

## DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONTENCIÓN INNOVADORAS

Aimar Orbe

Jesús Cuadrado

Ramón Losada

Eduardo Rojí

*UNIVERSIDAD DEL PAIS VASCO / EUSKAL HERRIKO UNIBERTSITATEA (UPV/EHU)*

### **Abstract**

The interest in increasing the added value of civil engineering projects, creates the need for introducing the results of current research on materials technology and new building systems in new projects. Progress, that ensure the requirements imposed by current structural regulations and can also bring many improvements to the economic aspect, temporal and environmental.

Materials like concrete are embedded in a spiral of continuous improvement that requires projection in daily designs for entry into the market. Combining two of the most promising techniques for future raises its application in structural elements of structural responsibility.

That is why it has been done an extensive research on retaining walls made with steel fiber reinforced self-compacting concrete in order to establish solid bases for calculating that designers demand to address innovative designs with sufficient security.

Designs that reduce material costs, time, noise at work, thus increasing competitiveness and security of the works, while the material properties allow for innovative designs.

**Keywords:** *retaining walls; sustainability; self compacting concrete; steel fibres*

### **Resumen**

El interés por incrementar el valor añadido de los proyectos de ingeniería civil, origina la necesidad de introducir en los proyectos los resultados de las investigaciones actuales sobre la tecnología de materiales y los nuevos sistemas constructivos. Avances, que garantizando los requisitos impuestos por la normativa vigente de carácter estructural, pueden además aportar múltiples mejoras de aspecto económico, temporal y medioambiental.

Los materiales como el hormigón están imbuidos en una espiral de mejora continua que requiere de su proyección en diseños cotidianos para su entrada en el mercado. Aunando dos de las técnicas con más proyección de futuro se plantea su aplicación en elementos constructivos de responsabilidad estructural.

Es por ello que se ha realizado una extensa investigación sobre muros de contención realizados con hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero, a fin de establecer unas bases de cálculo sólidas que los proyectistas demandan para abordar diseños innovadores con la suficiente seguridad.

Diseños que permiten reducir costes de material, plazos, ruidos en la obra, con lo que aumenta la competitividad y la seguridad de las obras, al mismo tiempo que las características del material permiten realizar diseños innovadores.

**Palabras clave:** *estructuras de contención; sostenibilidad; hormigón autocompactante; fibras de acero*

## 1. Introducción

La implantación de nuevos sistemas constructivos en el desarrollo de proyectos, es una parte fundamental en los procesos de investigación, puesto que retroalimenta a la misma y aporta los datos necesarios para establecer unas bases de cálculo satisfactorias y que garanticen la adecuada seguridad de las estructuras.

A la hora de emplear el hormigón reforzado con fibras de acero como material estructural, el proyectista necesita disponer de las herramientas adecuadas para diseñar estructuras con dicho material y dar un salto cualitativo en la apreciación actual de requerir resultados de ensayos previos para proceder a la redacción del proyecto.

Aun así, la dificultad de predecir la distribución de las fibras y su orientación en el espacio es el principal escollo que se debe superar dado que el comportamiento de los materiales que lo componen y, aunque no tan profundamente, la interfase entre ellos es bien conocido.

El HRFA no es un material isótropo y la diferencia de sus características resistentes en las diversas direcciones se puede ver acrecentada por los criterios empleados al formular el hormigón y la disposición de los materiales durante su ejecución.

En el presente estudio se pretende inducir a las fibras una orientación preferencial que permita optimizar el uso del material de refuerzo, de forma que se disponga de manera mucho más eficiente frente a los esfuerzos de sollicitación originados por las acciones exteriores a soportar.

Para ello se han aunado dos técnicas no muy recientes como son los hormigones autocompactantes (HAC) y los hormigones reforzados con fibras de acero (HRFA), pero que no han irrumpido en el mercado convencional de manera rotunda aun.

### 1.1 Precedentes

La irrupción de la nueva instrucción de hormigón estructural (EHE-08), ha permitido la introducción de unas bases de cálculo que, aun siendo mínimas, van a sentar un precedente positivo en el futuro empleo de las fibras de acero como material de refuerzo del hormigón, en combinación o no con el clásico refuerzo realizado mediante barras corrugadas.

