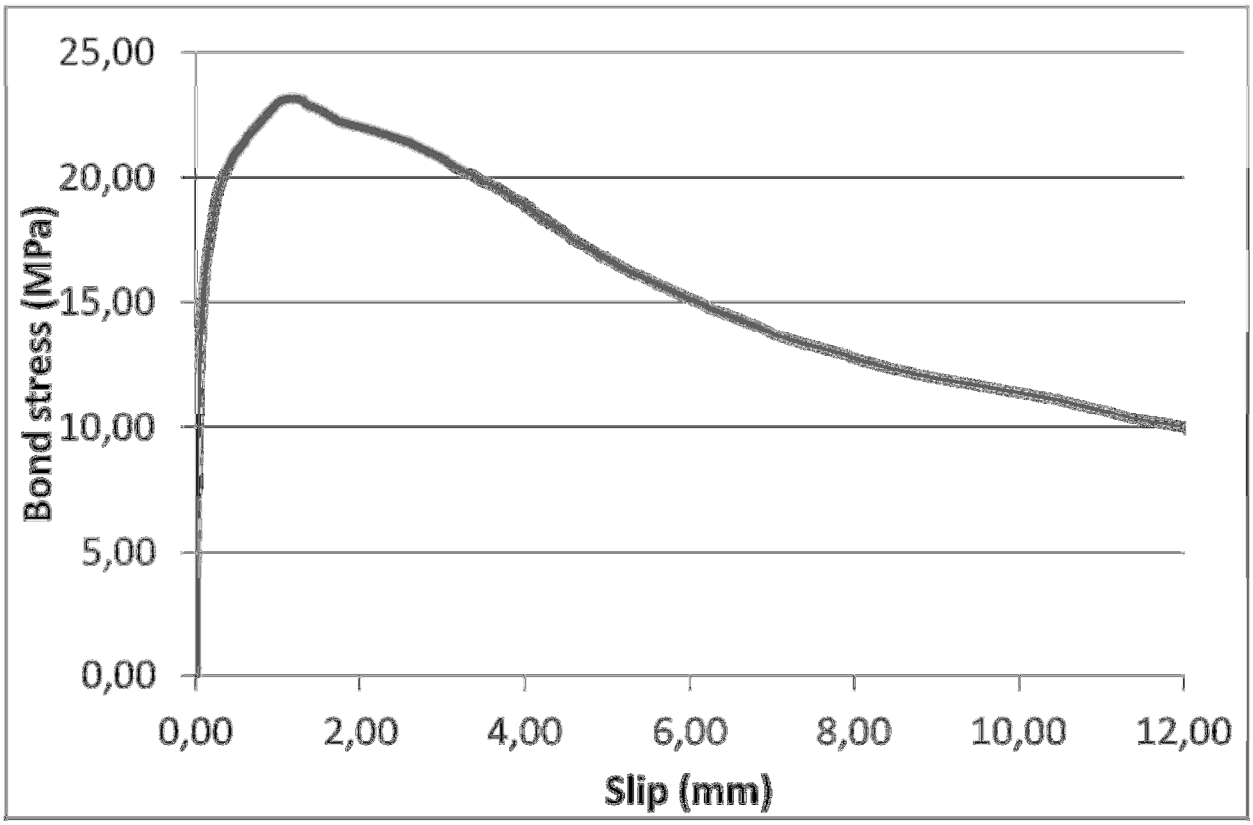
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	14,4	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	1	mm
▪ Área hasta el pico	10,5	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	45,8	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	81	MmMPa

GRÁFICA ENSAYO L3 PROBETA 1

Diámetro de la barra	16	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	5	
Contenido de Fibras	60	Kg/m3
Tipo de Fibras	80/50	

Curva final tracción-deslizamiento



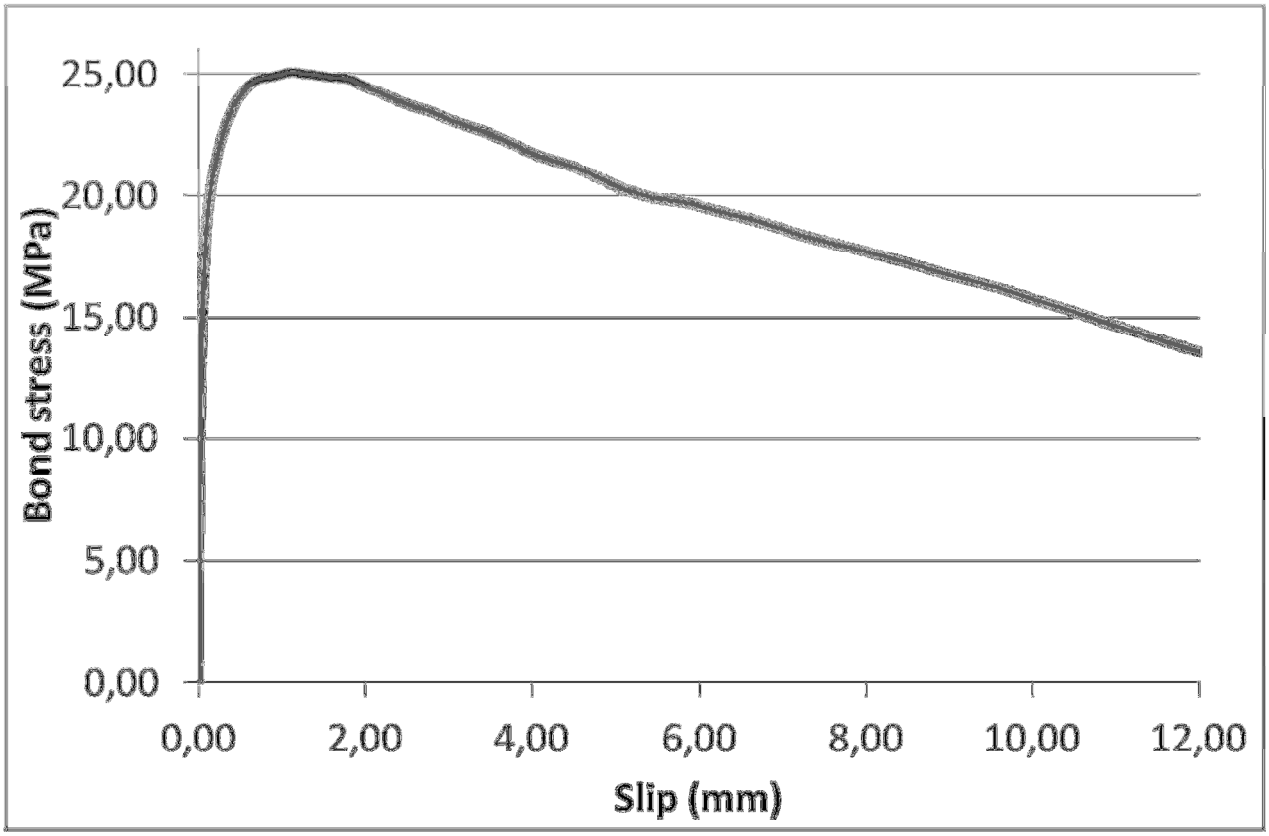
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

- Tensión máxima de adherencia: 23,2 MPa
- Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia: 1,1 mm
- Área hasta el pico: 23,5 mmMPa
- Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia: 86,6 mmMPa
- Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia: 166 mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L3 PROBETA 2

Diámetro de la barra	16	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	5	
Contenido de Fibras	60	Kg/m3
Tipo de Fibras	80/50	

Curva final tracción-deslizamiento



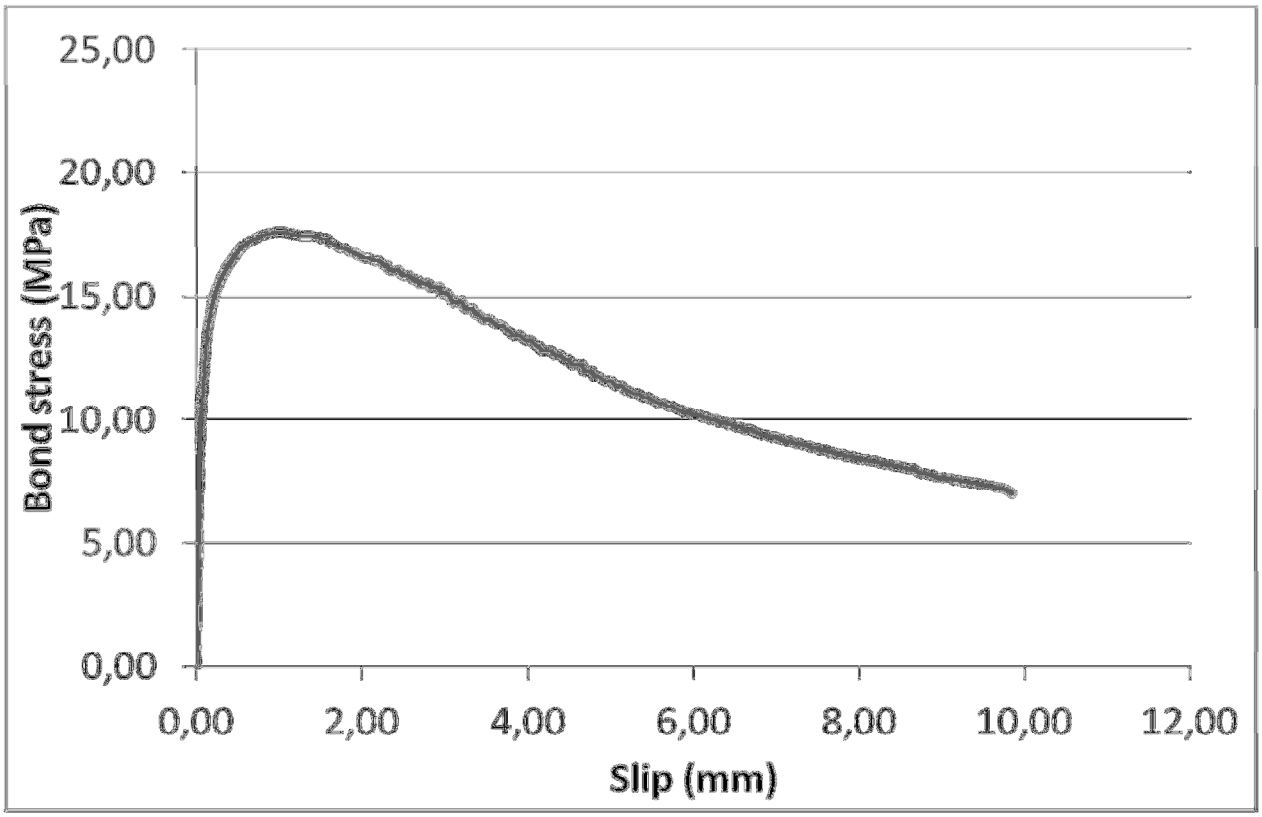
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

- Tensión máxima de adherencia: 25,1 MPa
- Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia: 1,2 mm
- Área hasta el pico: 25,6 mmMPa
- Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia: 120 mmMPa
- Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia: 249 mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L3 PROBETA 3

Diámetro de la barra	16	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	5	
Contenido de Fibras	60	Kg/m3
Tipo de Fibras	80/50	

