

# **REDUCCIÓN DEL ARMADO PASIVO EN LAS ZONAS DE ANCLAJE DE LOS TENDONES PRETENSADOS MEDIANTE EL EMPLEO DE HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS ORIENTADAS**

## **PROYECTO PREHRF**

### **ENTREGABLE E.6.1.**

#### **PROTOCOLO DE PUESTA EN OBRA**

<b>Fecha de inicio</b>	<b>Fecha de emisión</b>	<b>Revisión</b>	<b>Aprobado</b>
1 de Octubre de 2010	24/09/2011	05/10/2011	04/01/2012
	18/11/2011	28/11/2011	

<b>Nivel de acceso al documento</b>		
<b>PU</b>	Público	
<b>PE</b>	Todo el personal de la empresa	<b>X</b>
<b>PD</b>	Personal de determinados departamentos (indicar cual)	
<b>DI</b>	Dirección de la empresa	



## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.</b>	<b>4</b>
<b>2. RESULTADOS Y CONCLUSIONES ACTIVIDAD 5.</b>	<b>5</b>
<b>3. PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO DE LA ACTIVIDAD.</b>	<b>6</b>
<b>3.1. Comparación de ahorro en el armado.</b>	<b>6</b>
<b>3.2. Métodos para la orientación de fibras de acero.</b>	<b>8</b>
3.2.1. Determinación de la orientación de las fibras de acero en HRFA.	9
3.2.2. Orientación mediante vertido del hormigón.	11
3.2.3. Orientación mediante vibrado.	16
3.2.4. Orientación mediante solenoides.	22
3.2.4.1. Método Takazuka	22
3.2.4.2. Método Svedberg	25
3.2.4.3. Método experimental innovador	26
<b>4. ANÁLISIS ECONÓMICO.</b>	<b>30</b>
<b>5. CONCLUSIONES.</b>	<b>33</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.</b>	<b>34</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparación de hormigones con fibras.....	7
Figura 2. Ahorro de armado porcentual utilizando fibras de acero orientadas frente a no orientadas	7
Figura 3. Sistema fibra-matriz en HRFA .....	8
Figura 4. Factores influyentes en la orientación de fibras en HRFA .....	9
Figura 5. Método de Rayos X para la observación de orientación de fibras .....	10
Figura 6. Diferentes tipos de llenado de encofrados de HRFA .....	11
Figura 7. Ensayo de afectación de propiedades mecánicas en función de la altura de llenado.....	12
Figura 8. Probetas ensayadas con y sin fibras para observar el cambio del acabado superficial....	13
Figura 9. Realización del cono de Abrams in-situ .....	14
Figura 10. Comportamiento de fibras bajo la acción de un flujo .....	15
Figura 11. Onda sinusoidal .....	16
Figura 12. Disposición de ondas circulares en vibrador interno.....	17
Figura 13. Vibrador de superficie .....	18
Figura 14. Método de vibrado de molde .....	18
Figura 15. Representación gráfica de huecos frente a frecuencia (American Concrete Institute)....	19
Figura 16. Relación frecuencia amplitud (American Concrete Institute) .....	20
Figura 17. Método de mesa de vibrado.....	21
Figura 18. Dosificador de fibras de acero (USP, Takazuka).....	23
Figura 19. Orientador magnético de fibras de acero (USP, Takazuka) .....	24
Figura 20. Etapas sucesivas en la producción de un pavimento (OEPM, 2 207 254).....	25
Figura 21. Aplicación del efecto del solenoide al hormigón con fibras (OEPM, 2 207 254) .....	26
Figura 22. Vibrador convencional y vibrador con solenoide integrado.....	27
Figura 23. Distribución del proceso de vibrado.....	28
Figura 24. Probeta estudiada con dimensiones en metros.....	30
Figura 25. Armado en función de la tracción aplicada sobre la probeta experimental .....	31
Figura 26. Cantidad de fibras en función de la tracción aplicada sobre la probeta experimental.....	32

## **1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES.**

Se redacta el presente documento con objeto de describir todas las tareas realizadas dentro del proyecto PREHRF, correspondientes a la Actividad 6 del proyecto “Protocolo de puesta en obra”. La planificación de la mencionada actividad se muestra a continuación:

<b>Actividad 6</b>	<b>Protocolo de puesta en obra.</b>	
<b>Fecha de Inicio</b>	<b>Fecha de Finalización</b>	
<b>1 de Octubre de 2010</b>	<b>30 de Septiembre de 2011</b>	
<b>Finalidad</b>		
La finalidad de esta actividad es optimizar la puesta en obra del hormigón reforzado con fibras (HRF), para conseguir reducir la cantidad de fibras a añadir para un mismo comportamiento estructural y, por lo tanto, la cantidad de aditivos que se emplean actualmente. El método de puesta en obra posicionará y orientará las fibras de manera óptima, en base a los resultados obtenidos en la actividad 5.		
<b>Metodología y plan de trabajo</b>		
<b>6.1. Protocolo de puesta en obra.</b>		
Se desarrollará un protocolo de puesta en obra del HRF, prestando especial atención a las zonas de anclaje de los elementos con tendones pretensados. Se iniciará esta actividad previamente a la finalización de la actividad 5 con objeto de poder corregir, mejorar y retroalimentar ésta antes de su finalización, pues estamos seguros que los procedimientos analizados para el posicionamiento y orientación de las fibras presentarán sus inconvenientes en el momento de implementarlos en estructuras reales y en la puesta en obra del hormigón. <i>Duración: 12 meses (Octubre 2010 – Septiembre 2011).</i>		
<b>Entregables</b>		
<b>E6.1.</b> Protocolo de puesta en obra. <i>(Septiembre 2011).</i>		
<b>Hitos</b>		
<b>H6.1.</b> Determinación de un protocolo de puesta en obra de los elementos de HRF. <i>(Septiembre 2011).</i>		

La actividad comenzó en Octubre de 2010 y finalizó en Septiembre de 2011.

## **2. RESULTADOS Y CONCLUSIONES ACTIVIDAD 5.**

Las conclusiones de la actividad 5 son:

- Se nota en todos los casos una clara mejoría del parámetro de tenacidad y resistencia, en todos los casos las probetas a flexión con fibras orientadas presentaron un mejor comportamiento mecánico y de resistencia.
- El comportamiento mecánico de las probetas con fibra orientada magnéticamente presentan incrementos promedio del 185 con respecto a las probetas no orientadas.
- Para la mejora de la compacidad de la mezcla y focalización de la fibra hay que tener en cuenta el efecto y la manipulación del equipo electromagnético con el nivel generado por la fuerza de atracción, o capacidad de atracción, el segundo es la volumen de dispersión de las fibras sin generar aglomeraciones, por ejemplo generando un gran campo se pueden atraer las fibras pero hay que tener cuidado de no producir segregación de la mezcla por efecto del remolde, generado por el arrastre de árido formado de las fibras en la masa al ser desplazadas por el electroimán, y erizamientos de la fibra, otro factor a tener en cuenta es el efecto del equipo y los instantes de carga de atracción con carga sostenida y dispersión con ciclos intermitentes de carga y descarga electromagnética es decir que se atraigan las fibras y se puedan distribuir y orientar mientras que a la par se vaya vibrando el concreto.
- Al observar la manipulación de las fibras en la mezcla de hormigón, se puede realizar una orientación y posicionamiento más efectivo según la docilidad. Teniendo en cuenta que la adición de fibras afecta la trabajabilidad de la mezcla fresca, manteniendo constante el volumen de fibras y variando el asentamiento de la mezcla se puede encontrar que el movimiento de las fibras, es menos acusado en mezclas que tengan un asentamiento interior a los 8 cm. Posiblemente en mezclas blandas, la introducción del dispositivo de vibrado ayudaría en la manipulación y distribución.
- La fuerza de atracción remanente en el dispositivo, es inferior a la fricción generada por el medio en las fibras por lo cual no se quedan adheridas

ante la suspensión de la corriente eléctrica, quedándose en la posición deseada.

- Si el método, es desarrollado con inclusión de armadura de refuerzo la manipulación del equipo se realizaría con dificultad, al no poder desplazar el solenoide de la forma deseada.
- De los resultados de los ensayos realizados, se determina que la mejora de las probetas FO a flexo-tracción son de un 24% respecto de FA y de un 43% respecto del hormigón sin fibras. Los valores de la resistencia a compresión no se ven afectados, mientras que los valores de tracción indirecta son un 56% superiores en el hormigón con fibras (tanto FO como FA) respecto del hormigón sin fibras, no existiendo diferencia apreciable entre FO y FA.

A partir del método desarrollado de orientación y posicionamiento desarrollado, en principio trabajaremos en el escalado del método a un elemento de dimensiones mayores.

### **3. PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO DE LA ACTIVIDAD.**

#### **3.1. Comparación de ahorro en el armado.**

Se ha comprobado que la orientación de las fibras en el hormigón tiene una gran influencia sobre la respuesta mecánica del mismo. En el estudio realizado durante la Actividad 4 se completó un análisis de la reducción de acero de armado que se obtenía al utilizar hormigones con fibras. Este análisis se ha profundizado comparando la mejora que introducen las fibras orientadas frente a las dispuestas de forma aleatoria en la reducción de armado.

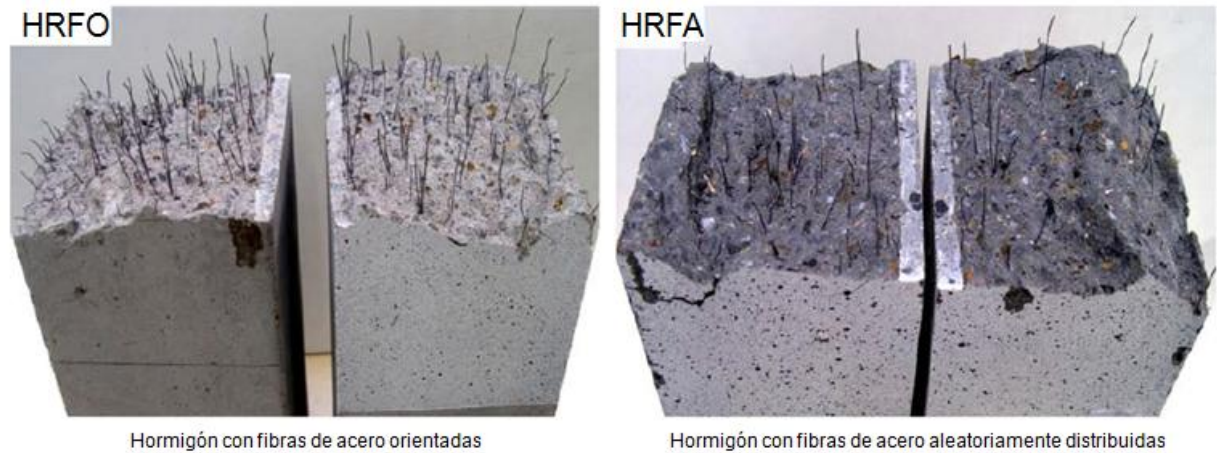


Figura 1. Comparación de hormigones con fibras

Como se puede observar en la figura 2, el ahorro de armado no aumenta de forma exagerada como ocurría cuando cualquiera de los dos tipos de hormigón con fibras era comparado con uno sin este tipo de adiciones, aun así se pueden observar mejoras más que considerables en ahorro de armado para tracciones entre 4 MPa y 10 MPa. La línea roja representa el rango de tracciones a partir del cual es necesario introducir armado en el caso de la utilización de hormigones con fibras de acero no orientadas. Se observa por tanto, que para rangos de tracciones entre 4 MPa y 6 MPa comenzaría a ser necesaria la introducción de armados en el hormigón con fibras de acero no orientadas, mientras que en los hormigones con las fibras orientadas no resultaría necesario el refuerzo con armado.