Las consideraciones recogidas dentro del anejo correspondiente al hormigón reforzado con fibras, vienen en gran medida derivadas de estudios internacionales que los diversos comités técnicos emplean para establecer criterios de diseño.

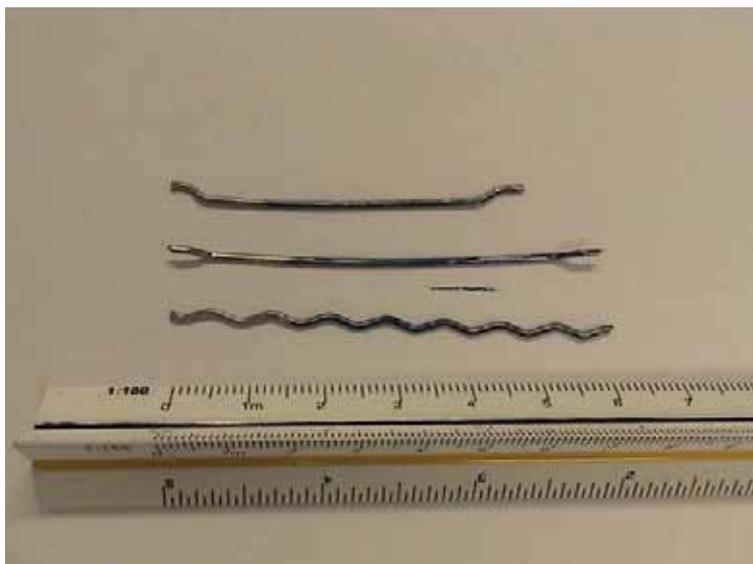
Oficialmente por tanto, solamente se considera viable el empleo del HRFA desde la entrada en vigor de la EHE-08, y de todas formas, no se establecen criterios suficientes para proyectar con dicho material.

### 1.2 Situación Actual

El empleo de las fibras se limita habitualmente a elementos con escasa responsabilidad estructural como los pavimentos y los sostenimientos en túneles. La aplicación en elementos estructurales de mayor relevancia debe venir acompañada de un conocimiento adecuado del material para garantizar su resistencia y estabilidad.

Como criterio de empleo de las fibras como refuerzo del hormigón se reiteran las situaciones donde los diversos condicionantes del proyecto obligan a disponer una cuantía de armado tradicional considerable por el que puede resultar complicado el correcto hormigonado, o elementos donde la dirección de los esfuerzos presentan una orientación espacial.

Se han dado pasos para su empleo en elementos estructurales de carácter edificatorio (Maturana, 2010) como las losas macizas de forjado, pero su uso se ve todavía muy restringido.



**Figura 1: Tipos de fibras de acero estudiados**

El presente estudio pretende introducir ambas tecnologías del hormigón en elementos corrientes demostrando que el ahorro y la idoneidad de la solución también le corresponden.

## **2. Objetivos**

El objetivo del estudio es doble. Hasta la fecha, la mayoría de los estudios realizados sobre el material se reducen a fabricar y analizar probetas de tamaño relativamente pequeño. A fin de paliar la escasez de datos en ese sentido, se pretende por un lado determinar la influencia de la puesta en obra de un elemento estructural real en la orientación y distribución de las fibras. Para ello, se deben tomar unos criterios de partida que se detallarán en la metodología a emplear.

Por otro lado, se va a probar que el elemento fabricado cumple los requisitos exigidos por la normativa vigente para cumplir su fin estructural con los adecuados niveles de seguridad.

De forma añadida, su correcta aplicación como elemento de contención (posiblemente líquidos) queda garantizada mediante el empleo de hormigones autocompactantes que aumentan significativamente su compacidad para evitar posibles filtraciones y/o corrosiones en el acero.

Se aporta incluso un componente estético de diseño dado que esa propiedad autocompactante y la utilización de fibras permite dejar impresos en el hormigón diversos motivos o logotipos, sin interferir en el armado o en el correcto llenado del encofrado.

Con todo ello se quiere dar uso al material en aplicaciones estructurales de relevancia y envergadura.

## **3. Metodología**

La búsqueda de nuevas aplicaciones al material, ha llevado a los autores del proyecto a encaminar un estudio de investigación a su utilización en elementos de contención que aporten la suficiente innovación como para que el mercado tenga en consideración las bondades planteadas.