Curva final tracción-deslizamiento



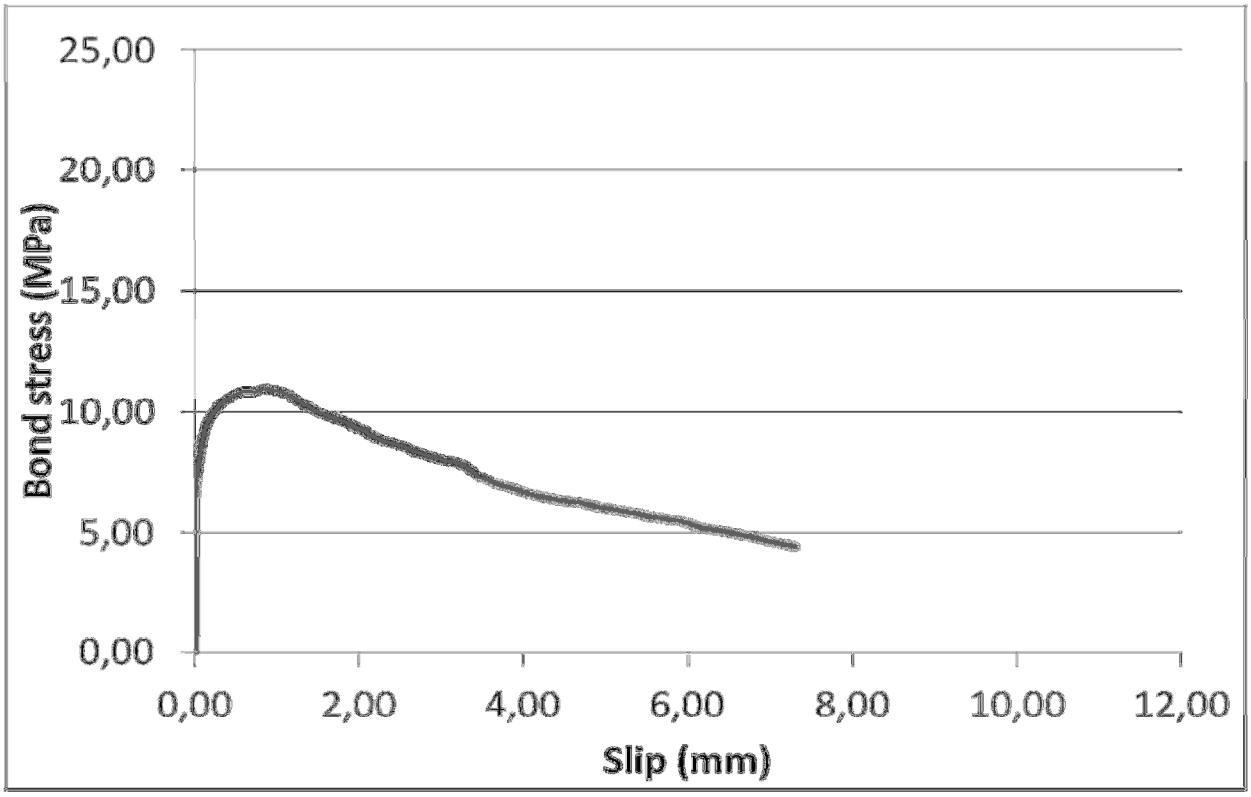
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

- Tensión máxima de adherencia: 17,6 MPa
- Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia: 1 mm
- Área hasta el pico: 14,5 mmMPa
- Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia: 50,1 mmMPa
- Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia: 100 mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L4 PROBETA 1

Diámetro de la barra	12	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	2,5	
Contenido de Fibras	60	Kg/m3
Tipo de Fibras	80/35	

Curva final tracción-deslizamiento



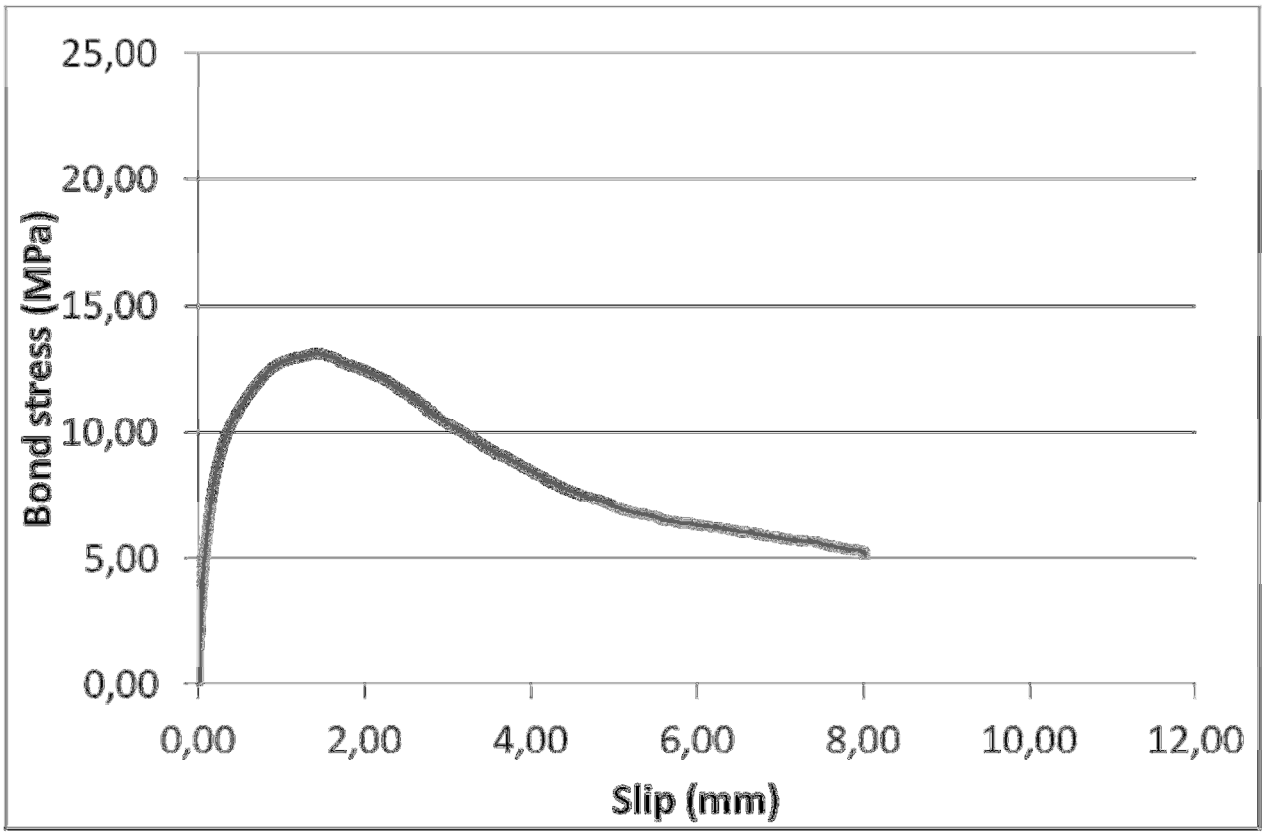
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	11	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	0,9	mm
▪ Área hasta el pico	8,5	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	23,4	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	47,9	mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L4 PROBETA 2

Diámetro de la barra	12	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	2,5	
Contenido de Fibras	60	Kg/m3
Tipo de Fibras	80/35	

Curva final tracción-deslizamiento



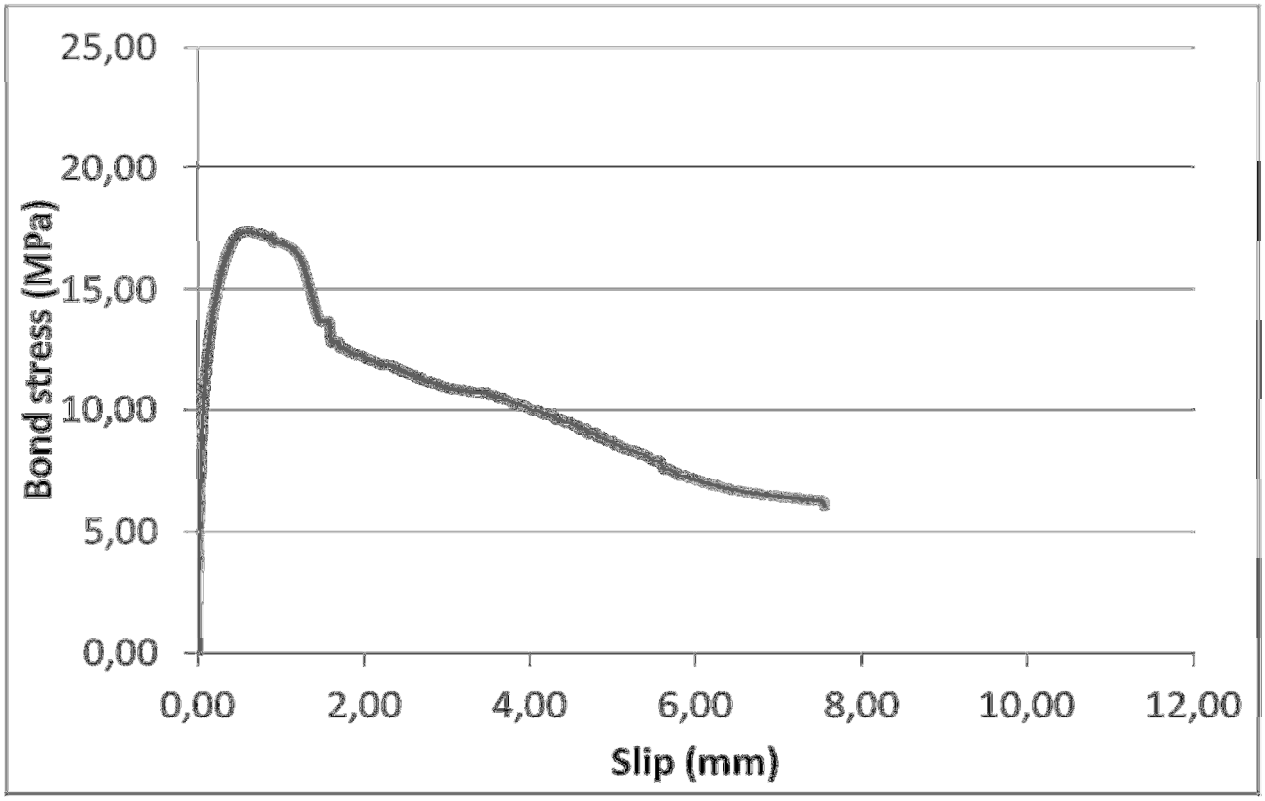
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	13,1	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	1,4	mm
▪ Área hasta el pico	15,6	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	34	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	55,6	mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L4 PROBETA 3

Diámetro de la barra	12	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	2,5	
Contenido de Fibras	60	Kg/m3
Tipo de Fibras	80/35	