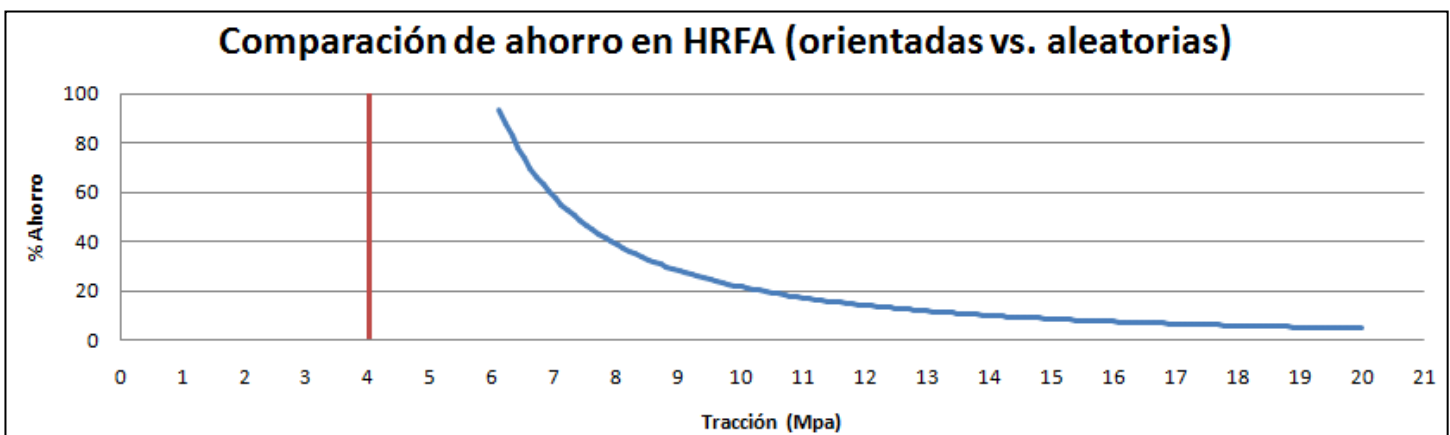


Figura 2. Ahorro de armado porcentual utilizando fibras de acero orientadas frente a no orientadas

### 3.2. Métodos para la orientación de fibras de acero.

La orientación de las fibras de acero resulta de gran importancia debido a que influye de manera muy significativa en la resistencia a tracción en los HRFA como se dedujo de los ensayos de la Actividad 5. En los HRFA las fibras de acero comienzan a actuar una vez que el hormigón comienza a fisurar, tal y como se muestra en la figura 3.

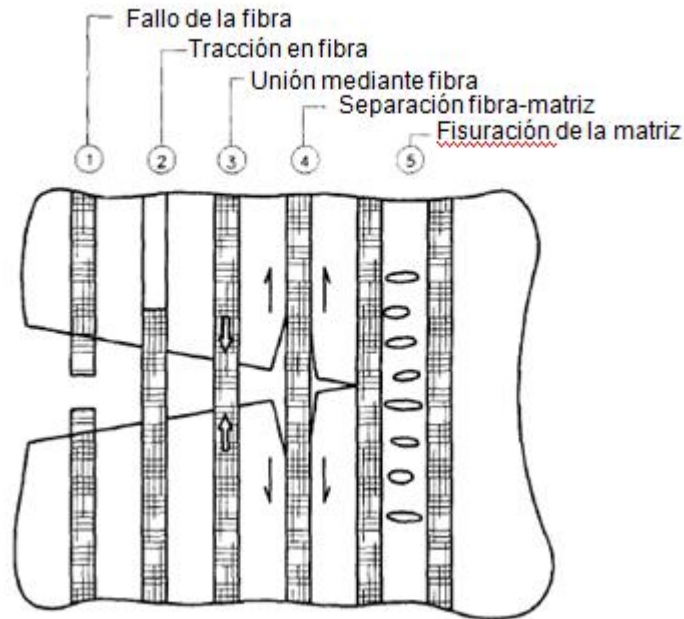


Figura 3. Sistema fibra-matriz en HRFA

Como se puede observar en la figura anterior, la mejor forma de disponer las fibras en el hormigón es aquella en la que las fibras actúen perpendicularmente a la fisuración que se produce en el hormigón para poder actuar como unión de la matriz que comienza a separarse.

Una vez estudiada la mejora introducida por la orientación de las fibras de acero en los HRFA resulta necesario definir el método más efectivo para la consecución de dicha orientación.

Existen formas muy diversas de orientar las fibras de acero y que se deben tener en cuenta para poder aplicarlas en la consecución de la mejor forma de orientación posible. En la figura 4 se pueden observar esquemáticamente resumidos los principales factores que influyen en provocar una orientación preferencial de las fibras de acero dentro del hormigón.

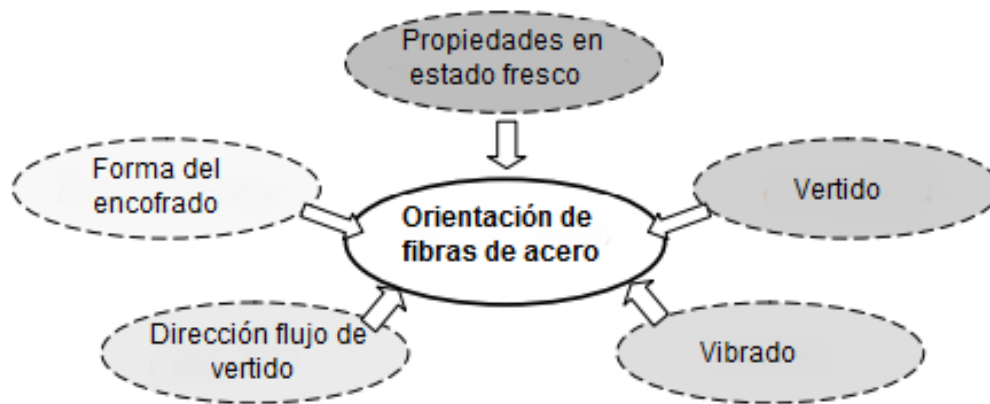


Figura 4. Factores influyentes en la orientación de fibras en HRFA

### 3.2.1. Determinación de la orientación de las fibras de acero en HRFA.

El incremento substancial de la resistencia a tracción y la dureza del hormigón que se obtiene son las propiedades mecánicas más conocidas y que son afectadas directamente por la orientación preferencial de las fibras de acero en el hormigón. Esta mejora en las propiedades viene dada por la efectividad para la reducción de la apertura de fisura en el hormigón, que depende del comportamiento individual de las fibras que cosen la fisura. Para modelar el comportamiento general de la fuerza de unión ejercida por las fibras de acero es necesario conocer el número de fibras con su correspondiente inclinación y respuesta a tracción.

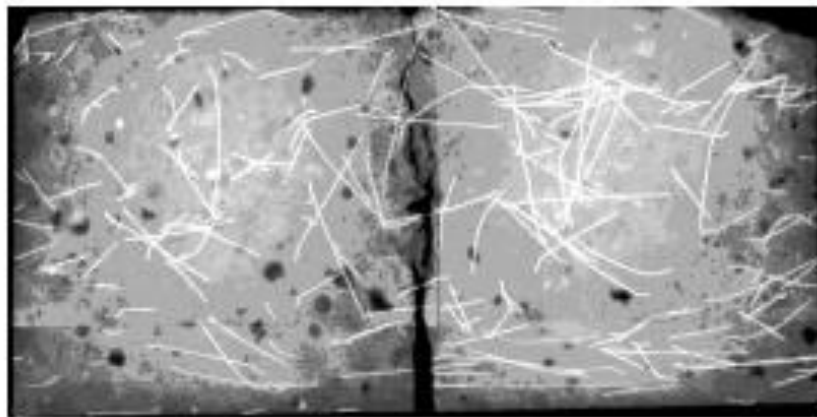
Predecir la respuesta a tracción de los hormigones reforzados con fibras de acero es algo que ha sido investigado a lo largo del tiempo por muchos investigadores diferentes (Van Gysel, 2000; Markovic, 2004). Debido a la gran variedad de resultados arrojados e dichas investigaciones, se decidió ensayar cada probeta para obtener sus propiedades e la Actividad 5 y de esta manera poder obtener datos totalmente empíricos y acordes con la realidad.

Existen diferentes técnicas para caracterizar la orientación de las fibras de acero en el interior del hormigón y que pueden estructurarse en métodos destructivos y no destructivos basados en métodos directos o indirectos.

Uno de los métodos populares conocidos y que es destructivo e indirecto es el de contar manualmente el número de fibras que aparece en la sección transversal de la probeta. Ha sido probada la proporcionalidad de la orientación de las fibras de acero con el comportamiento post-fisuración evaluando la orientación indirecta de las fibras en

experimentaciones de resistencia sobre probetas de hormigones reforzados con fibras de acero.

Mediciones directas de la orientación singular en las fibras de acero pueden obtenerse mediante técnicas como el análisis de imágenes, el método de rayos X o las tomografías computarizadas (CT-scans). La figura 5 muestra un ejemplo del método de rayos X. Debido a las limitaciones del tamaño de los especímenes y la especial dificultad de ejecución, estos métodos sólo pueden ser empleados con éxito en el laboratorio.



*Figura 5. Método de Rayos X para la observación de orientación de fibras*

Recientemente se han producido avances significativos en el desarrollo de métodos no destructivos para la determinación de orientación de fibras de acero en especímenes de mayor tamaño. Algunos de estos métodos son la corriente-impedancia espectroscópica, la línea de transmisión abierta coaxial, la antena para guía de onda dieléctrica y los métodos basados en la resistividad eléctrica. Todos estos métodos permiten la realización de mediciones simples y económicas para determinar la orientación de las fibras dispuestas en el hormigón y acaban con las incertidumbres que se producían en el análisis de especímenes de mayor tamaño.