A diferencia de las estructuras con complicados estados tensionales en diversos planos, se plantea el empleo del HACRFA en estructuras convencionales con situaciones de esfuerzos simples, pero que a su vez dada su geometría requieran una labor de armado mas trabajosa. Ese es el caso de los depósitos o tanques cilíndricos que serán la base del presente estudio.

En este sentido se ha formulado un hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero que permita por un lado, reducir los costes y tiempos de ferrallado y vibrado de la estructura de contención, al mismo tiempo que se realiza un elemento compacto y resistente como lo exige la aplicación específica para evitar cualquier tipo de filtración.

El tipo de fibra a emplear se ha decidido en base a un estudio paralelo sobre el comportamiento frente a esfuerzos de arrancamiento a los que se han sometido diversos tipos de fibras con varias longitudes embebidas.

**Figura 2: Ejecución de muro de HACRFA**



Mas importante es si cabe, la orientación que impone el flujo del hormigón en su recorrido dentro del encofrado, paralela a la dirección longitudinal del muro. El movimiento de la masa y el efecto pared de los encofrados obligan a las fibras a posicionarse paralelas a la dirección en la que se producen los esfuerzos de tracción principales de la estructura.

Los modelos habitualmente empleados para determinar la orientación (Dupont, 2005) no son suficientes para prever la disposición en esta aplicación. Es necesario por tanto establecer nuevas metodologías en base a estudios como el planteado para determinar dicha orientación.

#### **4. Caso de Estudio**

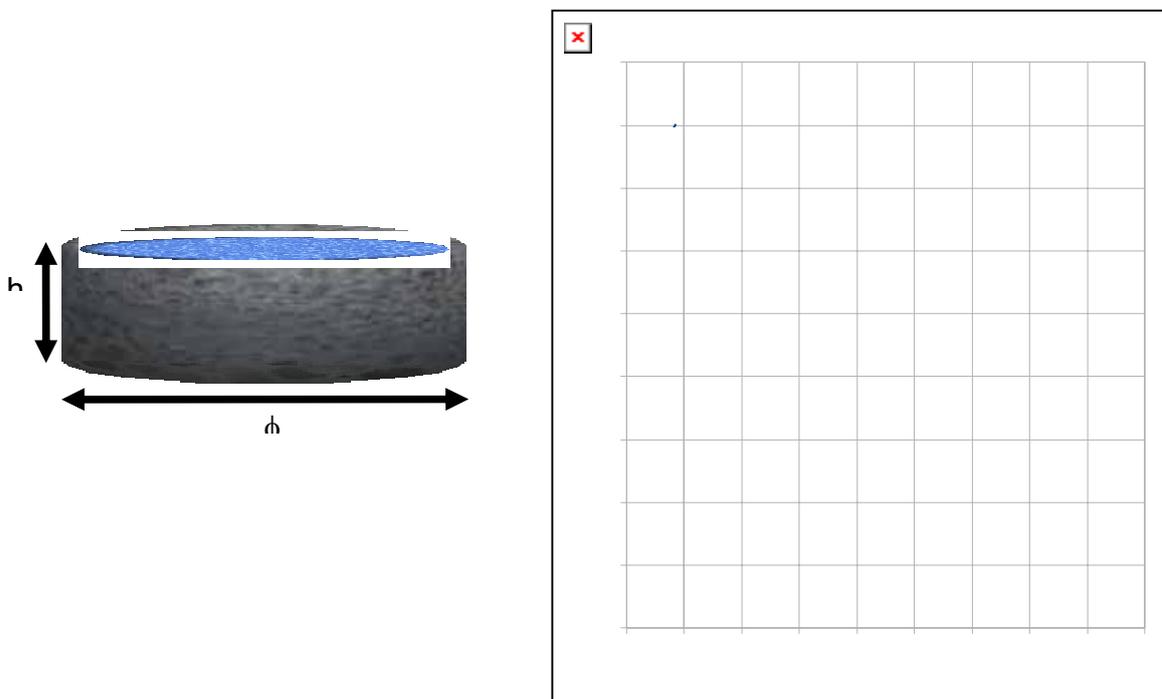
Se plantea el caso de un depósito de contención de líquidos de forma cilíndrica con un diámetro exterior de 10 metros y una altura máxima de 4 metros. El líquido a contener se supone agua con una densidad de  $10\text{KN/m}^3$ .