Curva final tracción-deslizamiento



Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

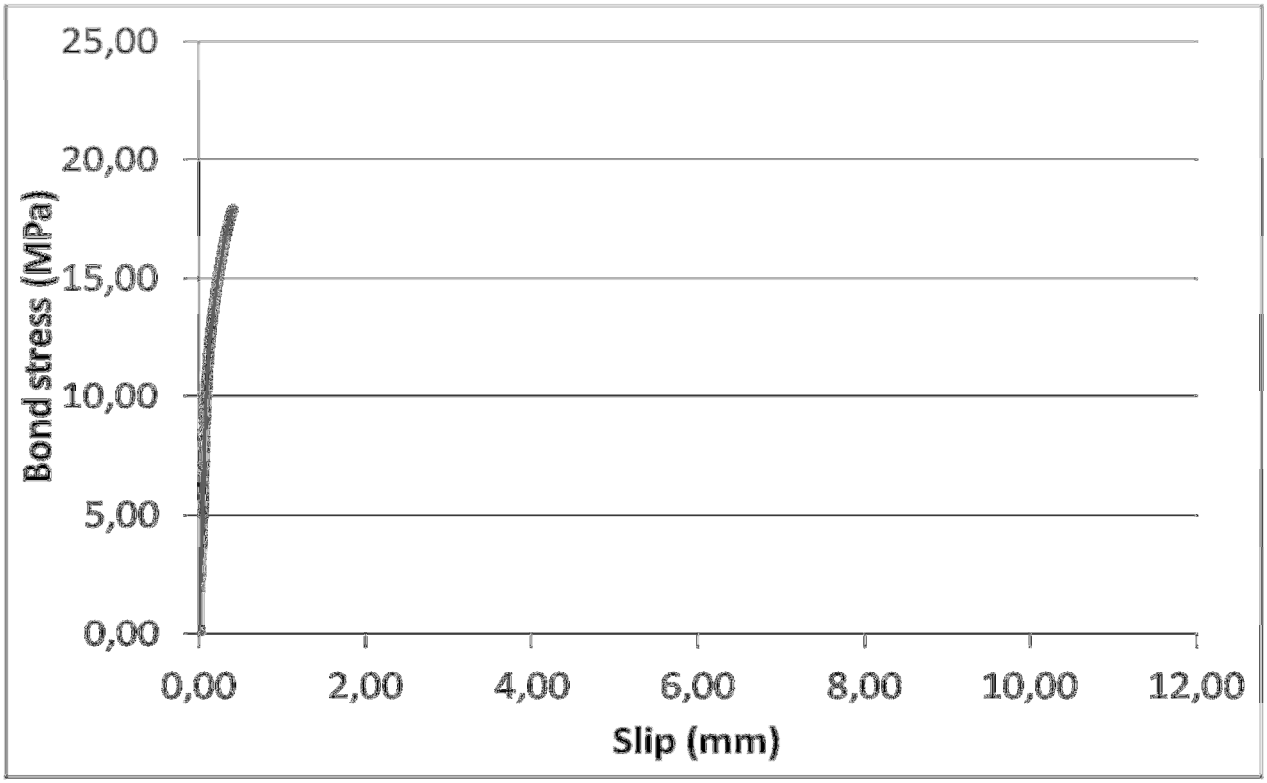
▪ Tensión máxima de adherencia	17,4	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	0,6	mm
▪ Área hasta el pico	8,4	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	23	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	61,3	mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L5 PROBETA 1

Diámetro de la barra	16	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	2,5	
Contenido de Fibras	40	Kg/m3
Tipo de Fibras	45/50	

Curva final tracción-deslizamiento

Splitting/Estallido



Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	17,9	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	1	mm
▪ Área hasta el pico	5,3	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	5,3	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	5,3	mmMPa

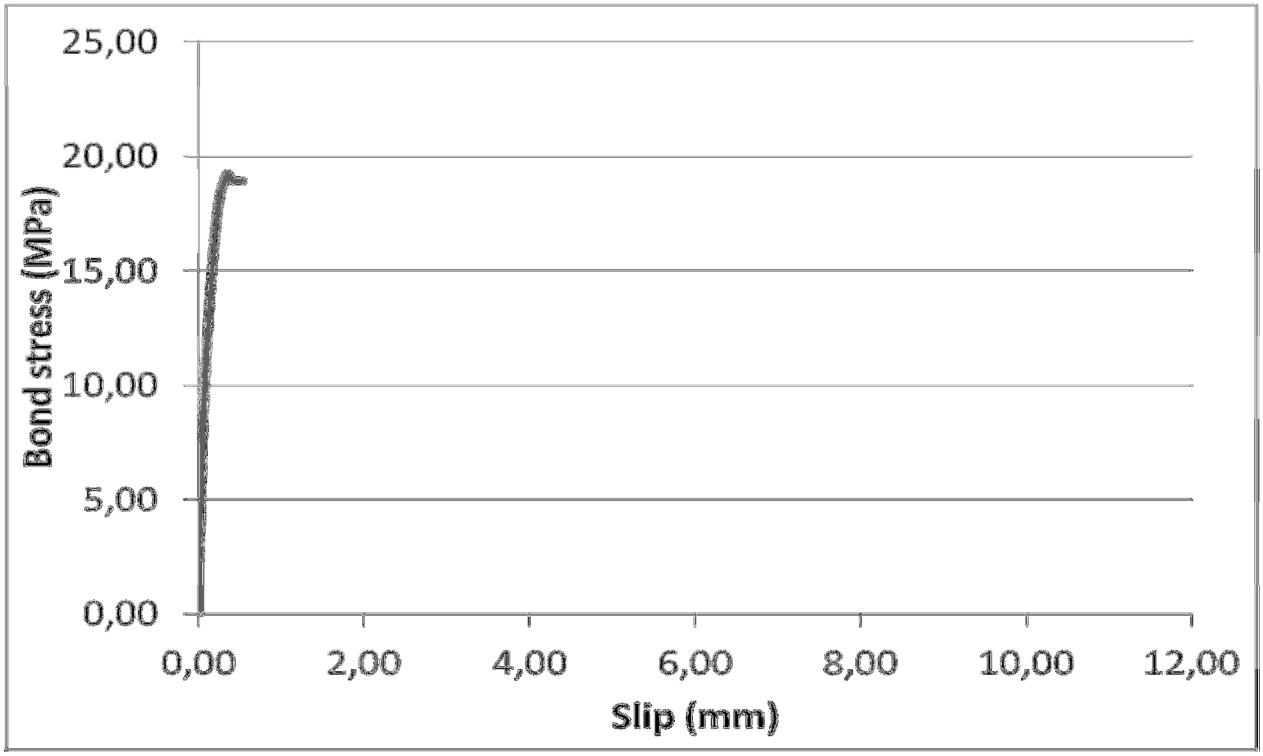
Rotura por Splitting/Estallido, resultados numéricos iguales en las áreas porque el modo de fallo ha sido por Estallido del recubrimiento de la barra y no por arrancamiento.

GRÁFICA ENSAYO L5 PROBETA 2

Diámetro de la barra	16	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	2,5	
Contenido de Fibras	40	Kg/m3
Tipo de Fibras	45/50	

Curva final tracción-deslizamiento

Splitting/Estallido



Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

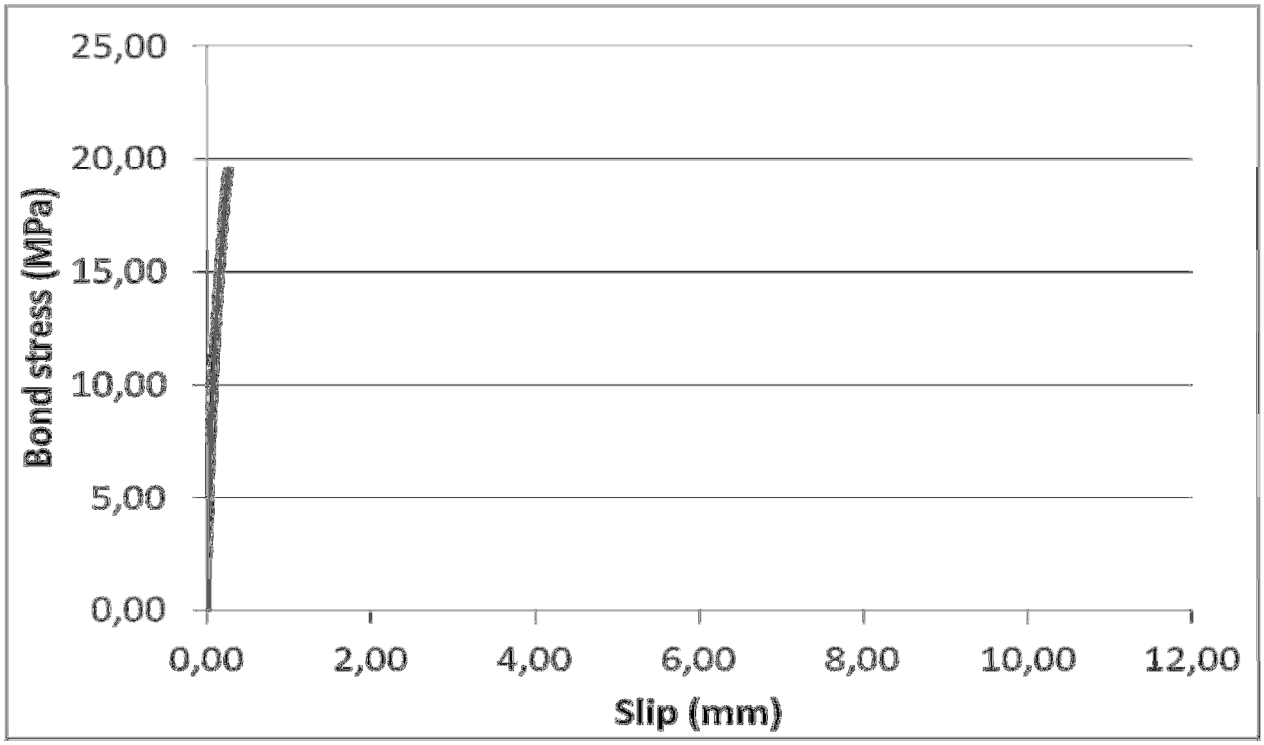
▪ Tensión máxima de adherencia	19,2	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	1	mm
▪ Área hasta el pico	4,9	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	4,9	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	4,9	mmMPa

Rotura por Splitting/Estallido, resultados numéricos iguales en las áreas porque el modo de fallo ha sido por Estallido del recubrimiento de la barra y no por arrancamiento.

GRÁFICA ENSAYO L5 PROBETA 3

Diámetro de la barra	16	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	2,5	
Contenido de Fibras	40	Kg/m3
Tipo de Fibras	45/50	

Curva final tracción-deslizamiento Splitting/Estallido



Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

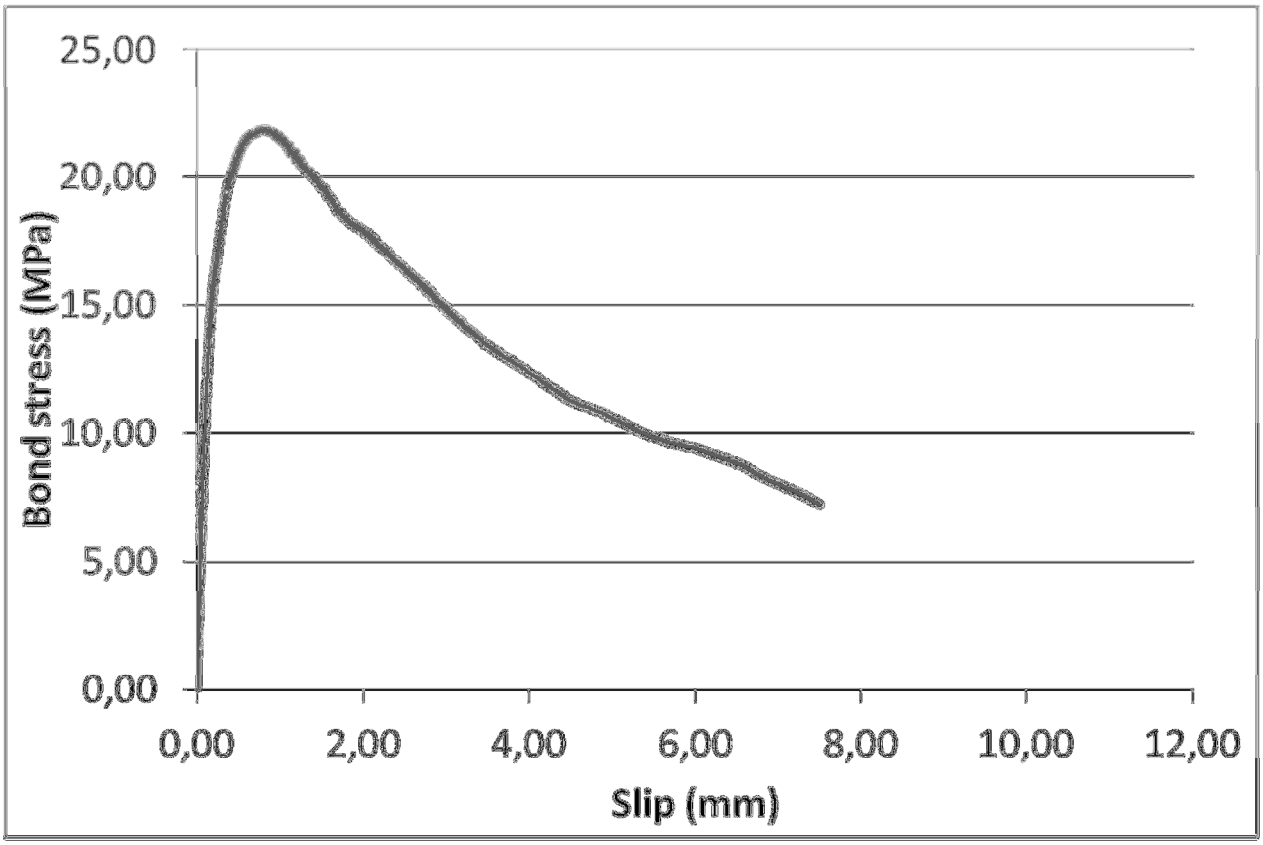
▪ Tensión máxima de adherencia	19,5	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	1	mm
▪ Área hasta el pico	3,4	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	3,4	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	3,4	mmMPa

Rotura por Splitting/Estallido, resultados numéricos iguales en las áreas porque el modo de fallo ha sido por Estallido del recubrimiento de la barra y no por arrancamiento.