Por el momento, una completa caracterización de la distribución y la orientación de las fibras de acero en el hormigón requieren de métodos destructivos y caros. Una mezcla entre métodos destructivos y no destructivos puede proporcionar una aproximación razonable para futuras aplicaciones estructurales.

### 3.2.2. Orientación mediante vertido del hormigón.

Uno de los métodos a utilizar en la orientación de fibras de acero en el hormigón tiene lugar durante la etapa de vertido del mismo. Existen pruebas y experimentos en los que se ha sido capaz de orientar las fibras de la manera deseada en esta etapa del hormigonado. A lo largo del tiempo han sido estudiadas hasta tres formas diferentes en el vertido del hormigón y se ha analizado la influencia que tiene cada una de ellas en la orientación de las fibras de acero de los HRFA

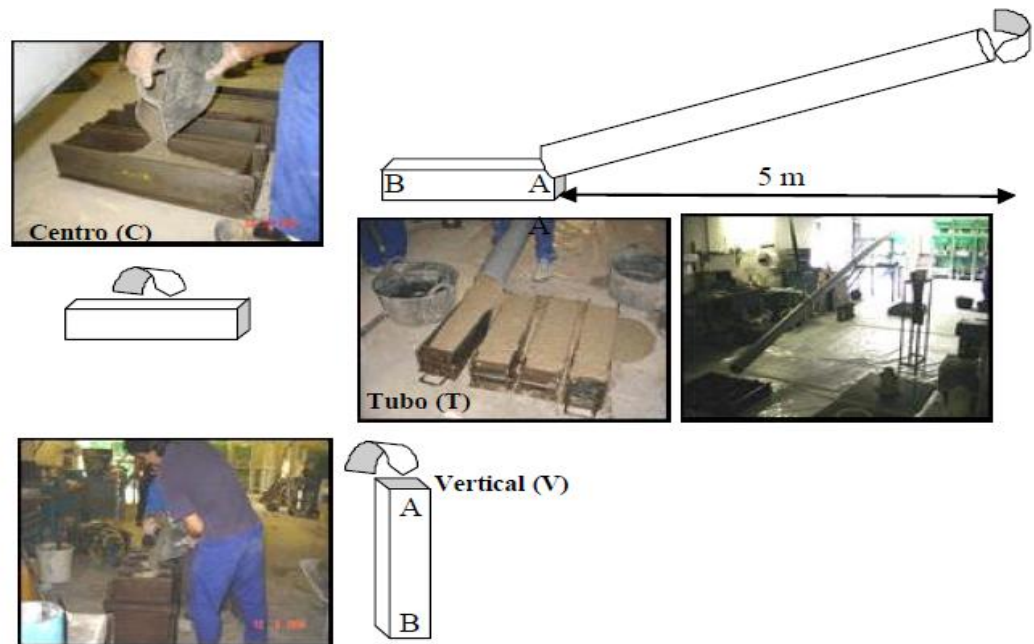


Figura 6. Diferentes tipos de llenado de encofrados de HRFA

En la figura 6 se muestran los diferentes tipos de llenado estudiados para conocer su efecto en la orientación de las fibras de acero. El primero que se procede a analizar es el del vertido común en el centro del encofrado, en este tipo de vertido el hormigón se vierte sobre la parte central del molde distribuyéndose por el mismo hasta completar el llenado de la sección. En este vertido las fibras del HRFA quedan repartidas de forma aleatoria sin una orientación específica. Diferentes estudios demuestran en su análisis que la distribución de las fibras suele resultar muy homogénea sin que se produzcan partes del encofrado en las que se encuentre una densidad de fibras considerablemente superior a las de otras zonas. También ha sido comprobado que no influyen en la orientación de las mismas y que éstas quedan distribuidas en orientaciones aleatorias en la totalidad de la mezcla.

Otro de los tipos de vertido que se observa en la figura 6 es el vertical, en este método el hormigón se vierte desde la parte superior del molde llenándose hasta ocupar la totalidad del molde. Una de las dudas que genera este vertido es la de que las fibras de acero tiendan a acumularse en la parte inferior del molde y por tanto no se distribuyan homogéneamente en la mezcla. Como se observa en la figura 7, diversos ensayos han probado que en los HRFA vertidos verticalmente de forma correcta, no se producen zonas con un exceso de densidad de fibras de acero. Esta hipótesis generaría una respuesta mecánica del HRFA diferente en función de la altura, aunque como se acaba de comentar no es correcta. En la figura 7 se encuentran ligeras variaciones en función de la altura pero éstas son mínimas y por tanto no se consideran relevantes en lo que a las propiedades mecánicas del hormigón se refiere. Para demostrar estos resultados en la figura 7 se muestran ensayos realizados sobre probetas de hormigón sin fibras (HAC-0), hormigón con 25 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero (HAC-25) y hormigón con 50 kg/m<sup>3</sup> de fibras de acero (HAC-50).

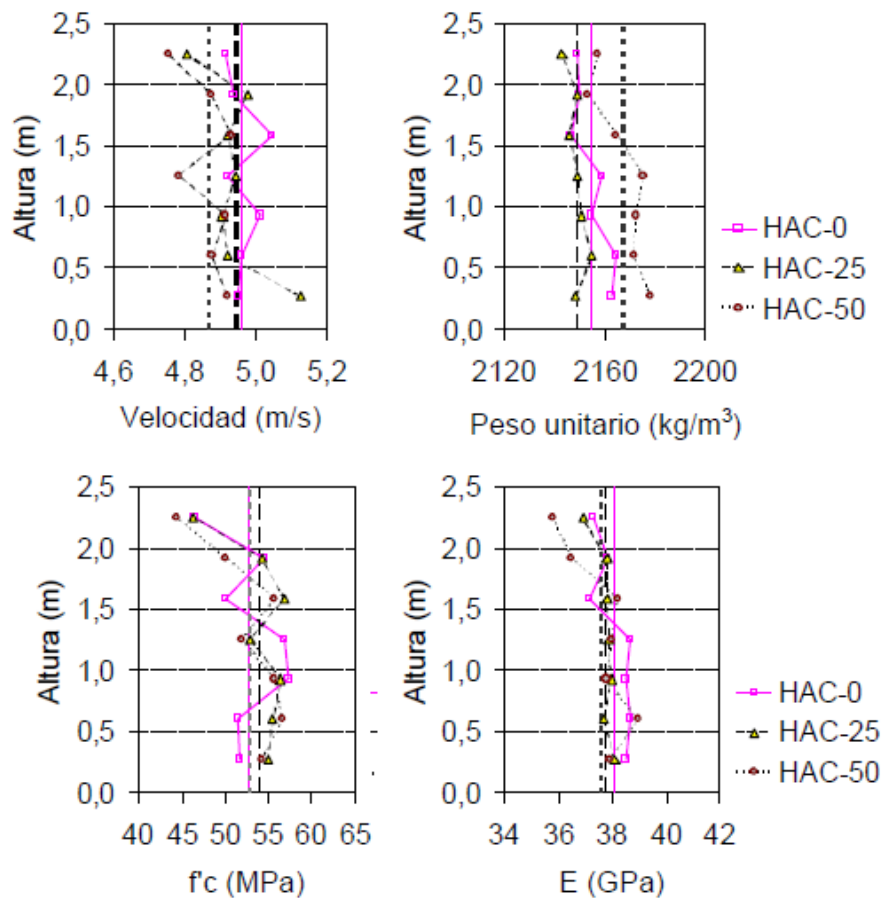
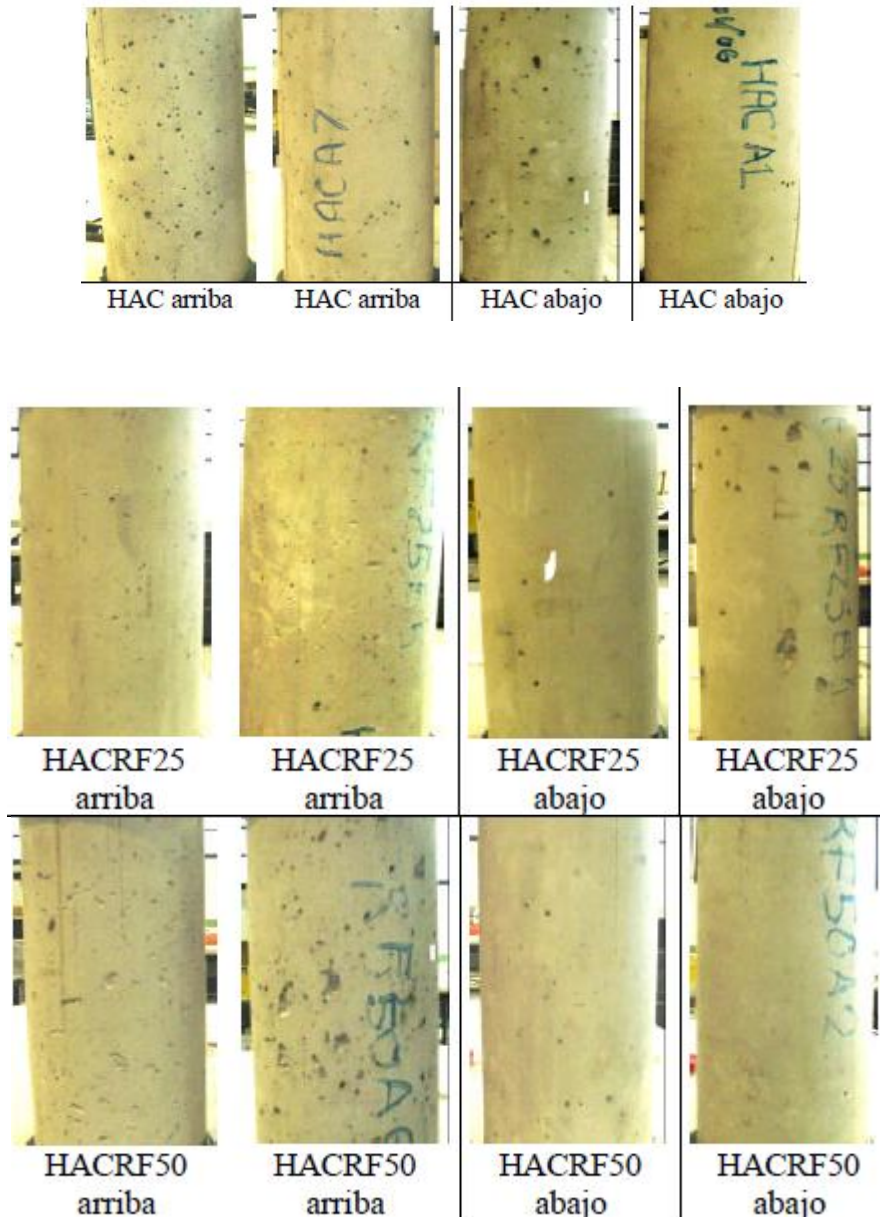


Figura 7. Ensayo de afectación de propiedades mecánicas en función de la altura de llenado

Otra de las características que se ha estudiado en los HRFA con este tipo de vertido es la del acabado final exterior en función de la altura en el molde y que se presenta en la figura 8.



