

DESARROLLO DE UN HUAR CON FIBRAS DE ACERO PARA COMPONENTES DELGADOS DE FACHADA

Oriol PARIS VIVIANA

Arquitecto / Arquitecto técnico

iMat – Centre Tecnològic de la Construcció

UPC – Universidad Politécnica de Catalunya

Investigador y profesor ayudante

oparis@imat.cat

RESUMEN

El objetivo del estudio es el análisis de la viabilidad técnica y económica de la aplicación de un hormigón de ultra alta resistencia armado con fibras de acero para componentes delgados de fachada. Para ello se han desarrollado diversos ensayos de durabilidad y trabajabilidad.

El uso de los hormigones convencionales y los sistemas de armado mediante barras de acero conforman paneles de fachada muy gruesos y pesados. Con este hormigón conseguimos garantizar la misma capacidad mecánica de los paneles convencionales pero con espesores muy inferiores.

Los resultados de los ensayos han garantizado una buena durabilidad y una excelente trabajabilidad del hormigón permitiendo cumplir con el objetivo inicial.

PALABRAS CLAVE: Autocompactante, alta resistencia, fibras, componente plano, fachada, prefabricado, edificación, orientación de fibras.

1. Introducción

El estudio se centra en la aplicación de un hormigón de muy alta resistencia para componentes autoportantes de fachada con el principal objetivo de conseguir una mayor ligereza y esbeltez.

Este componente es un panel de hormigón para fachada capaz de asumir las cargas de viento y transmitir las a los elementos estructurales del edificio [1]. Actualmente los paneles capaces de asumir estos requerimientos con hormigones normales acostumbran a conseguirlo con espesores entre 12 y 20cm armados con redondos de acero y con una repercusión de peso por panel de entre 300 y 500kg/m².

Gracias al diseño de este hormigón de muy alta resistencia armado con fibras de acero podemos desarrollar paneles de 4cm de espesor para cargas de viento equivalentes con un peso aproximado 100kg/m².

2. Requerimientos previos para el diseño del hormigón

Para determinar los requerimientos mecánicos del hormigón, se han establecido dos situaciones de presión dinámica de viento según el Documento Básico de Seguridad Estructural del Código Técnico de la Edificación en una situación habitual de casco urbano para alturas de edificios de entre 5 y 7 plantas (tabla1).

Tabla 1 Hipotesis de cargas de viento para el desarrollo del hormigón

Situación	Carga de viento	Resistencia a flexotracción para un componente de 4cm de espesor
Mínima	0,80kN/m ²	16MPa
Máxima	1,50kN/m ²	30MPa

El componente de fachada de 4cm de espesor debe cubrir la distancia entre forjados ($\approx 3\text{m}$) y no superar en servicio una deformación por flecha superior a $L/200$.

El otro principal requerimiento que debe cumplir este hormigón es una buena trabajabilidad para el proceso de hormigonado en fábrica.

Una vez establecidos los límites y requerimientos del panel se iniciaron los trabajos de desarrollo del hormigón en colaboración con el Dr. Antonio Aguado de Cea del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la UPC.

3. Descripción del material

Se ha diseñado un hormigón autocompactante de muy alta resistencia armado con fibras. La elevada fluidez y la resistencia a la segregación aseguran un alto nivel de homogeneidad y resistencia uniforme. Diferenciamos entre la matriz y las fibras de acero puesto que como veremos más adelante modificando las cuantías de fibras conseguimos una amplia horquilla de resistencias.

3.1. Diseño de la matriz

La elevada resistencia del hormigón necesaria para dichas sollicitaciones ha llevado al desarrollo de un hormigón con alto contenido en cemento y con un tamaño de árido inferior a 0,7mm. La relación agua cemento se sitúa alrededor de 0,25 pero manteniendo una trabajabilidad de un hormigón autocompactante.

3.2. Micro fibras de acero

La resistencia conseguida gracias a la matriz ha sido complementada con las fibras de acero aportándole ductilidad frente la rotura. En este caso se han utilizado micro fibras de acero con alto contenido en carbono de 13mm de longitud y 0,2mm de diámetro (figura1).