GRÁFICA ENSAYO L6 PROBETA 1

Diámetro de la barra	8	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	3,5	
Contenido de Fibras	60	Kg/m3
Tipo de Fibras	45/50	

Curva final tracción-deslizamiento



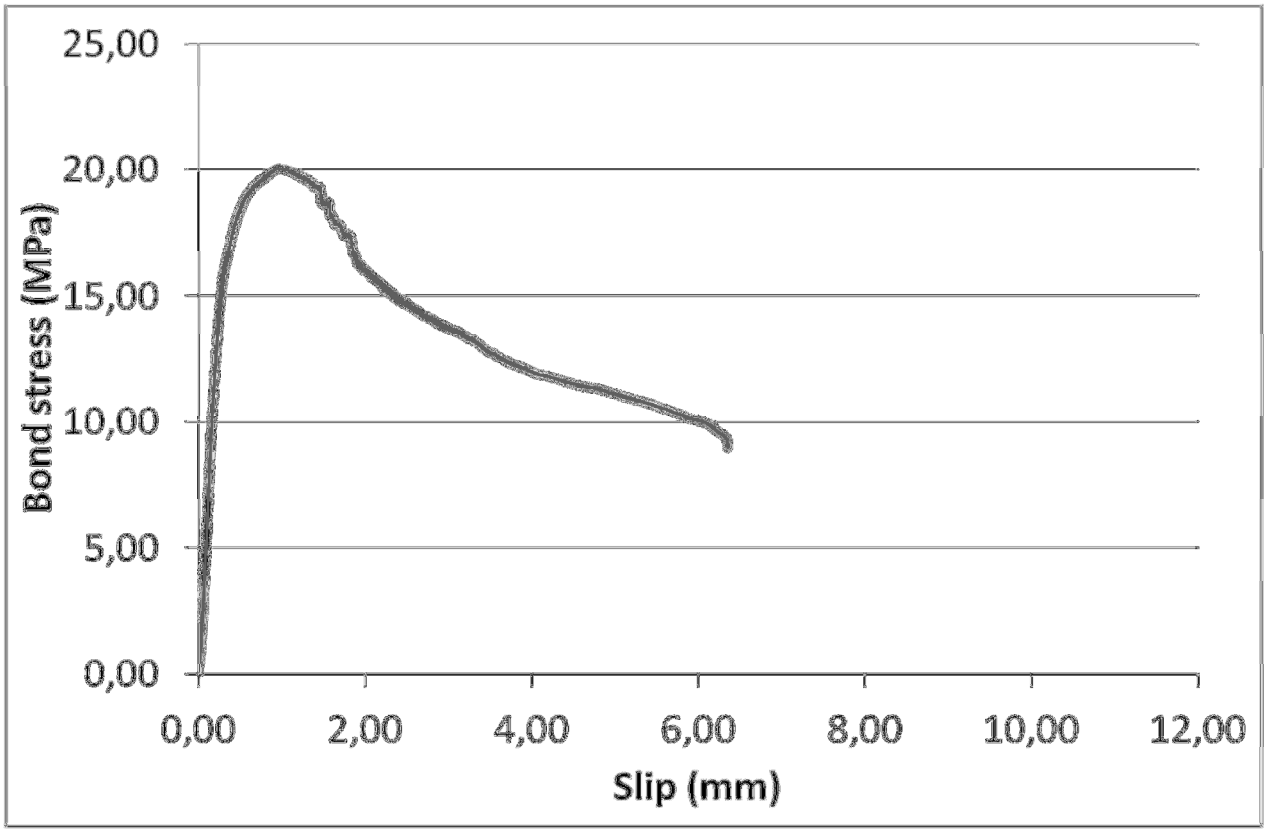
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	21,9	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	0,8	mm
▪ Área hasta el pico	14,1	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	40,6	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	77,7	mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L6 PROBETA 2

Diámetro de la barra	8	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	3,5	
Contenido de Fibras	60	Kg/m3
Tipo de Fibras	45/50	

Curva final tracción-deslizamiento



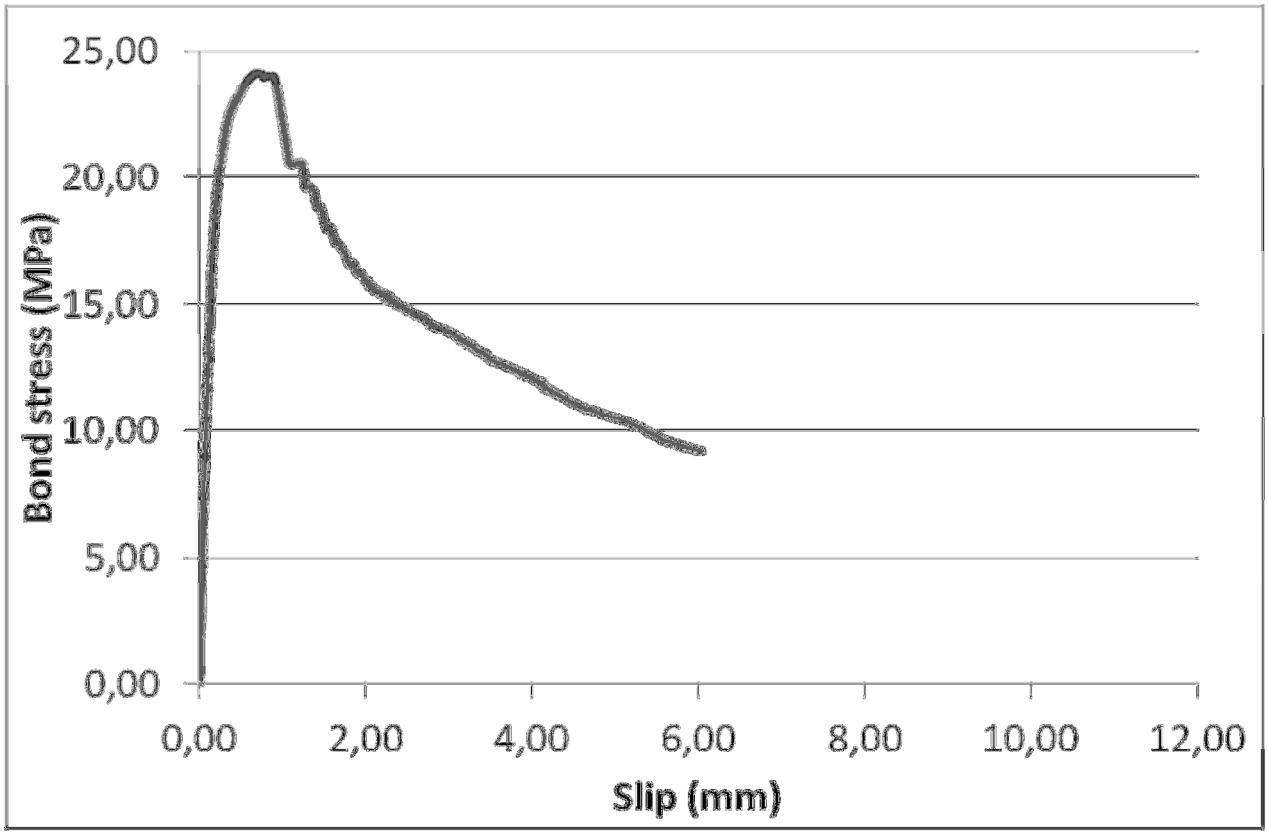
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	20	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	1	mm
▪ Área hasta el pico	14,9	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	33,9	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	84,5	mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L6 PROBETA 3

Diámetro de la barra	8	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	3,5	
Contenido de Fibras	60	Kg/m3
Tipo de Fibras	45/50	

Curva final tracción-deslizamiento



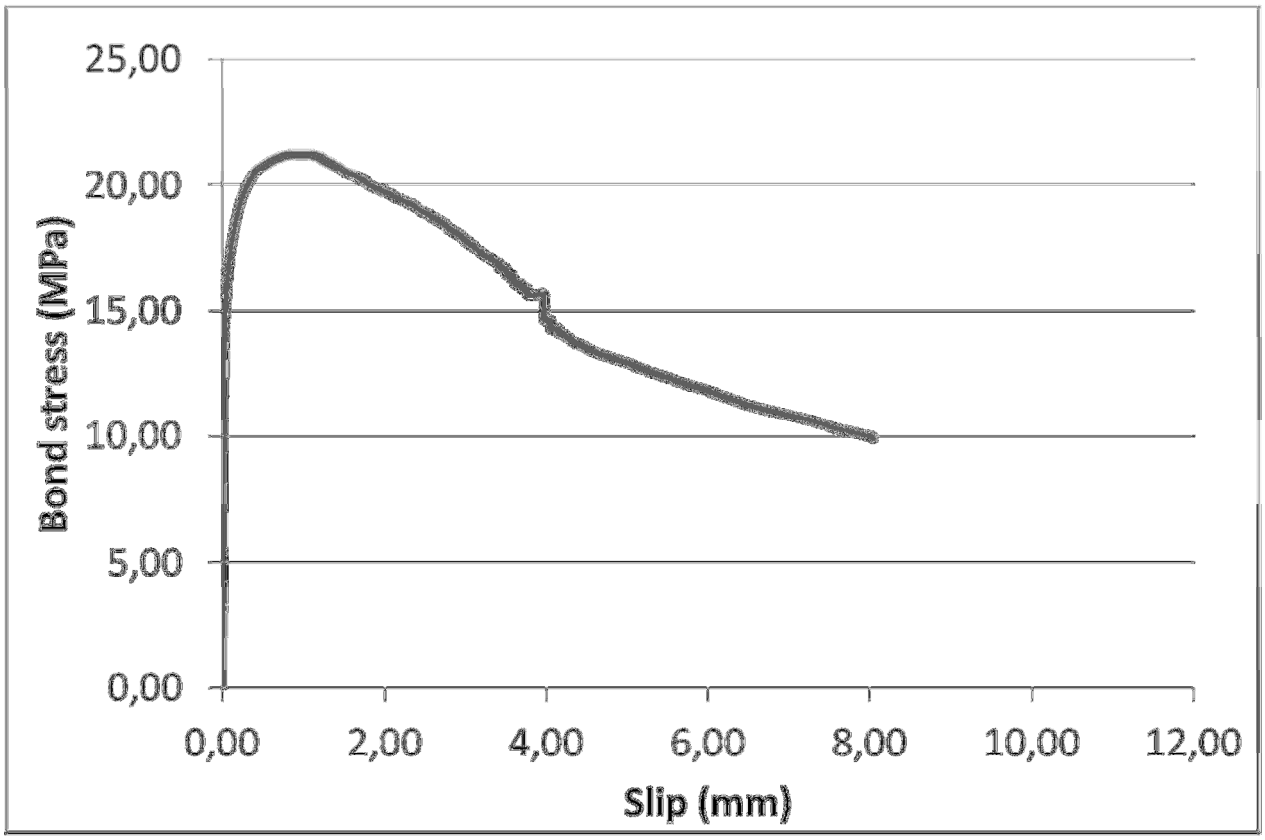
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	24,1	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	0,9	mm
▪ Área hasta el pico	12,8	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	28,4	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	66,1	mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L7 PROBETA 1