*Figura 8. Probetas ensayadas con y sin fibras para observar el cambio del acabado superficial*

Puede observarse que todos los especímenes analizados en la figura 8 tienen un acabado superficial prácticamente idéntico, por lo que el vertido vertical de hormigones con fibras de acero distribuye las fibras de refuerzo de manera homogénea dentro del

molde. Es importante, para que se mantenga ésta característica observada en el vertido vertical, que el hormigón empleado no experimente un asiento demasiado grande en el cono de Abrams. Dependiendo del asentamiento que produzca, la mezcla ensayada de hormigón tendrá unas características de fluidez u otras, en el caso del vertido realizado de forma vertical esta fluidez no puede ser grande ya que produciría el aumento excesivo de la densidad de fibras de acero en la parte inferior del vertido vertical. La figura 9 muestra imágenes de este proceso.



*Figura 9. Realización del cono de Abrams in-situ*

En el caso de HRFA, cuya puesta en obra se ha realizado mediante vertido vertical, se observa una cierta orientación preferencial a lo largo de los bordes del molde y se debe tener en cuenta a la hora de realizar un vertido donde las fibras de acero se encuentren de esta manera.

En la última forma de vertido estudiada, se obliga a la mezcla de HRFA a pasar por una tubería para posteriormente diseminarse en el molde o encofrado a través de un

extremo. La tubería debe tener una pendiente y longitud que permita a la mezcla deslizarse por la misma sin problemas, creando un flujo que se encargará de orientar las fibras en la dirección de vertido; de nuevo resulta de vital importancia conocer los resultados arrojados en el cono de Abrams para la fluidez de la mezcla. El molde queda relleno de un hormigón cuyas fibras se encuentran orientadas en la dirección preferencial deseada produciendo la mejora de las propiedades mecánicas y aprovechando al máximo las características de las fibras de acero en HRFA. Es necesaria la realización de ensayos y experimentos para encontrar la pendiente y longitud necesarias para la tubería de vertido, dependiendo del tipo de hormigón, la densidad de fibras empleadas y la fluidez de la mezcla, con el objetivo de asegurar un vertido y disposición en el molde satisfactorios. La explicación del funcionamiento de este método resulta sencilla; la mecánica de fluidos básica describe el efecto por el cual en un flujo que tiene lugar a través de una tubería o canal, la velocidad del mismo es máxima en el centro y mínima en las partes de contacto con dicho tubo o canal. Este efecto se muestra en la figura 10 y juega un papel dominante en la orientación de las fibras de acero dentro del hormigón con fibras que es vertido a través de una tubería. El flujo tiende a rotar las fibras de acero y orientarlas en su dirección preferencial.

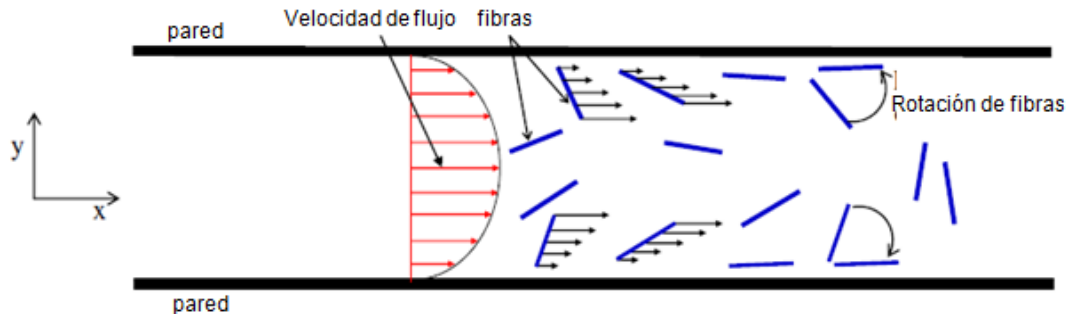


Figura 10. Comportamiento de fibras bajo la acción de un flujo

Este método se ha comprobado eficaz no sólo en la orientación de fibras sino también en la distribución equitativa de las mismas en los planos horizontal y vertical del molde. El vertido mediante tubería es el más adecuado dentro de este tipo de métodos para poder dar, a través del flujo y entrada en el molde de la mezcla, la orientación preferencial a las fibras deseada, aprovechando al máximo las propiedades mecánicas introducidas por ellas en el hormigón.

### 3.2.3. Orientación mediante vibrado.

Otra forma estudiada para la orientación de las fibras de acero en los HRFA consiste en el aprovechamiento del vibrado no sólo para dar compacidad y deshacerse de los vacíos en el hormigón sino también para dar una determinada orientación preferencial. Los métodos de vibrado se han utilizado para todos los tipos de hormigón de construcción, aunque el conocimiento de la teoría y mecanismo de la vibración del hormigón es todavía sorprendentemente limitado. A continuación se exponen los principios que rigen el vibrado del hormigón y los diferentes tipos de vibrados que se pueden encontrar.

Los vibradores de hormigón usan generalmente un peso excéntrico que rota generando un movimiento armónico caracterizado por la onda sinusoidal de la figura 6.

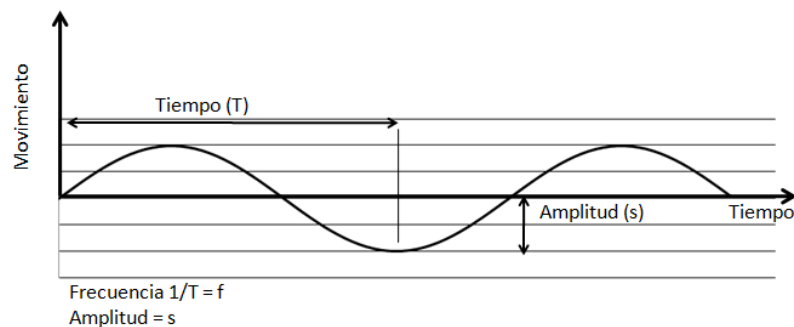


Figura 11. Onda sinusoidal

Esta onda se caracteriza mediante la siguiente formulación:

$$x = s \sin \omega t = s \sin 2\pi ft$$

donde

$s$  = amplitud (mm)

$\omega$  = velocidad angular (rad/s)

$f$  = frecuencia (Hz)

$t$  = tiempo (s)

De esta ecuación se obtienen las relaciones que siguen a continuación:

$$\dot{x} = 2\pi fs \cos 2\pi ft = v \cos \pi ft$$

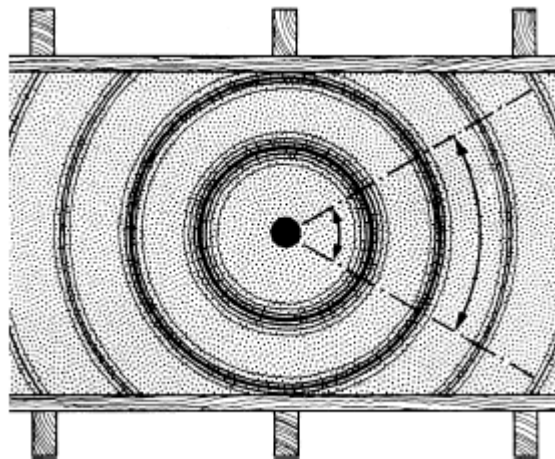
donde  $v = 2\pi fs$  = velocidad máxima durante el movimiento oscilatorio (mm/s).

$$\ddot{x} = 4\pi^2 f^2 s \sin 2\pi ft = a \sin 2\pi ft$$

donde  $a = 4\pi^2 f^2 s$  = aceleración máxima durante el movimiento oscilatorio (mm/s<sup>2</sup>)

El vibrado produce una gran cantidad de energía creando inicialmente una rápida subsidencia de la mezcla que se puede caracterizar por la deformación plástica que requiere de esta gran cantidad de consumo energético. Para alcanzar la completa compactación, se debe transmitir toda la energía consumida a la mezcla. Durante la última fase de la vibración, no se necesita más energía para mantener la masa en movimiento debido a que la mezcla se comporta como un fluido. En un fluido ideal, la energía consumida por el vibrador es teóricamente la misma que en el aire. Durante esta fase se produce una pequeña fricción interna, pero como se ha comentado previamente, requiere de una cantidad de energía limitada.

Existen cuatro tipos diferentes de vibrado, el primero de ellos es el vibrado interno en el cual se introduce un vibrador en el interior de la mezcla situada en el molde y donde comienza a actuar generando rápidamente ondas de compresión circular a su alrededor como se aprecia en la figura 12. La amplitud de onda decrece rápidamente con el aumento de la distancia al vibrador y para obtenerse un adecuado radio de acción, el vibrador interno debe operar en altas intensidades de vibración. El radio de acción de un vibrador interno se encuentra limitado en el hormigón armado o reforzado con fibras de acero, se pueden llegar a producir reducciones de hasta un 50%. Otro problema reside en que las ondas circulares creadas orientan las fibras de esta manera entorno al vibrador sin poder dar una orientación preferencial a las fibras.



*Figura 12. Disposición de ondas circulares en vibrador interno*

Existe otro tipo de método de vibración, ilustrado en la figura 13 y que puede aplicarse mediante vibradores individuales o dobles ligeros permitiendo compactar capas de hasta 200mm de hormigón de diversa fluidez. Estos vibradores se caracterizan por

frecuencias de 50 a 100 Hz y aceleraciones de entre 49 y 98 m/s<sup>2</sup>. La experiencia demuestra que frente a la misma aceleración, una relación: alta amplitud/poca frecuencia es mejor que una combinación: pequeña amplitud /alta frecuencia. Los vibradores de superficie necesitan de una anchura mínima para poder vibrar con efectividad espesores grandes de hormigón y producir de esta manera el suficiente efecto en profundidad.