En concordancia con las clásicas formulas establecidas en la teoría de placas y laminas, la obtención de los esfuerzos en una estructura de contención cilíndrica se realiza resolviendo

la siguiente ecuación diferencial deducida de considerar el fuste del muro como un elemento estructural sobre un apoyo elástico.

$$d^2/dx^2(D \cdot d^2w/dx^2) + E \cdot h/R^2 \cdot w = Z \quad (1)$$

**Figura 3: Esfuerzos en la estructura**



Básicamente los esfuerzos se resumen en tracciones generadas en dirección perimetral, de forma que los esfuerzos flectores y cortantes se ven reducidos debido a la geometría circular de los muros y la base articulada.

Para contrastar los valores de diseño con resistencias del elemento real, se ha ejecutado un muro de 3 metros de altura y 6 metros de longitud con un espesor de 15 cm mediante un hormigón autocompactante reforzado con fibras de acero mediante bombeo del mismo desde uno de los extremos.

La necesidad de aportar finos a la masa a originado un incremento en el consumo de cemento que en posteriores pasos se intentará reducir. Ello ha llevado a formular un hormigón con una resistencia media a compresión de 60 MPa, que se ha reforzado con fibras de acero HE 1/50 de Arcelor en una cuantía de 50 kg/m<sup>3</sup>.

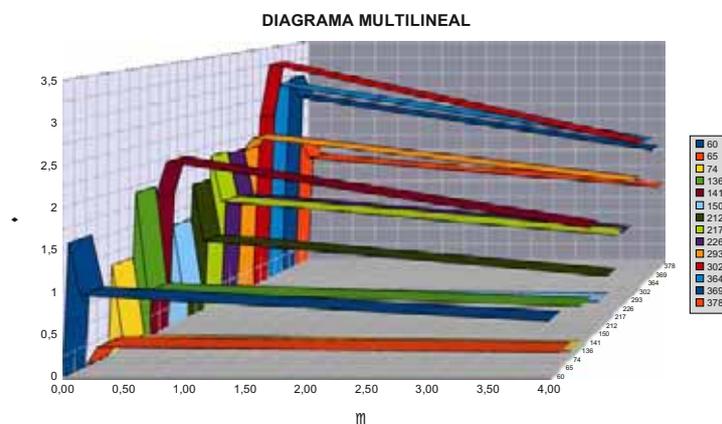
Tras el fraguado y curado del hormigón se ha procedido a tumbar y cortar el muro en diferentes probetas sobre los que se pretende realizar ensayos mecánicos, de durabilidad y diversos análisis para estudiar la densidad y la orientación de las fibras.

De acuerdo a la EHE-08, los resultados de los ensayos a flexotracción sobre probetas prismáticas de 15x15x60 cm se pueden extrapolar para la obtención de la ley constitutiva del material representada mediante un diagrama rectangular o un diagrama multilineal en caso de aplicaciones que requieran un cálculo ajustado.

## 5. Resultados

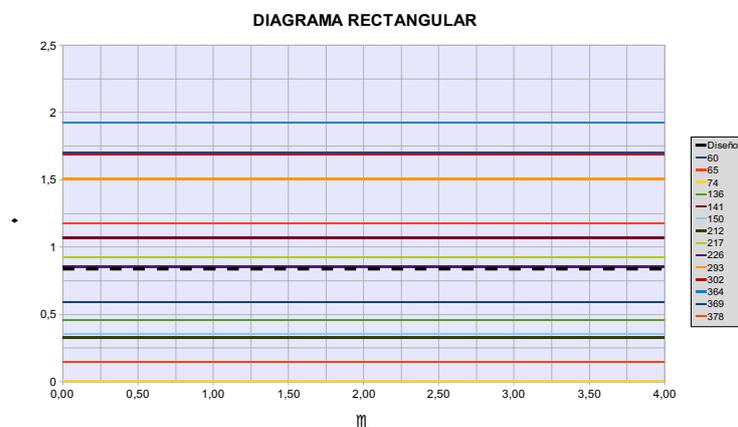
La tracción máxima que debe soportar el muro es un valor inferior a 135 KN a una distancia de la base igual al tercio de la altura.