Diámetro de la barra	16	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	3,5	
Contenido de Fibras	0	Kg/m3
Tipo de Fibras	Sin fibras	

Curva final tracción-deslizamiento



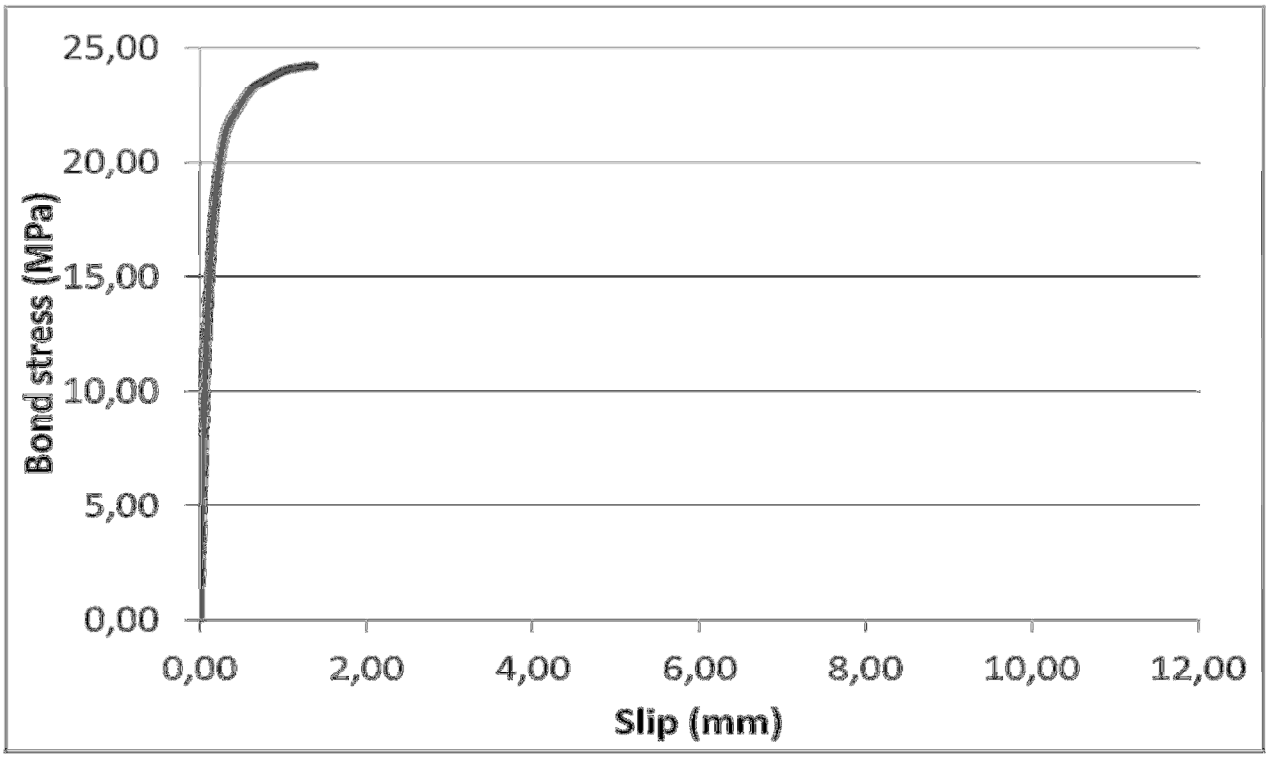
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	21,2	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	1	mm
▪ Área hasta el pico	19,5	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	65,9	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	117	mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L7 PROBETA 2

Diámetro de la barra	16	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	3,5	
Contenido de Fibras	0	Kg/m3
Tipo de Fibras	Sin fibras	

Curva final tracción-deslizamiento Splitting/Estallido



Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

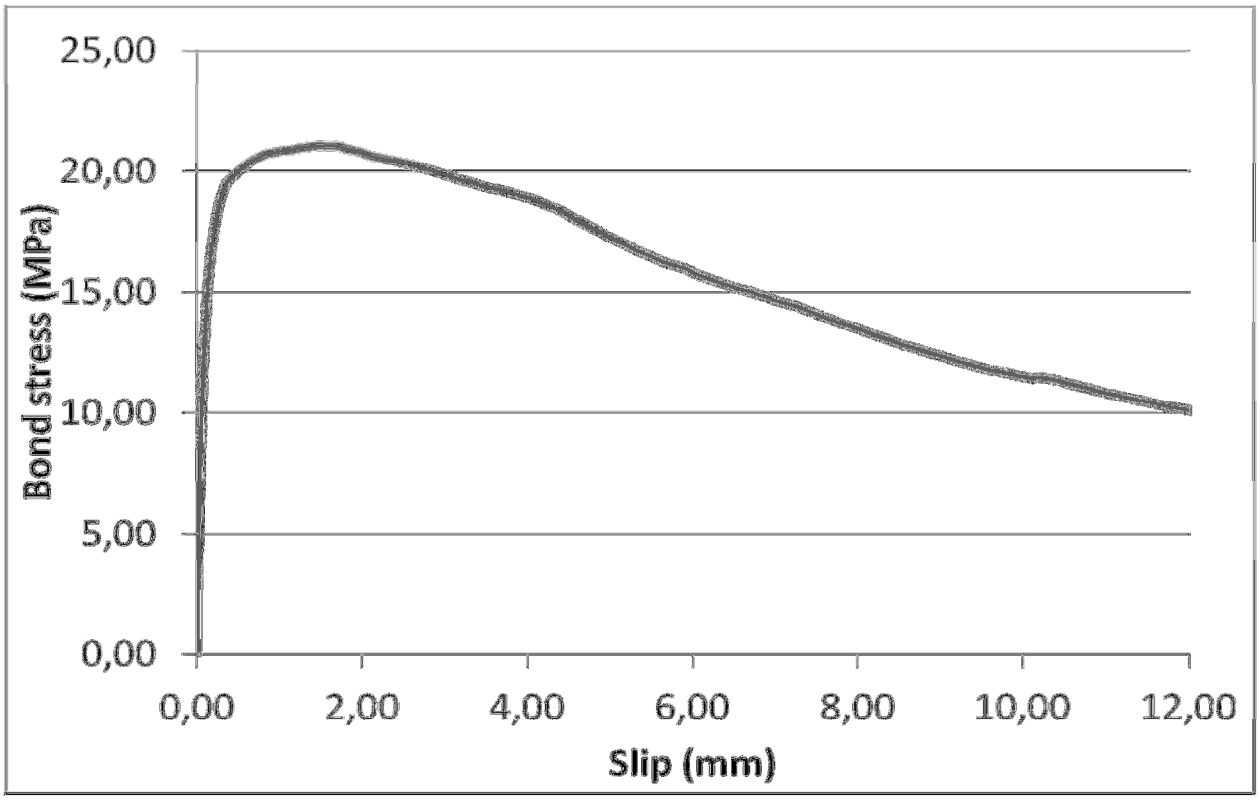
▪ Tensión máxima de adherencia	24,24	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	-	mm
▪ Área hasta el pico	28,15	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	28,15	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	28,15	mmMPa

Rotura por **Splitting/Estallido**, resultados numéricos iguales en las áreas porque el modo de fallo ha sido por Estallido del recubrimiento de la barra y no por arrancamiento.

GRÁFICA ENSAYO L7 PROBETA 3

Diámetro de la barra	16	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	3,5	
Contenido de Fibras	0	Kg/m3
Tipo de Fibras	Sin fibras	

Curva final tracción-deslizamiento



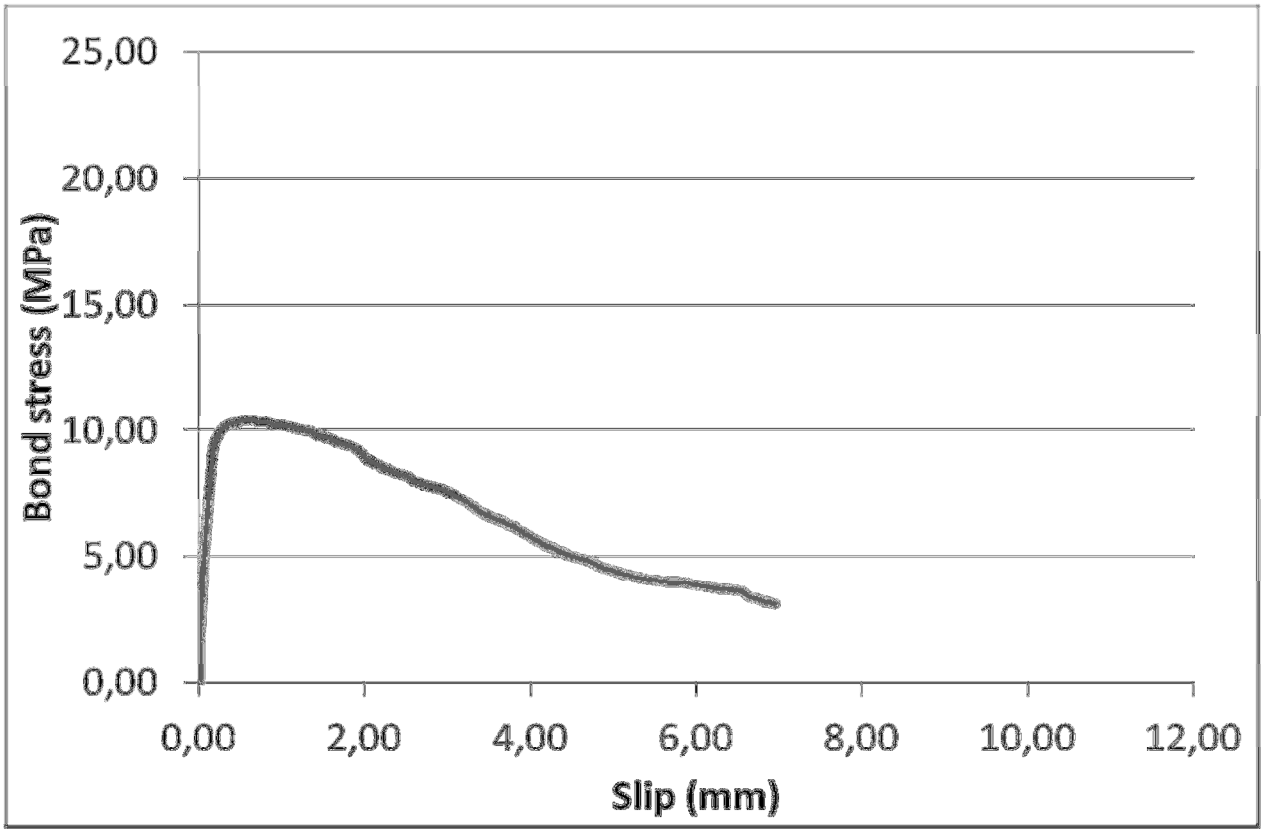
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