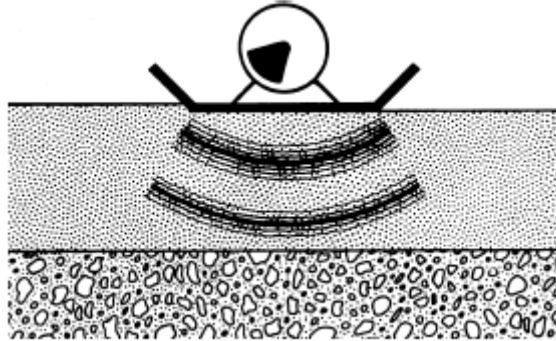


Figura 13. Vibrador de superficie

Otro de los tipos existentes de vibrado es el de moldes, en este tipo de vibrado es esencial distribuir uniformemente las vibraciones a lo largo de la mayor parte del molde que sea posible (figura 14). La amplitud debe ser uniforme en su mayor parte sobre toda la superficie, lo que conlleva una distancia máxima entre vibradores de 1.5 a 2.5 m. Un criterio importante para producir un vibrado eficiente es el de utilizar aceleraciones de entre 9.8 y 30 m/s<sup>2</sup> dependiendo de la fluidez de la mezcla. La amplitud de onda en este tipo de vibrados decrece conforme aumenta la distancia al vibrador en el plano del molde., también funcionan mejor las vibraciones de alta frecuencia que las de poca frecuencia, creando las primeras un mucho mejor acabado superficial.

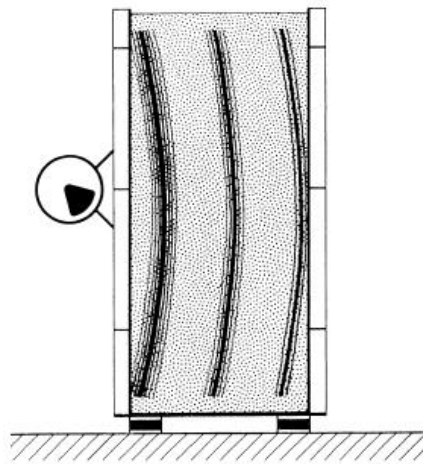


Figura 14. Método de vibrado de molde

También se conoce la característica de los vibrados de molde por la cual el incremento de frecuencia reduce el número de huecos superficiales (figura 15); esto se puede explicar mediante el hecho de que mayores frecuencias crean un mayor efecto de empuje sobre los finos del hormigón produciendo ciertos amontonamientos de estos en las superficies del molde.

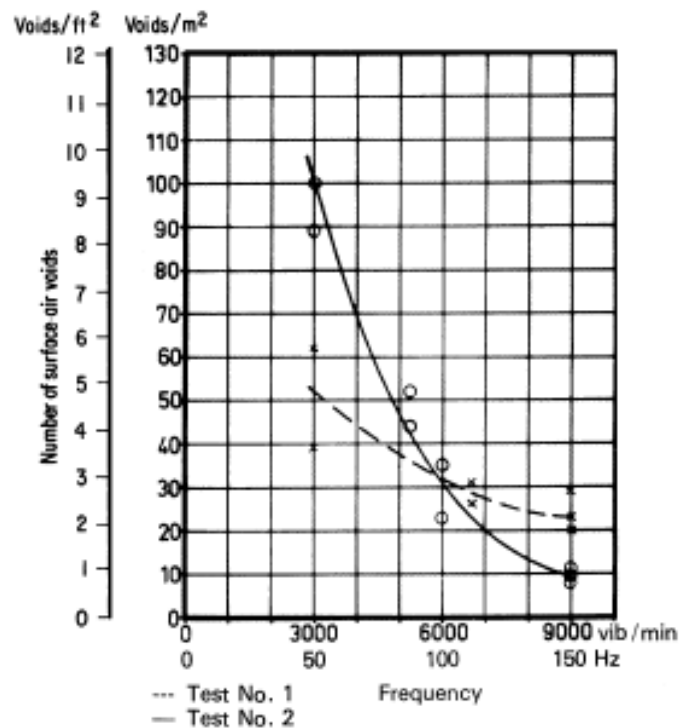
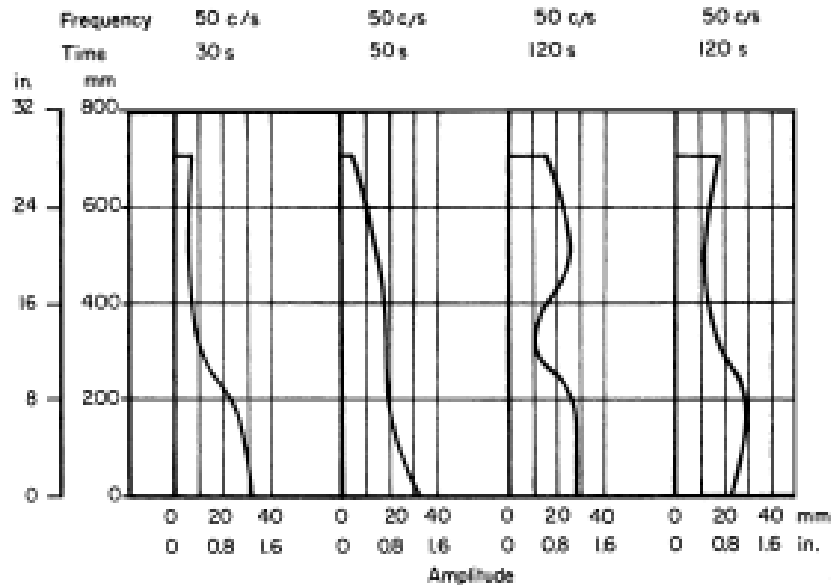


Figura 15. Representación gráfica de huecos frente a frecuencia (American Concrete Institute)

El último método de vibrado que se ha estudiado es el de la mesa vibrante (figura 17), los efectos de este método son menos consistentes y difíciles de interpretar que los resultados de otros procesos de vibrado. En una mesa vibrante, los encofrados, al mismo tiempo que el hormigón dentro de ellos, se pueden mover de forma medianamente libre durante la vibración, haciendo posible la resonancia. También, el reflejo de las ondas de presión frente a la superficie del hormigón influye sobre la amplitud de distribución que en muchas ocasiones resulta irregular (figura 16).



*Figura 16. Relación frecuencia amplitud (American Concrete Institute)*

La diferencia que tiene sobre el hormigón la realización del vibrado con el encofrado sujeto a la mesa de vibrado o suelto resulta mínima, aunque el tiempo de vibrado puede ser reducido mediante un encofrado no sujeto a la mesa. Por otro lado las interferencias que se producen son menores si el encofrado se encuentra sujeto rígidamente a la tabla de vibrado. Dentro de este tipo de vibrado la dirección que tiene el mismo fue estudiada concluyendo que un vibrado en dirección vertical es, en muchos casos, preferible debido a que los movimientos de la masa de hormigón resultan reducidos comparados con aquellos producidos por una vibración circular. En el método de la mesa de vibrado, una carga estática se introduce en ocasiones a la superficie del hormigón para incrementar la presión dinámica y mejorar de esta manera la compactación de mezclas más secas y rígidas. Los mejores resultados se obtienen combinando la vibración y la presión estática al mismo tiempo.

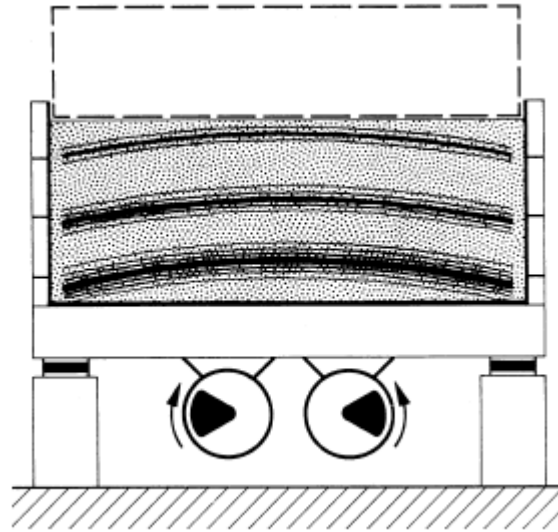


Figura 17. Método de mesa de vibrado

El vibrado puede causar la rotación y alineación preferencial de las fibras de acero en una determinada dirección dentro del hormigón. El vibrado exterior tiende a orientar las fibras en el plano perpendicular a la dirección de vibración, con tendencia a la orientación plana de las fibras. Algunos autores coinciden en que el vibrado o tiene un efecto significativo en la orientación de las fibras si el espécimen es vibrado durante tiempos inferiores a 2 minutos y la trabajabilidad del hormigón no es muy grande, por otro lado un vibrado excesivo produce una segregación de las fibras que tienden a amontonarse en la parte inferior del encofrado. De acuerdo con estudios experimentales llevados a cabo e diferentes experimentaciones, existe la idea generalizada de que el vibrado externo tiene una influencia directa e la orientación de las fibras a lo largo del eje de gravedad: cuanto más tiempo se vibra un HRFA, mayor resulta la tendencia de alineación en el plano horizontal, produciéndose un decremento de la posición en el plano del eje de gravedad. Este efecto aunque resulta conocido, todavía o ha sido recogido e tablas y se encuentra todavía en fase de experimentación.

Otra de las hipótesis que existen para la orientación de fibras está basada en opiniones de profesionales sobre la influencia de la longitud de las fibras en su orientación. En este tema existe todavía demasiada incertidumbre debido a que los investigadores no terminan de coincidir en si esta característica de las fibras de acero influye en su comportamiento orientacional.

### **3.2.4. Orientación mediante solenoides.**

Como se explicó en la Actividad 5 y, concretamente en el entregable 5, el posicionamiento y orientación de las fibras de acero empleando campos magnéticos produce resultados satisfactorios a nivel de probeta.

Uno de los factores más importante a tener en cuenta en la mezcla de componentes de hormigón reforzado con fibras de acero es el hecho de cómo distribuir uniformemente dichas fibras. Esto termina siendo extremadamente importante en el caso de que se aumente el número de fibras necesario para incrementar las capacidades resistentes del hormigón. En la mezcla de hormigones reforzados con fibras de acero, las fibras de acero tienden a quedar enganchadas entre ellas y a conglomerarse dando lugar a erizos de fibras. Estos erizos son muy difíciles de deshacer una vez que se han formado, es por esto, que resulta de extrema importancia evitarlo. La formación de estos erizos reducirá la resistencia del hormigón reforzado con fibras de acero considerablemente y resulta muy importante, sobre todo desde el punto de vista de la vida útil estructural, eliminar estas discontinuidades o evitar por completo su aparición.

En este apartado se analizarán diferentes posibilidades para la orientación de fibras de acero mediante solenoides y serán comparadas con el nuevo método desarrollado y utilizado en este estudio, durante la Actividad 5, para dar orientación preferencial las fibras de acero introducidas en el hormigón.

#### **3.2.4.1. Método Takazuka**

Uno de los métodos pioneros en los que se empleó la idea de utilizar un solenoide con el objetivo de producir una orientación preferencial de las fibras de acero adicionadas al hormigón fue realizado por Takeshi Takazuka. La patente de este inventor “Method of mixing steel fiber reinforced concrete” data de 1979 y como su nombre indica trata sobre la forma de introducir fibras de acero dentro del hormigón.