**Figura 4: Resultados de los ensayos**



La tracción máxima que debe soportar el muro es un valor inferior a 135 KN a una distancia de la base igual al tercio de la altura. La línea negra discontinua de la Figura 4 indica esa tensión máxima que se compara con las resistencias a tracción de cada probeta mediante un diagrama rectangular (menos ajustado que el diagrama multilíneal anterior pero más intuitivo para la comparación).

**Figura 5: Comparativa de los resultados**



La probeta nº65 presenta unos valores reducidos dado que en la fase inicial del ensayo se ha producido un error en la adquisición de los datos. La probeta 74 no tiene fibra alguna.

La mayoría de las probetas y sobre todo las que se encuentran en la zona más solicitada, presentan valores muy superiores a los requeridos.

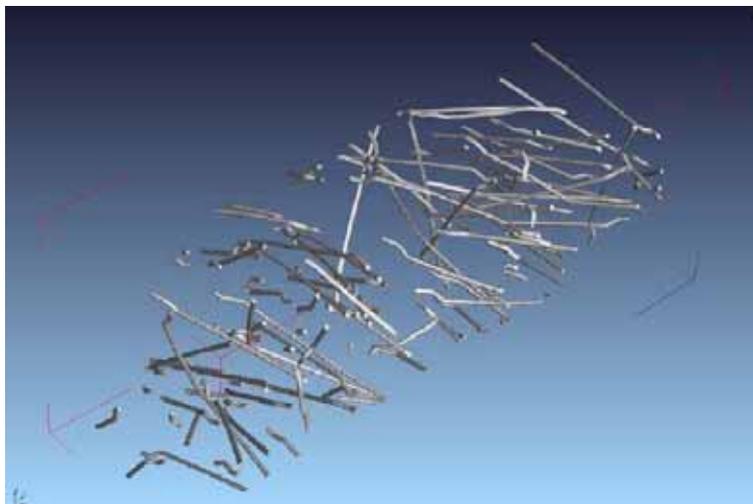
Es necesario mencionar que las diferencias de número de fibras y por tanto de resistencias residuales de las diferentes probetas de hormigón se debe a una segregación de los componentes de la masa, ya que la formulación del HACRFA es muy sensible a cualquier alteración.

**Figura 6: Fibras perpendiculares a plano de rotura**



Se han realizado diversos estudios (tomografía axial computarizada, estudio de inducción electromagnética, inspección visual, etc) sobre las piezas cortadas del muro a fin de corroborar, y así ha ocurrido, las hipótesis iniciales sobre la orientación preferencial de las fibras en dirección longitudinal del muro.

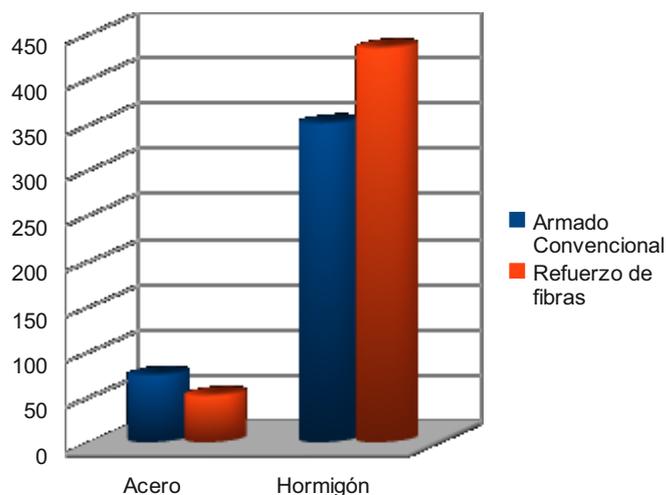
**Figura 7: TAC y fibras de testigo**



De acuerdo a un cálculo clásico, los muros del depósito se armarían mediante parrillas de barras de 12 mm de diámetro con una separación de 20 cm en sentido vertical y horizontal a ambas caras del muro. La solución planteada requiere una dosificación de fibras de 50 kg/m<sup>3</sup>, una reducción del 31%.

La diferencia radica en que las cuantía mínimas exigidas al armado convencional para evitar problemas de fisuración, no tienen lugar en el caso de las fibras, que representan un refuerzo repartido por todo el volumen de la masa.