- Tensión máxima deadherencia: 21,1 MPa
- Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia: 1,5 mm
- Área hasta el pico: 30,2 mmMPa
- Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia: 102 mmMPa
- Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia: 184 mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L8 PROBETA 1

Diámetro de la barra	8	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	5	
Contenido de Fibras	40	Kg/m3
Tipo de Fibras	80/35	

Curva final tracción-deslizamiento



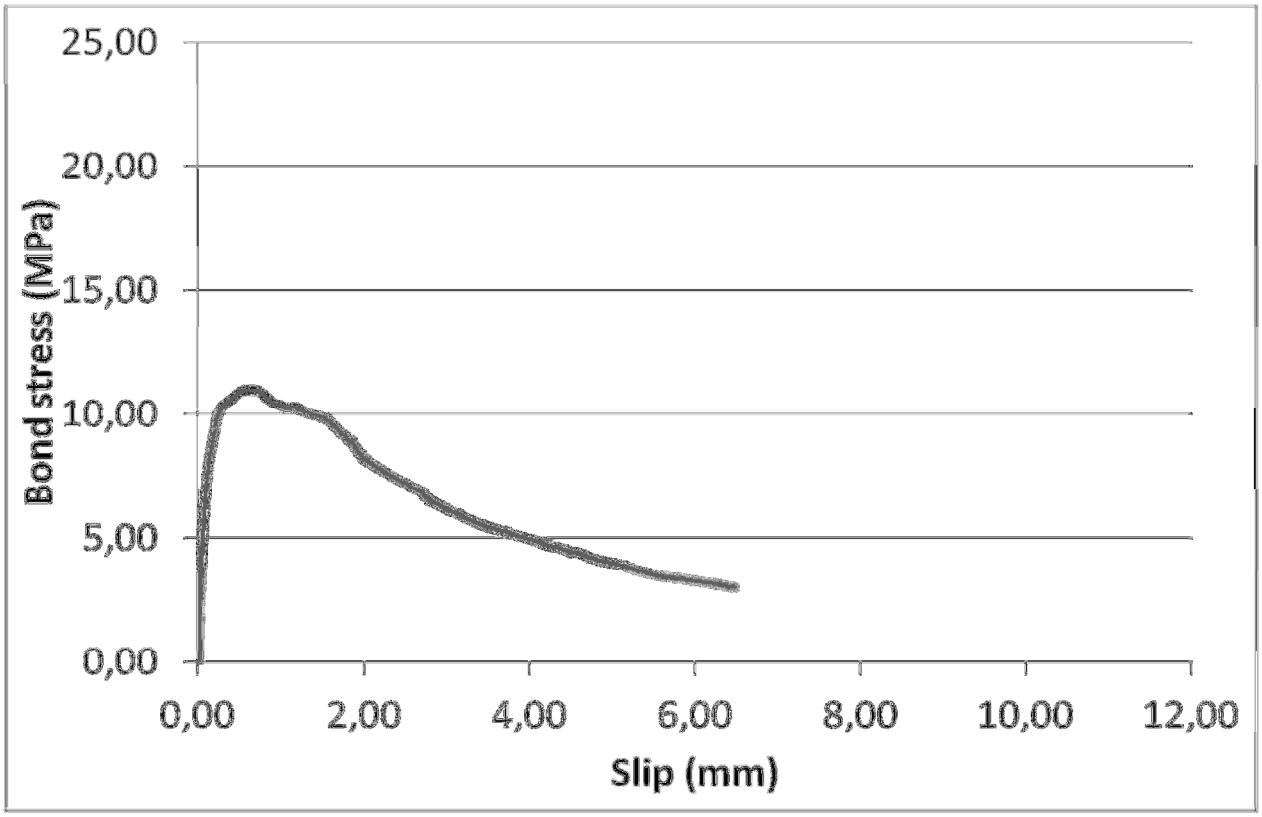
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	10,4	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	0,6	mm
▪ Área hasta el pico	5	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	22,5	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	35,9	mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L8 PROBETA 2

Diámetro de la barra	8	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	5	
Contenido de Fibras	40	Kg/m3
Tipo de Fibras	80/35	

Curva final tracción-deslizamiento



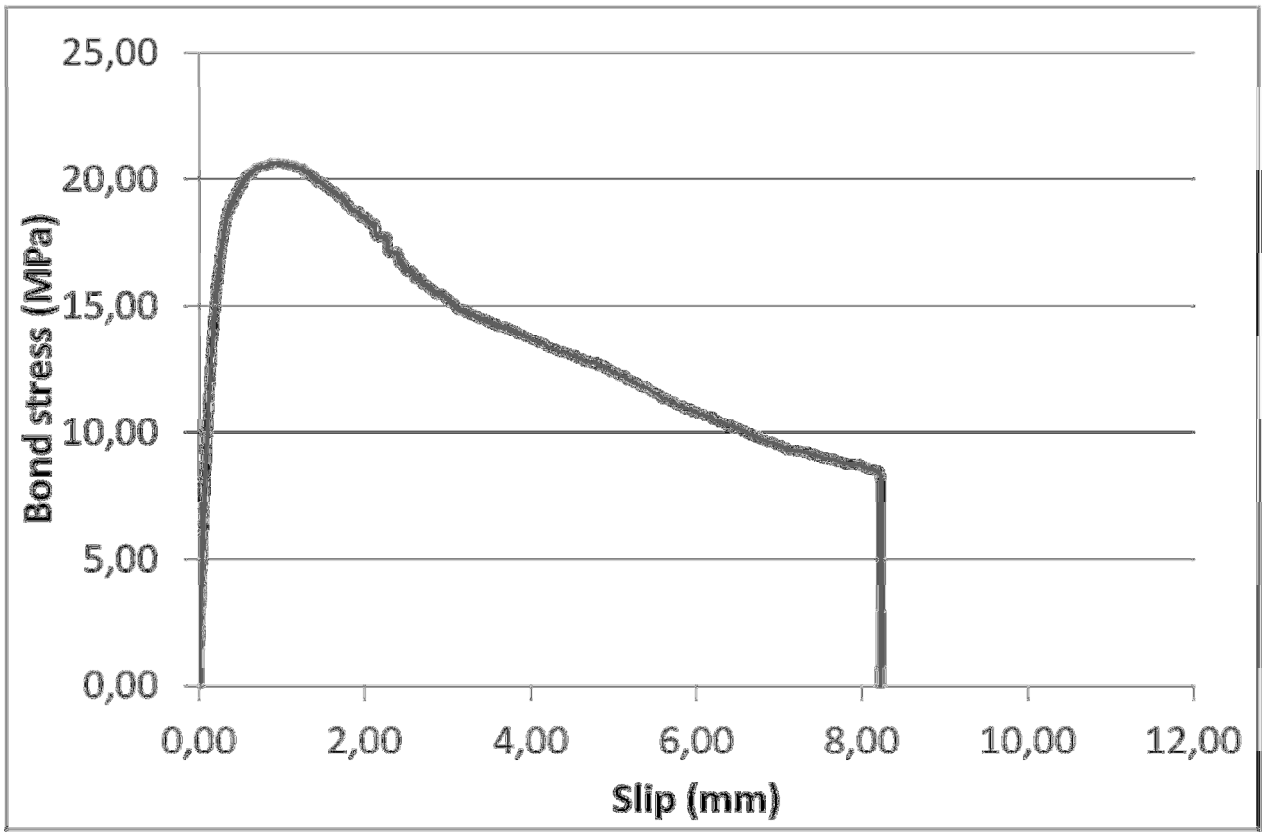
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	11	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	0,6	mm
▪ Área hasta el pico	5,3	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	18,4	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	29,4	mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L8 PROBETA 3

Diámetro de la barra	8	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	5	
Contenido de Fibras	40	Kg/m3
Tipo de Fibras	80/35	

Curva final tracción-deslizamiento



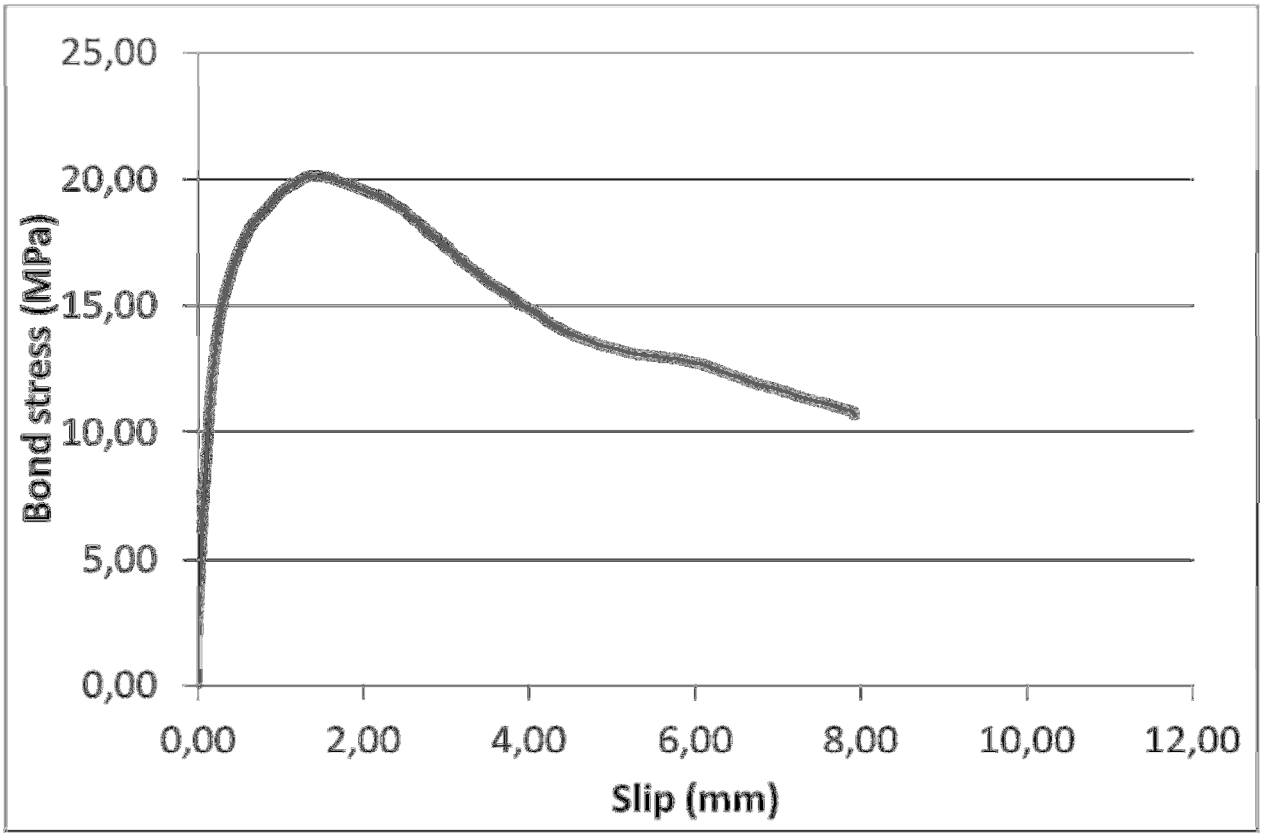
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	20,7	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	0,9	mm
▪ Área hasta el pico	15,7	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	45,4	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	97	mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L9 PROBETA 1