La patente contiene la explicación de un método general de mezcla de fibras y hormigón. Hace 30 años ya existía la sospecha de que la orientación preferencial de las fibras de acero influía en la calidad del hormigón fabricado, y más especialmente mejoraba las capacidades resistentes del mismo. Takazuka introdujo dos formas de orientar las fibras de acero antes de introducirlas en el hormigón; la primera de ellas emplea un dosificador como el que se observa en la figura 18, con el que se consigue pre-orientar las fibras de acero y que se emplea previamente a la aplicación de la máquina de solenoides.

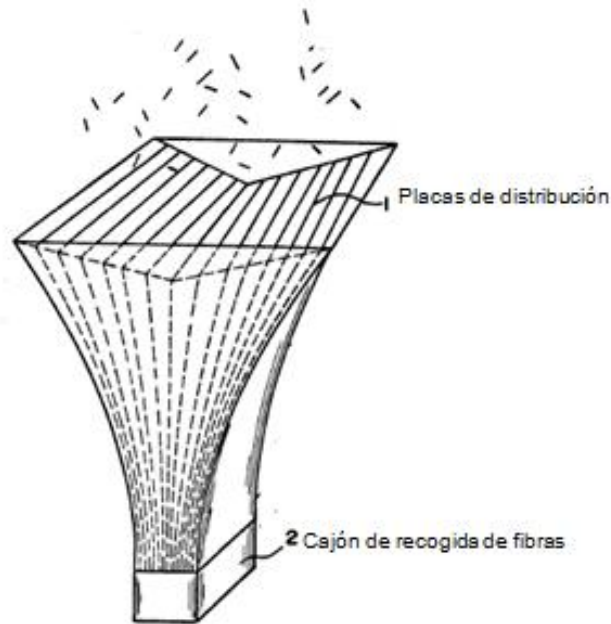


Figura 18. Dosificador de fibras de acero (USP, Takazuka)

Una vez que las fibras han sido pre-orientadas, se introducen en la máquina creada por Takuzka, que emplea un campo magnético aplicado sobre las fibras de acero que se introducen en el sistema. La aplicación de este campo magnético tiene lugar a la salida de un cuello largo por el que se desplazan las fibras introducidas. De esta manera conforme las fibras salen de la máquina para depositarse en un recipiente que las contendrá, sufren la acción de la intensidad magnética (800 gauss) que le proporciona una orientación preferencial. Este método se encuentra representado por la figura 19.

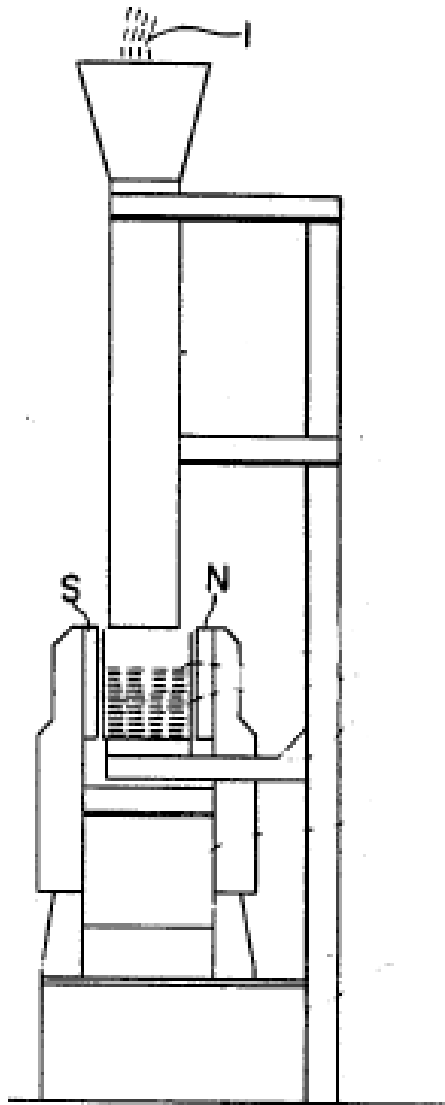


Figura 19. Orientador magnético de fibras de acero (USP, Takazuka)

En la figura, el valor 1 corresponde a las fibras de acero que se introducen por el embudo de la máquina. A lo largo que las fibras escapan del interior, éstas son orientadas a su salida por un campo magnético (N-S) que produce que las fibras queden almacenadas con una orientación preferencial. Finalmente, se introducen en el hormigón en estado fresco distribuyéndolas por el mismo con la orientación que ya ha sido definida.

### 3.2.4.2. Método Svedberg

En 2004 se patentó en España un método de orientación de fibras de acero en el hormigón bajo el nombre de “Método y dispositivo para el alineamiento magnético de fibras” perteneciente al inventor sueco Björn Svedberg.

Este método consiste en orientar las fibras de acero adicionadas al hormigón por medio de un dispositivo magnético giratorio. La maquinaria está encaminada especialmente a suelos o losas de gran tamaño debido a que se necesita en estos elementos una orientación preferencial en una dirección definida y que es precisamente lo que proporciona la utilización de este método, además el sistema se encuentra introducido en una maquinaria que se desplaza a través de raíles y que se puede observar en la figura 20. En esta figura se muestran las etapas sucesivas en la producción de un pavimento

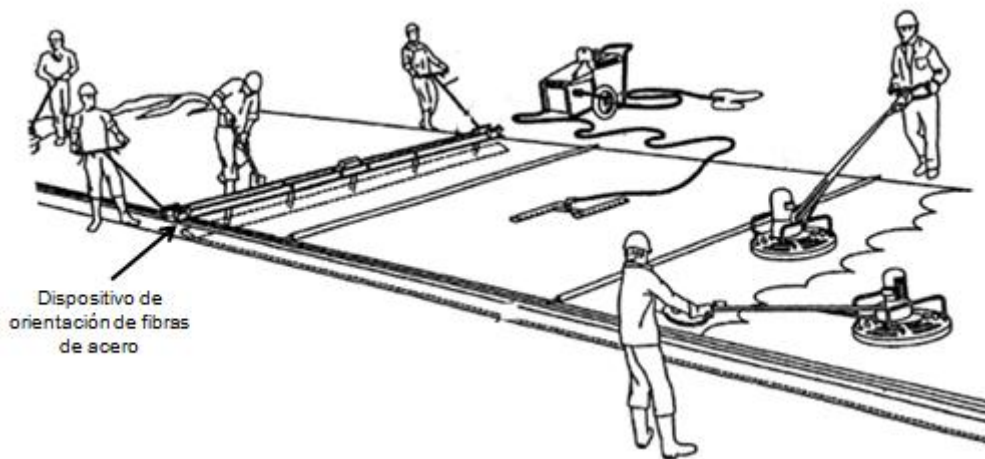


Figura 20. Etapas sucesivas en la producción de un pavimento (OEPM, 2 207 254)

El funcionamiento de este dispositivo consiste en la introducción de tres imanes permanentes, fabricados de neodimio, que se encuentran uniformemente distribuidos alrededor de un rodillo permanente. Las superficies exteriores de los imanes se colocan sobre una superficie circular de manera que cuando el rodillo se hace girar en sentido anti-horario, los imanes permanentes comienzan el alineamiento de las fibras produciéndose todo esto tal y como se representa esquemáticamente en la figura 21.

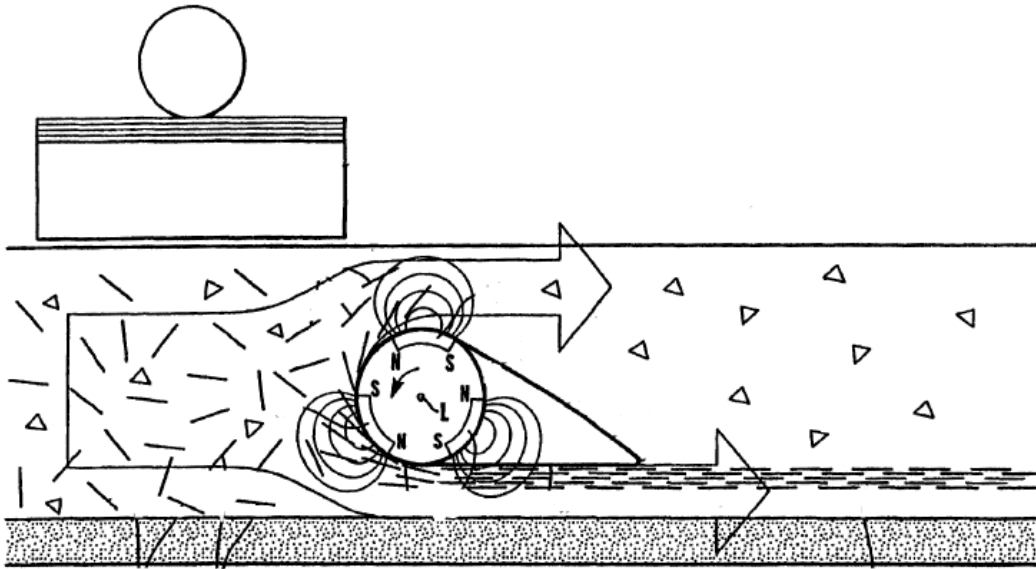


Figura 21. Aplicación del efecto del solenoide al hormigón con fibras (OEPM, 2 207 254)

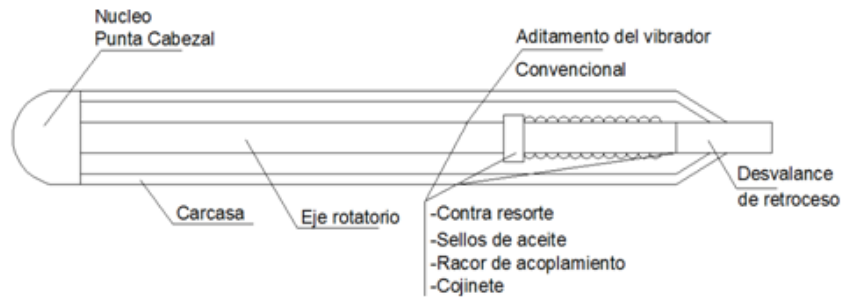
Como se puede observar a lo largo que avanza el dispositivo que se encuentra apoyado en los raíles, se va produciendo la alineación de las fibras dispuestas aleatoriamente en el hormigón. Este sistema es efectivo para los hormigones en los que se necesita dar una orientación preferencial en una sola dirección, la cual se corresponderá con la del avance del conjunto a través del hormigón.

#### **3.2.4.3. Método experimental innovador**

Se trata del método empleado durante la Actividad 5 para orientar de forma preferente las fibras de acero distribuidas como refuerzo en el hormigón y que quedó comprobado que proporciona resultados muy positivos. Este método se aplica durante la fase de vibrado, conjuntamente con este proceso, disponiendo para ello un solenoide tipo Latching serie 68 de 24V, 10 W con 400mA, y 2.2 Kgf, este solenoide es elegido por ser el que mejor comportamiento proporcionó durante la Actividad 5. El solenoide se dispondrá en la cabeza convencional del vibrador tal y como se muestra en la figura 22.