Figura 1. Micro fibras de acero

3.3. Dosificación

Como ya hemos comentado, para dar respuesta a una horquilla de valores de cargas de viento se han planteado diversas dosificaciones manteniendo la matriz y modificando la cuantía de fibras de acero, entre 80 y 190 kg/m³ (tabla 2). Para confirmar su elevada trabajabilidad se ha sometido al

ensayo de caracterización de fluidez de un hormigón autocompactante según la UNE 83361 (tabla 3 y figura 2).

Tabla 2 Dosificación del hormigón utilizada en el estudio

Disificación	Kg/m ³
Cemento	800 kg/m ³
Arena	1.100 kg/m ³
Filler	200 kg/m ³
Agua	100 kg/m ³
Superplastificante	30 kg/m ³
Nanosilice	50 kg/m ³
Fibras de acero	80-190 kg/m ³

Tabla 3 Resultados ensayo UNE 83361

T500mm	≤ 8sg	4 sg
df = (d1+d2)/2	Entre 550-850mm	800mm



Figura 2. Extensión de flujo

4. Campaña experimental de caracterización del material

La campaña de ensayos realizados para la caracterización del material se ha orientado al uso del hormigón para componentes de fachada.

4.1. Ensayos de durabilidad

Para determinar la durabilidad de este hormigón se han realizado dos ensayos que habitualmente se utilizan para las piedras naturales (*'Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales'* y *'Determinación de la resistencia al envejecimiento por niebla salina'*). Debido a la falta de ensayos parecidos para un hormigón de estas características y esta aplicación se consideraron estos dos como adecuados para determinar y conocer el grado de durabilidad frente ambientes agresivos. [2]

Para ambos ensayos, se han analizado ocho probetas de 8x14x2,5cm de las cuales cuatro se han sometido previamente a un proceso de carbonatación acelerada durante cinco días con una concentración de CO₂ del 11%, una temperatura de 25°C y una humedad relativa del 45%.

Para el ensayo “*Determinación de la resistencia a la cristalización de las sales*” además se han ensayado cuatro muestras más de un hormigón convencional como material de contraste para someterlos a comparación ya que no disponíamos de valores de referencia.

4.1.1. *Determinación de la resistencia a la cristalización de sales. UNE EN 12370*

El resultado del ensayo de cristalización de sales fue muy satisfactorio. Después de finalizar los quince ciclos se aprecia un comportamiento distinto entre las muestras de hormigón convencional y las del hormigón de muy alta resistencia.

Como vemos en la figura 3 algunas de las muestras de hormigón convencional han sufrido una pérdida de cohesión debido a la rotura de la red porosa del material, en cambio el hormigón armado con fibras mantiene intacta su cohesión gracias a la mayor compacidad del material y a la estructura de red generada por las propias fibras de acero que une la matriz.

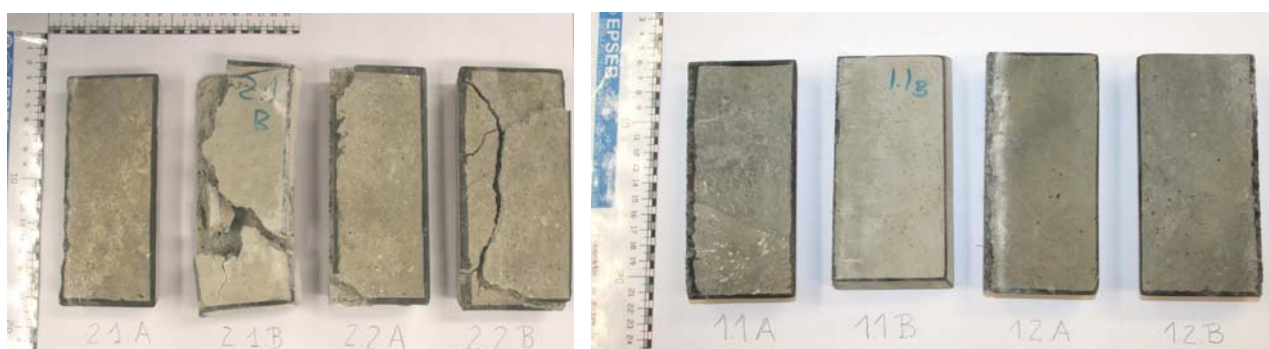


Figura 3. Muestras después del ensayo. Izquierda muestras de contraste, derecha hormigón con fibras.