**Figura 8: Consumo de materiales**



Al mismo tiempo, en el caso habitual de contener un líquido agresivo para las armaduras de acero, el ambiente específico indicado en la designación del hormigón ( $Q_a$ ,  $Q_b$  o  $Q_c$ ) obliga al uso de entre 300 y 350 kg de cemento por metro cúbico de hormigón. La exigencia de autocompactabilidad está relacionada con un incremento de finos en la formulación que, en este caso, se han obtenido en parte incrementando el contenido en cemento hasta 433 kg, un incremento del 24%.

## 6. Conclusiones

La principal conclusión extraída de los resultados es la idoneidad del material para soportar los esfuerzos originados en la estructura estudiada. El empleo de bajas dosificaciones de fibras no es impedimento para obtener un comportamiento de endurecimiento tras el valor de resistencia a tracción, propio en gran medida, de la matriz de hormigón.

La aportación de las fibras no es por tanto, únicamente para garantizar una cierta ductilidad del propio material que garantice mayores niveles de seguridad si no que además, proporciona una mejora de la resistencia a tener en cuenta en la comprobación de los estados límites últimos. Fenómeno que de acuerdo a lo recogido en la bibliografía teóricamente se alcanza con dosificaciones un 233% superiores a la empleada.

Por consiguiente, las líneas de investigación en las que se debe profundizar se centraran en las diferentes posibilidades de puesta en obra del material en elementos a escala real para determinar la influencia de la ejecución en la orientación y distribución de las fibras. De forma que se aporte una herramienta de diseño para el proyectista que le permita realizar los cálculos pertinentes mediante un análisis directo (Laranjeira, 2010), sin la necesidad de ensayos previos como hasta la fecha

El control de calidad de las estructuras se deberá encaminar a establecer métodos de ensayo no destructivos que permitan cuantificar la densidad y/o orientación de las fibras dentro del propio elemento, como los estudios realizados hasta la fecha con microondas propagativas de banda ancha (Roqueta, 2010).

Así mismo, se deben mejorar los métodos de dosificación del hormigón autocompactante reforzado con fibras para obtener formulas mas robustas que eviten la segregación de los áridos y de las fibras principalmente; causa principal de las desviaciones detectadas. De igual forma, se deberá tender a emplear otro tipo de finos (filler calizo, aditivos, etc.) con el fin de reducir el consumo de cemento y mejorar la solución económicamente y desde el punto de vista de la sostenibilidad.

**Figura 9: Impresión en HACRFA**



La simbiosis entre ambas tecnologías del hormigón es correcta garantizado unos acabados estéticos óptimos en los que no se aprecia la aparición de ninguna de las fibras metálicas que pueda alterar la imagen del conjunto.

Queda probado de igual forma que dentro de los límites del conocimiento actual, la solución propuesta da respuesta al problema planteado de manera adecuada, segura y con el ahorro y el diseño innovador requerido.

## **7. Referencias**

Dupont D.; Vandewalle L. (2005), Distribución of steel fibres in rectangular sections, Cement and Concrete Composites

Laranjeira F. (2010), Design-oriented constitutive model for steel fiber reinforced concrete, Tesis Doctoral UPC Barcelona

Maturana A.; Sanchez, R.; Canales J.; Orbe A.; Ansola R.; Veguería E. (2010), Technical-economic analysis of steel fibre reinforced concrete flag slabs. A real building application. XXXVII IAHS WORLD CONGRESS ON HOUSING

Roqueta G.; Jofre L.; Romeu J.; Blanch S. (2010), Broadband Propagative Microwave Imaging of Steel Fiber Reinforced Concrete Wall Structures, IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT

## **8. Agradecimientos**

Los autores quieren mostrar su gratitud a la empresa TECNALIA y al programa de investigación financiado por la Diputación Foral de Bizkaia, a través del proyecto N ° BIRGAITEK 7-12-TK-2009-10 (2009-10 Ekinberri programa).

**Correspondencia** (Para más información contacte con):

Aimar Orbe

Ingeniería de la Construcción – Ingeniería Mecánica

ETSI Bilbao – UPV/EHU

Phone: + 34 94 601 40 18

Fax: + 34 94 601 42 15

E-mail : [aimar.orbe@ehu.es](mailto:aimar.orbe@ehu.es)

URL : [www.wix.com/ingenieria\\_construccion/index](http://www.wix.com/ingenieria_construccion/index)