### Cabezal de vibrador convencional



### Cabezal propuesto para atracción magnética de fibras

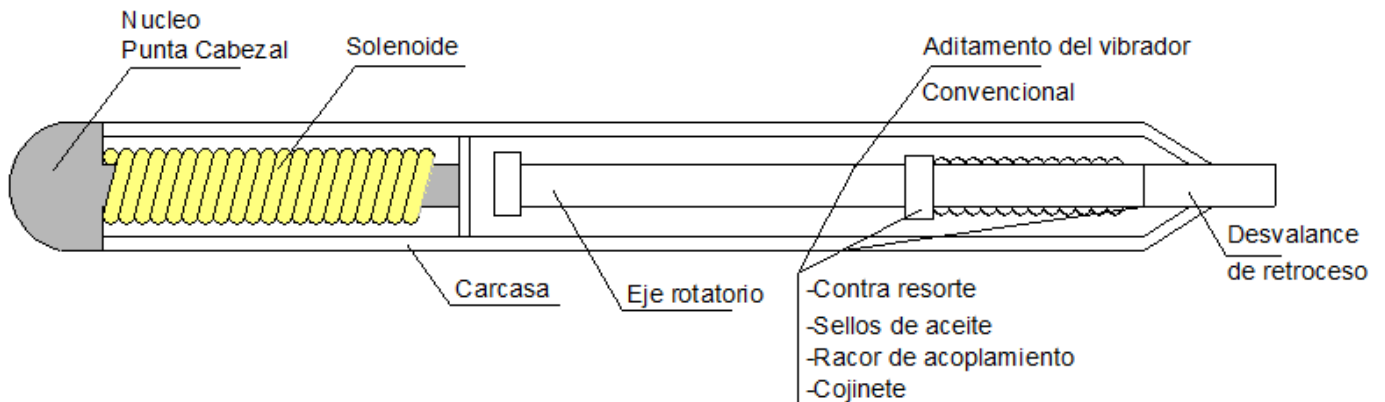


Figura 22. Vibrador convencional y vibrador con solenoide integrado

Durante la etapa de vibrado se introduce el vibrador en la mezcla de hormigón y se mantiene en posición y encendido durante un tiempo determinado (el necesario para que se produzca la eliminación del aire de los huecos en la mezcla y asegure la compactación) antes de pasar a la siguiente zona de vibrado en donde el proceso anterior no produjo ningún resultado o afectación. En la figura 23 se muestra un ejemplo del proceso de vibrado que se sigue en el hormigón. Cada círculo representa el área afectada por el vibrado en cada uno de los puntos numerados en los que se ha introducido el vibrador, de manera que se cubre el área total del hormigón durante el proceso.

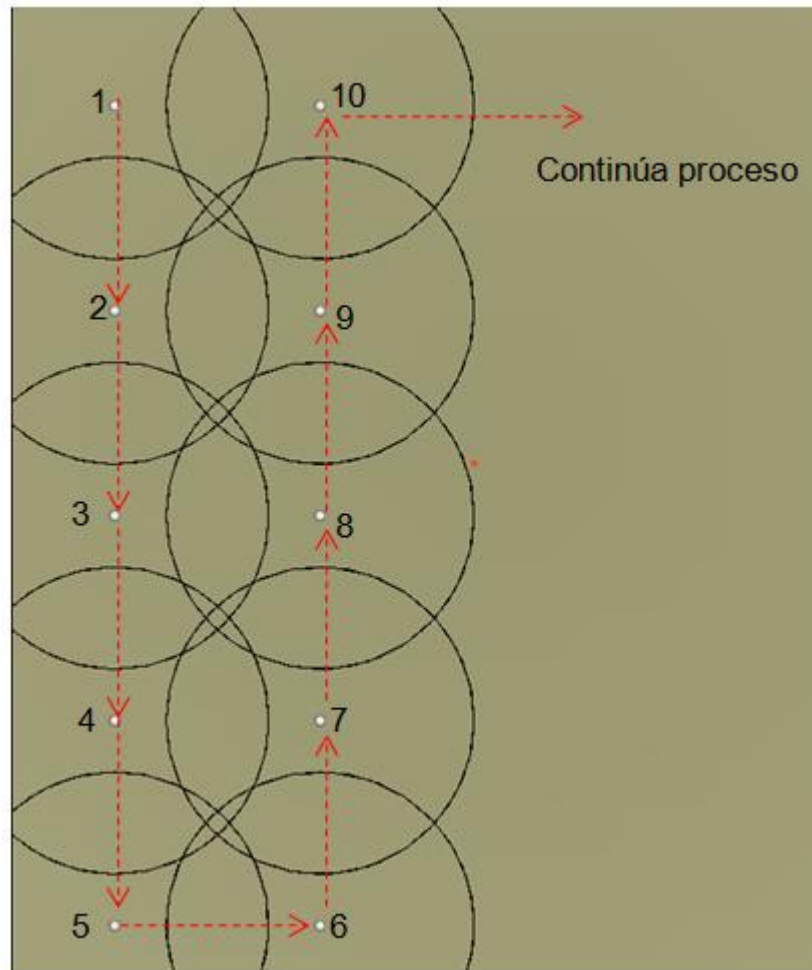


Figura 23. Distribución del proceso de vibrado.

Dependiendo del tipo de hormigón y del vibrador, las distancias a las que se debe introducir este instrumento variaran y deben ser controladas; en el caso de que se esté vibrando un hormigón con fibras de acero y se decida orientarlas, según el método propuesto y la experimentación previa de la Actividad 5, dicho vibrador deberá tener un solenoide adicional introducido en la punta del instrumento.

El solenoide localizado en el interior del vibrador tiene un efecto de atracción muy considerable con respecto a las fibras de acero. El vibrado con este nuevo tipo de instrumento debe realizarse de forma un tanto diferente. El vibrador no se introducirá y se dejará estático durante los segundos correspondientes al procedimiento habitual sino que ahora además deberá ser desplazado en el interior del hormigón en la dirección en la cual se desean orientar las fibras de acero. Este nuevo movimiento debe tener lugar para evitar la formación de zonas excesivamente densas de fibras de acero que pueden dar

lugar a erizos de fibras que influyen negativamente en el hormigón y más concretamente en sus propiedades.

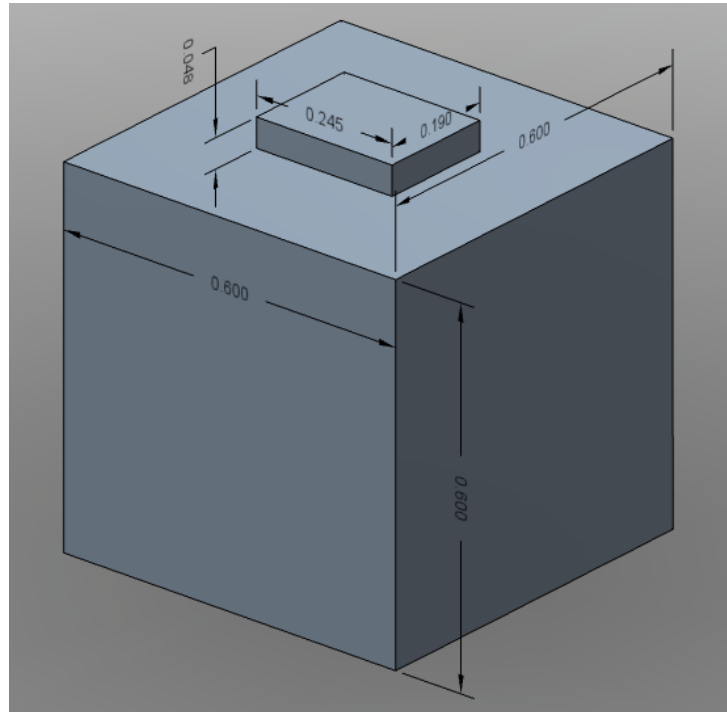
El control de la activación y desactivación del campo magnético del solenoide proporcionará la posibilidad de no sólo orientar las fibras de acero en una dirección preferencial, sino también densificar (sin crear erizos) aquellas partes del hormigón que resulta conocido que van a sufrir mayores tensiones en servicio. Al incluir el solenoide en el vibrador, los tiempos de vibrado se alargarán sin llegar a sobrepasar el límite de tiempo a partir del cual el vibrado no sólo no resulta beneficioso, sino que es perjudicial. Además los procesos de vibrado requerirán un mayor control debido a que los instrumentos se deben mover de manera muy particular en el interior del hormigón en estado fresco para lograr una buena orientación preferencial de las fibras de acero alojadas en su interior.

El vibrador común acompañado de un solenoide es una gran alternativa y comparada con los dos otros métodos que han sido tratados, es la alternativa que mejor cumple con las necesidades de orientación y más directamente trabaja en este aspecto. En relación con los otros dos métodos presentados podemos destacar los siguientes rasgos sobre el método de la Actividad 5:

- Es el único método que permite realizar el proceso de orientación de fibras al mismo tiempo que se está vibrando el hormigón.
- Es el único de los tres métodos que no requiere de grandes máquinas o equipos para la orientación satisfactoria de las fibras.
- Es posible que los métodos de las patentes funcionen pero habiendo realizado experimentos satisfactorios, este método es el más seguro y el que más confianza genera para su utilización.
- Este método no varía sensiblemente los hábitos y maquinaria a la que están acostumbrados los trabajadores de construcción. De esta manera resulta mucho más sencillo llevar a cabo el mismo proceso con cambios mínimos, sin tener que conseguir personal específicamente cualificado para el manejo de nueva maquinaria.
- Los estudios previos de orientación preferencial de fibras de acero en el hormigón se están quedando obsoletos y la alternativa propuesta utiliza las últimas técnicas y conocimientos que se aplican a este área de conocimiento.

#### **4. ANÁLISIS ECONÓMICO.**

A continuación se presenta un estudio económico en el que se comparan los diferentes tipos de hormigones empleados en función del coste, tanto de los materiales utilizados como de la mano de obra necesaria para su ejecución. En el estudio se generalizan los resultados obtenidos para la probeta desarrollada en la Actividad 5 y que tiene las características que se presentan en figura 24.



*Figura 24. Probeta estudiada con dimensiones en metros.*

Un poco más adelante se muestran las diferencias en dosificación entre la probeta diseñada con un hormigón armado que debe resistir 3.6 MPa de tracción y la dosificación de las probetas de hormigones reforzados con fibras de acero. Además se introduce el coste debido a los materiales.