Diámetro de la barra	12	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	5	
Contenido de Fibras	0	Kg/m3
Tipo de Fibras	Sin fibras	

Curva final tracción-deslizamiento



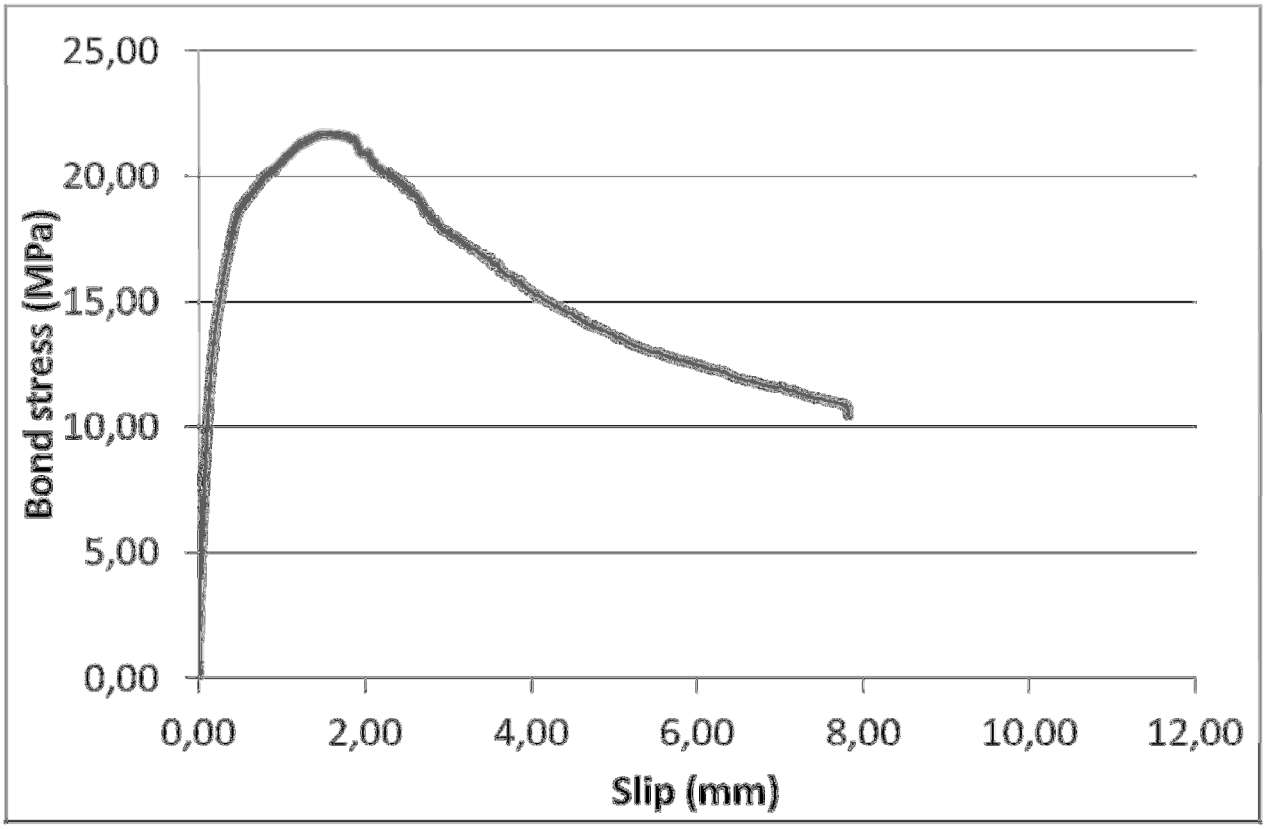
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	20,2	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	1,5	mm
▪ Área hasta el pico	23,1	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	64,7	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	120	mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L9 PROBETA 2

Diámetro de la barra	12	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	5	
Contenido de Fibras	0	Kg/m3
Tipo de Fibras	Sin fibras	

Curva final tracción-deslizamiento



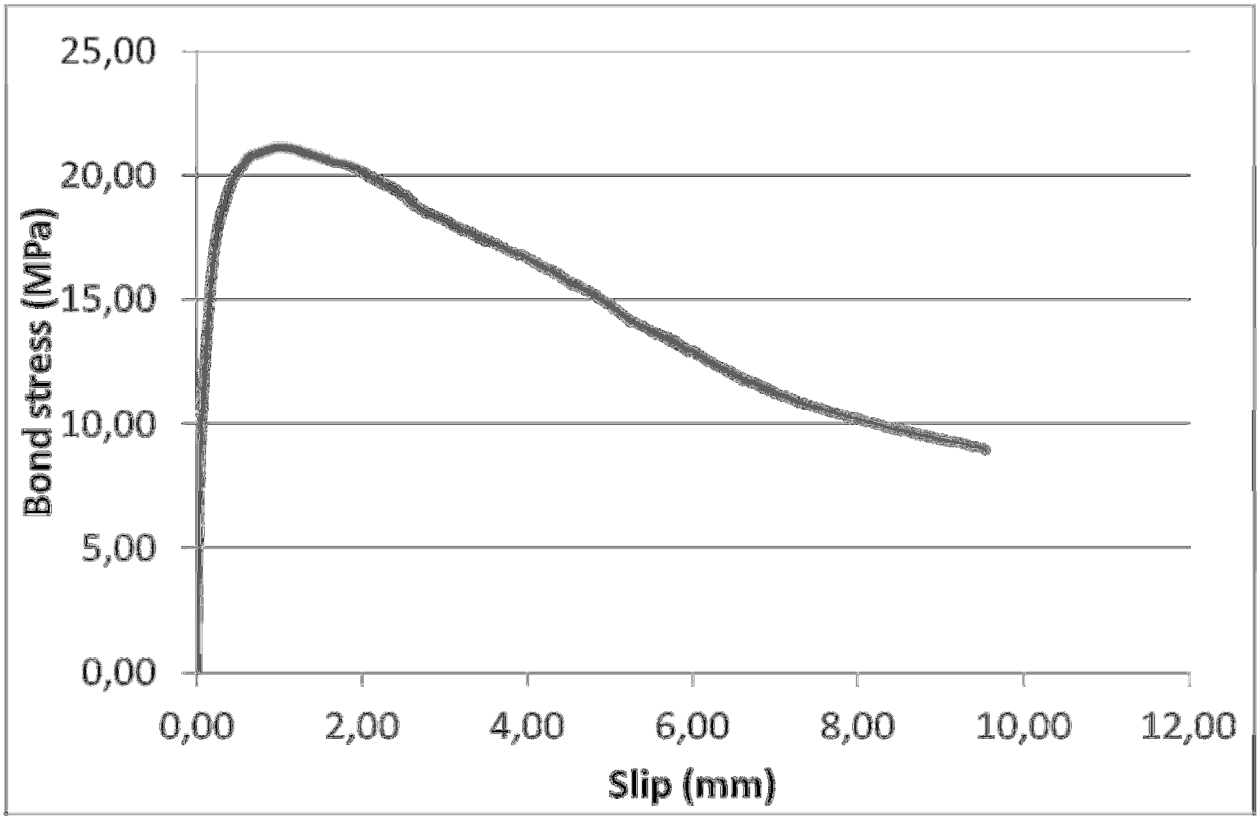
Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	21,7	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	1,5	mm
▪ Área hasta el pico	26,5	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	60,9	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	123	mmMPa

GRÁFICA ENSAYO L9 PROBETA 3

Diámetro de la barra	12	mm
Relación Recubrimiento/Diámetro	5	
Contenido de Fibras	0	Kg/m3
Tipo de Fibras	Sin fibras	

Curva final tracción-deslizamiento



Resultados numéricos obtenidos de la gráfica:

▪ Tensión máxima de adherencia	21,1	MPa
▪ Deslizamiento correspondiente a la Tensión máxima de adherencia	1	mm
▪ Área hasta el pico	17,8	mmMPa
▪ Área hasta el 80% de la Tensión máx. de adherencia	72,2	mmMPa
▪ Área hasta el 50% de la Tensión máx. de adherencia	124	mmMPa

TABLA DE RESULTADOS DE LA TENSIÓN MÁXIMA DE ADHERENCIA (MPa)

ID	Fibras	Cant. Fibras	Ømm	Recubrim.	Prob.1	Prob.2	Prob.3	Media	Desv. Tipica
L1	80/50	0 Kg/m3	8 mm	20 mm	21,6	7,8	20,7	16,7	7,72
L2	80/50	40 Kg/m3	12 mm	42 mm	15,9	12,8	14,4	14,4	1,53
L3	80/50	60 Kg/m3	16 mm	80 mm	23,2	25,1	17,6	22,0	3,90
L4	80/35	60 Kg/m3	12 mm	30 mm	11	13,1	17,4	13,8	3,26
L5	45/50	40 Kg/m3	16 mm	40 mm	17,9	19,2	19,5	18,9	0,85
L6	45/50	60 Kg/m3	8 mm	28 mm	21,9	20	24,1	22	2,05
L7	80/35	0 Kg/m3	16 mm	56 mm	21,2	24,24	21,1	22,2	1,78
L8	80/35	40 Kg/m3	8 mm	40 mm	10,4	11	20,7	14,0	5,78
L9	45/50	0 Kg/m3	12 mm	60 mm	20,2	21,7	21,1	21	0,75

TABLA DE RESULTADOS DEL DESLIZAMIENTO CORRESPONDIENTE A LA TENSIÓN MÁX. DE ADHERENCIA (mm)

ID	Fibras	Cant. Fibras	Ømm	Recubrim.	Prob.1	Prob.2	Prob.3	Media	Desv. Tipica
L1	80/50	0 Kg/m3	8 mm	20 mm	1	1	1	1,0	0,00
L2	80/50	40 Kg/m3	12 mm	42 mm	1	1,1	1	1,0	0,06
L3	80/50	60 Kg/m3	16 mm	80 mm	1,1	1,2	1	1,1	0,10
L4	80/35	60 Kg/m3	12 mm	30 mm	0,9	1,4	0,6	1,0	0,40
L5	45/50	40 Kg/m3	16 mm	40 mm	1	1	1	1	0,00
L6	45/50	60 Kg/m3	8 mm	28 mm	0,8	1	0,9	0,9	0,10
L7	80/35	0 Kg/m3	16 mm	56 mm	1	-	1,5	1,3	0,35
L8	80/35	40 Kg/m3	8 mm	40 mm	0,6	0,6	0,9	0,7	0,17
L9	45/50	0 Kg/m3	12 mm	60 mm	1,5	1,5	1	1,3	0,29

TABLA DE RESULTADOS DEL ÁREA HASTA EL PICO (mmMPa)

ID	Fibras	Cant. Fibras	Ømm	Recubrim.	Prob.1	Prob.2	Prob.3	Media	Desv. Tipica
L1	80/50	0 Kg/m3	8 mm	20 mm	2,9	0,2	4,7	2,6	2,26
L2	80/50	40 Kg/m3	12 mm	42 mm	12,2	12,2	10,5	11,6	0,98
L3	80/50	60 Kg/m3	16 mm	80 mm	23,5	25,6	14,5	21,2	5,90
L4	80/35	60 Kg/m3	12 mm	30 mm	8,5	15,6	8,4	10,8	4,13
L5	45/50	40 Kg/m3	16 mm	40 mm	5,3	4,9	3,4	4,5	1,00
L6	45/50	60 Kg/m3	8 mm	28 mm	14,1	14,9	12,8	13,9	1,06
L7	80/35	0 Kg/m3	16 mm	56 mm	19,5	28,15	30,2	26,0	5,68
L8	80/35	40 Kg/m3	8 mm	40 mm	5	5,3	15,7	8,7	6,09
L9	45/50	0 Kg/m3	12 mm	60 mm	23,1	26,5	17,8	22,5	4,38