<b>HORMIGÓN CON FIBRAS</b>	<b>kg/m3</b>	<b>densidad elemento (kg/m3)</b>	<b>cantidad en probeta (kg)</b>	<b>Precio (€/kg)</b>	<b>Precio en probeta (€)</b>
Cemento I 42,5 R/SR Granel	330	1500	71,28	0,20371	14,52
Arena río (0-5mm)	1203	1300	259,85	0,01385	3,60
Gravilla silícea 2/5 machaqueo	407	1350	87,91	0,014815	1,30
Agua	145	1000	31,32	0,00151	0,05
Glenium C303 SCC	2,31	1035	0,50	2,9	1,45
Dremix 50 (1,3%V)	104	7850	22,46	2,01	45,15
<b>TOTAL</b>	<b>2191,31</b>		<b>473,32</b>		<b>66,07</b>

<b>HORMIGÓN ARMADO</b>	<b>kg/m3</b>	<b>densidad elemento (kg/m3)</b>	<b>cantidad en probeta (kg)</b>	<b>Precio (€/kg)</b>	<b>Precio en probeta (€)</b>
Cemento I 42,5 R/SR Granel	330	1500	71,28	0,20371	14,52
Arena río (0-5mm)	1203	1300	259,85	0,01385	3,60
Gravilla silícea 2/5 machaqueo	407	1350	87,91	0,014815	1,30
Agua	145	1000	31,32	0,00151	0,05
Glenium C303 SCC	2,31	1035	0,50	2,9	1,45
Armado	14,6	7850	2,14	1,1	2,36
<b>TOTAL</b>	<b>2101,91</b>		<b>453,00</b>		<b>23,27</b>

Se puede observar con claridad el aumento de coste introducido por las fibras de acero que introducen un coste del orden de 20 veces el coste introducido por un armado para tracción.

Se decide realizar un estudio, mediante las formulaciones de Zielinski y Rowe aplicadas junto a las de carga sobre macizo de la EHE-08 (presentadas en la Actividad 4), para conocer el aumento de armado (en kilogramos de armadura) necesario a medida que se aumentan las tracciones que actúan sobre la probeta definida en la figura 24.

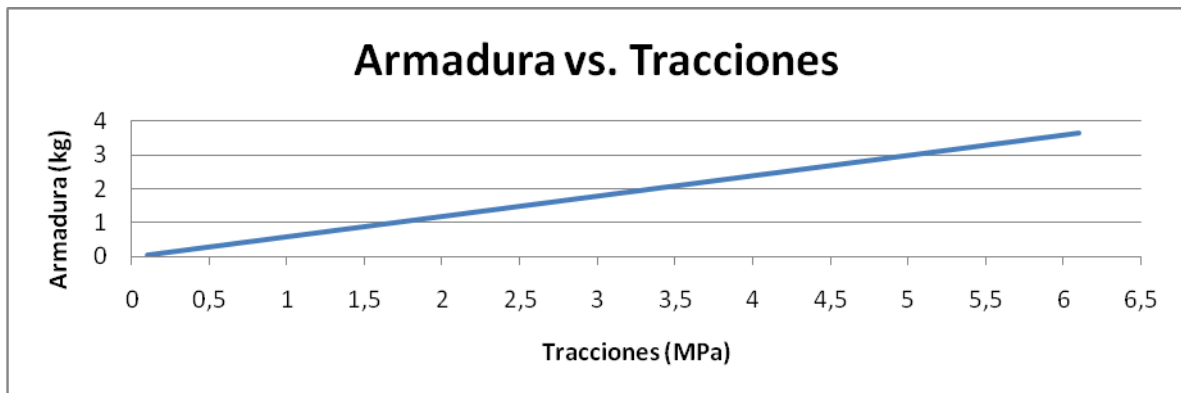


Figura 25. Armado en función de la tracción aplicada sobre la probeta experimental

Se puede percibir que la relación entre el aumento de armadura que se debe aplicar a la probeta experimental y el incremento de tensiones de tracción que tiene lugar sobre ella resulta lineal (figura 25).

A partir de las conclusiones a las que se llega en relación con la linealidad del incremento de armado en función del incremento de tensiones de tracción aplicadas en la probeta, se decide realizar un estudio similar para el caso de las fibras de acero aplicadas como refuerzo en el hormigón. Para ello se conocen los valores experimentales arrojados por los ensayos durante la Actividad 4 en los que el hormigón reforzado con fibras de acero aleatoriamente distribuidas resiste tracciones de 4.3 MPa y el hormigón con las fibras orientadas preferencialmente resiste tracciones de hasta 6 MPa. A partir de estos datos y asumiendo que la relación entre el incremento en el volumen de fibras y las tracciones ejercidas será lineal al igual que sucede en el caso del hormigón armado, se obtienen los resultados presentados en la figura 26.

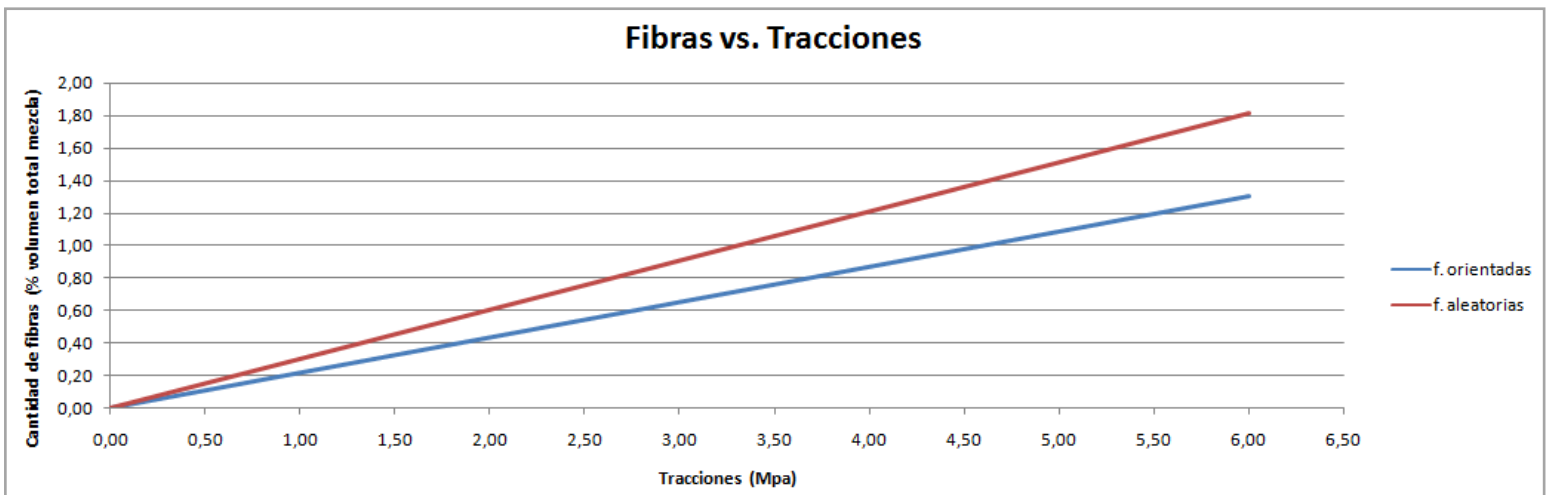


Figura 26. Cantidad de fibras en función de la tracción aplicada sobre la probeta experimental

Por último se analizan los costes derivados de la mano de obra, también obtenidos del PREEC, los cuáles aumentan en los hormigones con fibras debido a que los tiempos de ejecución también lo hacen.

Mano de obra	€/hr
Oficial primera	15,77
Peón	13,78

Tiempos de Trabajo (hr/m3 hormigón)		
vertido de hormigón	introducción de fibras	orientación de fibras
0,35	0,167	0,5

Los resultados derivados de este estudio muestran que en la actualidad debido al coste de la fibra de acero no resulta viable económicamente su utilización, siendo el coste total del orden de 3 veces mayor que en un hormigón armado a tracción de manera convencional. También se puede observar que la orientación de las fibras de acero no supone un coste excesivo en comparación con el coste de los hormigones que tienen estas fibras aleatoriamente distribuidas.

Por último se presentan tabulados los resultados del estudio y su generalización.

<b>HRFA (fibras orientadas)</b>		
<b>Material</b>	<b>Mano de obra</b>	<b>TOTAL</b>
€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>
305,87	30,05	<b>335,93</b>

<b>HRFA (fibras no orientadas)</b>		
<b>Material</b>	<b>Mano de obra</b>	<b>TOTAL</b>
€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>
305,87	15,28	<b>321,15</b>

<b>Hormigón sin fibras</b>		
<b>Material</b>	<b>Mano de obra</b>	<b>TOTAL</b>
€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>
107,75	10,34	<b>118,09</b>

## **5. CONCLUSIONES.**

A continuación se presentan las deducciones realizadas del estudio económico y el protocolo de puesta en obra de la Actividad 6.

- La forma más efectiva de orientar las fibras de acero en el hormigón reforzado por éstas, consiste en realizar un vertido sobre el encofrado en el que el flujo comience a orientar preferencialmente las fibras de acero para después completarse el proceso utilizando el método del solenoide propuesto y desarrollado en la Actividad 5.

- Resulta probado el hecho de que actualmente debido al precio de las fibras de acero, no resulta viable económicamente la utilización de las fibras de acero en sustitución del armado tradicional del hormigón.
- La orientación de las fibras de acero es un campo en el que la investigación debe explotarse debido al enorme margen de mejora existente en la actualidad.

## **6. BIBLIOGRAFÍA.**

- ACI , American Concrete Institute
- EHE-08, Normativa de Hormigón Estructural 2008
- Lathaste, Behloul y Breyse (2008), Characterisation of fibres distribution in a steel fibre reinforced concrete with electrical resistivity measurements.
- Ronald F. Zollo (1996), Fiber-reinforced Concrete: an Overview after 30 Years of Development.
- Takazuka (1975), "Method of Mixing Steel Fiber Reinforced Concrete", USP United States Patent.
- Svedberg (2004), "Método y dispositivo para el alineamiento magnético de fibras", OEPM, Oficina Española de Patentes y Marcas.
- Dupont D, Vandewalle L (2002) Characterisation of steel fibre concrete with a  $\sigma$ - $\epsilon$  relation, Proceedings of the 4th International PhD Symposium in Civil Engineering, Munich, 19-21 September 2002, 108-114.
- Fantilli AP, Vallini P (2007) A Cohesive Interface Model for the Pullout of Inclined Steel Fibers in Cementitious Matrixes, Journal of Advanced Concrete Technology.
- Li VC, Stang H, Krenchel H (1993) Micromechanics of crack bridging in fiber reinforced concrete, Materials and Structures.
- Mora F (2008) Distribución y orientación de fibras en dovelas aplicando el ensayo de Barcelona, PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.