TABLA DE RESULTADOS DEL ÁREA HASTA EL 80% DE LA TENSIÓN MÁX. DE ADHERENCIA (mmMPa)

ID	Fibras	Cant. Fibras	Ømm	Recubrim.	Prob.1	Prob.2	Prob.3	Media	Desv. Tipica
L1	80/50	0 Kg/m3	8 mm	20 mm	2,9	0,2	4,7	2,6	2,26
L2	80/50	40 Kg/m3	12 mm	42 mm	52,6	38,5	45,8	45,6	7,05
L3	80/50	60 Kg/m3	16 mm	80 mm	86,6	120	50,1	85,6	34,96
L4	80/35	60 Kg/m3	12 mm	30 mm	23,4	34	23	26,8	6,24
L5	45/50	40 Kg/m3	16 mm	40 mm	5,3	4,9	3,4	4,5	1,00
L6	45/50	60 Kg/m3	8 mm	28 mm	40,6	33,9	28,4	34,3	6,11
L7	80/35	0 Kg/m3	16 mm	56 mm	65,9	28,15	102	65,4	36,93
L8	80/35	40 Kg/m3	8 mm	40 mm	22,5	18,4	45,4	28,8	14,55
L9	45/50	0 Kg/m3	12 mm	60 mm	61,7	60,9	72,2	64,9	6,31

TABLA DE RESULTADOS DEL ÁREA HASTA EL 50% DE LA TENSIÓN MÁX. DE ADHERENCIA (mmMPa)

ID	Fibras	Cant. Fibras	Ømm	Recubrim.	Prob.1	Prob.2	Prob.3	Media	Desv. Tipica
L1	80/50	0 Kg/m3	8 mm	20 mm	2,9	0,2	4,7	2,6	2,26
L2	80/50	40 Kg/m3	12 mm	42 mm	86,7	66,5	81	78,1	10,41
L3	80/50	60 Kg/m3	16 mm	80 mm	166	249	100	171,7	74,66
L4	80/35	60 Kg/m3	12 mm	30 mm	47,9	55,6	61,3	54,9	6,72
L5	45/50	40 Kg/m3	16 mm	40 mm	5,3	4,9	3,4	4,5	1,00
L6	45/50	60 Kg/m3	8 mm	28 mm	77,7	84,5	66,1	76,1	9,30
L7	80/35	0 Kg/m3	16 mm	56 mm	117	28,15	184	109,7	78,18
L8	80/35	40 Kg/m3	8 mm	40 mm	35,9	29,4	97	54,1	37,29
L9	45/50	0 Kg/m3	12 mm	60 mm	120	123	124	122,3	2,08

ENSAYOS DE COMPRESIÓN A 28 DÍAS DE POBRETAS CILÍNDRICAS 15X30cm. Y PROBETAS CÚBICAS DE 10x10cm.

Nº	ID	DESCRIPCIÓN PROBETA	FECHA DE AMASADO	FECHA DEL ENSAYO	TN	Mpa
1	L7, L9, L1	Prueba 1ª Sin Fibras	23/04/2012	22/05/2012	93	51,6
2	L7, L9, L1	Prueba 1ª Sin Fibras	23/04/2012	22/05/2012	90	49,9
3	L7, L9, L1	Prueba 2ª Sin Fibras	24/04/2012	22/05/2012	83,5	46,3
4	L7, L9, L1	Prueba 2ª Sin Fibras	24/04/2012	22/05/2012	81	44,9
5	L7, L9, L1	AM-2 Sin Fibras	04/05/2012	31/05/2012	80	44,4
6	L2	AM-1 12mm Con F. "80/50", 40Kg/m3	08/05/2012	06/06/2012	70	38,8
7	L2	AM-1 12mm Con F. "80/50", 40Kg/m3	08/05/2012	06/06/2012	73	40,5
8	L2	AM-2 12mm Con F. "80/50", 40Kg/m3	09/05/2012	06/06/2012	65	36
9	L2	AM-1 12mm Con F. "80/50", 40Kg/m3	09/05/2012	06/06/2012	73	40,5
10	L2	P.10x10cm. AM-2 12mm Con F. "80/50", 40Kg/m3	09/05/2012	06/06/2012	41	40,2
11	L2	P.10x10cm. AM-2 12mm Con F. "80/50", 40Kg/m3	09/05/2012	06/06/2012	37	36,3
12	L5	AM-2 16mm Con F. "45/50", 40Kg/m3	16/05/2012	13/06/2012	89	49,4
13	L5	AM-1 16mm Con F. "45/50", 40Kg/m3	16/05/2012	13/06/2012	80	44,4
14	L5	AM-1 16mm Con F. "45/50", 40Kg/m3	15/05/2012	13/06/2012	88,5	49,1
15	L5	AM-1 16mm Con F. "45/50", 40Kg/m3	15/05/2012	13/06/2012	84,5	46,9
16	L5	P.10x10cm. AM-2 16mm Con F. "45/50", 40Kg/m3	16/05/2012	16/05/2012	56	54,9
17	L5	P.10x10cm. AM-1 16mm Con F. "45/50", 40Kg/m3	15/05/2012	13/06/2012	54,5	53,5
18	L8	P.10x10cm. AM-1 8mm Con F. "80/35", 40Kg/m3	22/05/2012	22/06/2012	44,5	43,6
19	L8	P.10x10cm. AM-1 8mm Con F. "80/35", 40Kg/m3	22/05/2012	22/06/2012	43	42,2
20	L4	P.10x10cm. AM-1 12mm Con F. "80/35", 60Kg/m3	25/05/2012	22/06/2012	40	39,2
21	L4	P.10x10cm. AM-1 12mm Con F. "80/35", 60Kg/m3	25/05/2012	22/06/2012	38,5	37,8
22	L8	AM-2 8mm Con F. "80/35", 40Kg/m3	22/05/2012	25/06/2012	74,5	41,3
23	L8	AM-1 8mm Con F. "80/35", 40Kg/m3	22/05/2012	25/06/2012	80	44,4
24	L8	AM-1 8mm Con F. "80/35", 40Kg/m3	21/05/2012	25/06/2012	86	47,7
25	L8	AM-1 8mm Con F. "80/35", 40Kg/m3	21/05/2012	25/06/2012	85	47,1
26	L4	AM-1 12mm Con F. "80/35", 60Kg/m3	25/05/2012	25/06/2012	54	29,9
27	L4	AM-2 12mm Con F. "80/35", 60Kg/m3	28/05/2012	25/06/2012	65	36
28	L6	AM-2 8mm Con F. "45/50", 60Kg/m3	29/05/2012	25/06/2012	83	46
29	L6	AM-1 8mm Con F. "45/50", 60Kg/m3	29/05/2012	25/06/2012	63	34,9
30	L6	AM-1 8mm Con F. "45/50", 60Kg/m3	29/05/2012	25/06/2012	65,5	36,3
		MEDIA			68,7	43,1
		DESVIACIÓN TÍPICA			17,71	6,00
		COEFICIENTE DE VARIACIÓN			0,26	0,14

La determinación de la resistencia a compresión se efectuará según UNE EN 12390-3. En el caso de probetas cilíndricas, sólo será necesario refrentar aquellas caras cuyas irregularidades superficiales sean superiores a 0,1 mm o que presenten desviaciones respecto al eje de la probeta que sean mayores de 0,5º, por lo que, generalmente será suficiente refrentar sólo la cara de acabado.

Una vez fabricadas las probetas, se mantendrán en el molde, convenientemente protegidas, durante al menos 16 horas y nunca más de tres días. Durante su permanencia en la obra no deberán ser golpeadas ni movidas de su posición y se mantendrán a resguardo del viento y del asoleo directo.

Según la EHE-08 la resistencia de proyecto *fck* en los hormigones estructurales, no será inferior a 25 N/mm2 en hormigones armados o pretensados. Por tanto podemos observar el cumplimiento de nuestro hormigón con la norma EHE-08 ya que el resultado medio de los ensayos a compresión nos da un valor de 43.13N/mm2.

Para su consideración al aplicar los criterios de aceptación para la resistencia del hormigón, del apartado 86.5.3, el recorrido relativo de un grupo de tres probetas obtenido mediante la diferencia entre el mayor resultado y el menor, dividida por el valor medio de las tres, tomadas de la misma amasada, no podrá exceder el 20%. En el caso de dos probetas, el recorrido relativo no podrá exceder el 13%.

9) BIBLIOGRAFÍA.

1. (2008). Anejo 14 EHE-08, Recomendaciones para la utilización de hormigones con fibras.

2. (2008). Anejo 17 EHE-08, Recomendaciones para la utilización del hormigón con autocompactante.

3. P. Serna, S. Arango, T. Ribeiro, A. M. Núñez, E. Garcia-Taengua (Julio 2009). "Structural cast-in-place SFRC: technology, control criteria and recent applications in spain"

4. Emili García Taengua, Leticia Mas, José R. Martí Vargas, and Pedro Serna Ros (2012). "New views on the study of variables affecting bond of reinforcing bars to steel fiber reinforced concrete"

5. Emilio García Taengua, José R. Martí Vargas, and Pedro Serna Ros (2011). "Statistical Approach to Effect of Factors Involved in Bond Performance of Steel Fiber-Reinforced Concrete"

6. Antoine E. Naaman (2008). "Development and Evolution of Tensile Strain-Hardening FRC Composites"

7. Steffen Grünewald (Junio 2004). "Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete"

8. Song, P.S.and Hwang, S. (2002). "Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete". Science direct, Construction and Building Materials.

9. Song, P.S.; Wu, J.C.; Hwang, S. and Sheu, B.C. (2002). "Assessent of statistical variations in impact resistanceof histrength concrete and high strenth steel fiber reinforced concrete". Science direct, Construction and Building Materials.

10. Oguz Akin Duzgun; Rustem Gul and Cuneyt Aydin (2002). "Effect of steel fibers on the mechanical properties of natural lightweight aggregate concrete". Science direct, Construction and Building Materials.

11. Calogero Cucchiara; Lidia La Mendola and Maurizio Papia (2002). "Effectiveness of stirrups and steel fibres as shear reinforcement" Science direct, Construction and Building Materials.

12. Malmgremn, L.; Nordlund, E. and Rolund S. (2004). "Effectiveness of stirrups and steel fibres as shear reinforcement". Science direct, Construction and Building Materials.

13. Masayasu Hisatake. (2003). "Effects of steel fiber reinforced high-strength shotcrete in a squeezing tunnel". Science direct, Construction and Building Materials.

14. Jean- Louis Granju and Sana Ullah Balouch (2003). "Corrosion of steel fibre reinforced concrete from the cracks". Science direct, Construction and Building Materials.

15. Paulo Cachim; Joaquim A Figueiras and Paulo A Pereira (2002). "Numerical Modelling of fibre-reinforced concrete fatigue in bending". Science direct, Construction and Building Materials.

16. Taguchi, G (1998). "System of experimental Design: Engineering Methods to optimize Quality and minimize Costs". Ed. Unipub, New York, Estados Unidos.

17. Mason et al. (2003) "Statistical Design and Analysis of Experiments". Ed. John Wiley and Sons, Estados Unidos.

18. R. Romero y L. Zúnica (1993) "Estadística: diseño de experimentos, modelos de regression". Editado por el Servicio de Publicaciones de la Univ. Politécnica de Valencia, Valencia.

19. M. Molina H. (2005) Tesis Doctoral sobre "Comportamiento de estructuras de hormigón armado con una deficient transferencia de tensiones hormigón-acero. Análisis experimental y propuestas de un modelo de evaluación estructural"

20. P. C. Marmol S. (2010) Tesis Doctoral "Hormigones con Fibras de Acero. Características Mecánicas"