4.1.2. *Determinación de la resistencia al envejecimiento por niebla salina. UNE EN 14147*

En el ensayo de niebla salina, a pesar del aspecto que tomaron las muestras debido a la oxidación de las fibras superficiales después de los 60 ciclos (figura 4), los resultados fueron muy satisfactorios. Gracias a la elevada compacidad del hormigón no se observa ninguna lesión física (fisuras, pérdidas de cohesión, etc) en ninguna de las muestras carbonatadas y no carbonatadas.

Como se observa en las figuras 2 y 3 en las muestras cortadas, el proceso de niebla salina no ha tenido ningún efecto más allá de la superficie. La compacidad del hormigón no ha permitido la oxidación de las fibras interiores evitando así el aumento de volumen de las fibras por oxidación.



Figura 4. Presencia del óxido de las fibras superficiales. Muestra cortada.

4.2. Ensayos de caracterización reológica

El uso de este hormigón para componentes de fachada obligaba a tener conocimiento del coeficiente de retracción, ya que queremos trabajar con paneles muy esbeltos, de entre 40 y 10mm donde la fisuración por retracción puede tener repercusiones importantes [3].

Se desarrolló dos tipos de ensayos, uno para determinar la retracción lineal libre del hormigón y un segundo muy orientado al tipo de panel de fachada que estamos desarrollando, donde el hormigón debe quedar ligado con los marcos perimetrales del molde impidiendo su libre retracción.

Ambos ensayos se han realizado con un molde en forma de 'U' diseñado por el propio laboratorio y que sigue los criterios de la norma. Los extremos de la 'U' disponen de una tapa fija y una tapa móvil con un anclaje para el hormigón. El desplazamiento por el extremo móvil se controla con un comparador digital de una sensibilidad de 0,001mm (figura 5).



Figura 5. Molde en forma de 'U', con comparador digital en el extremo móvil.

4.2.1. Determinación de la retracción lineal. UNE EN 12617-3

El resultado de este ensayo confirma la elevada retracción del hormigón en edades tempranas debido a la importante cantidad de cemento, pero sin aparecer ninguna fisura por retracción durante el proceso de curado.

El coeficiente de retracción después de 28 días fue de 0,7mm/m (figura 6). Es un valor elevado y debe tenerse en cuenta durante el proceso de conformación de los paneles de fachada. La retracción de un elemento de 5 metros podría llegar a ser de 3,5mm.

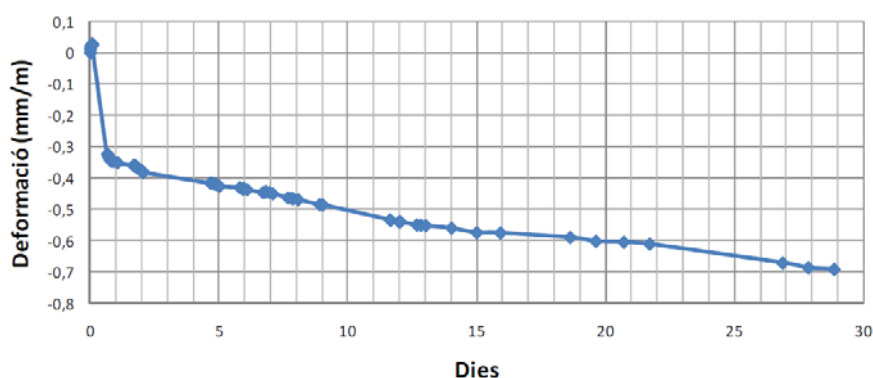


Figura 6. Evolución de la temperatura y humedad durante 29 días de curado.

Cabe destacar que el 50% de la retracción (0,35mm) se produce durante el primer día y el resto de forma progresiva durante los siguientes 27 días. Esto pone de manifiesto la importancia del control del proceso curado durante las primeras 24 horas (figura 7).

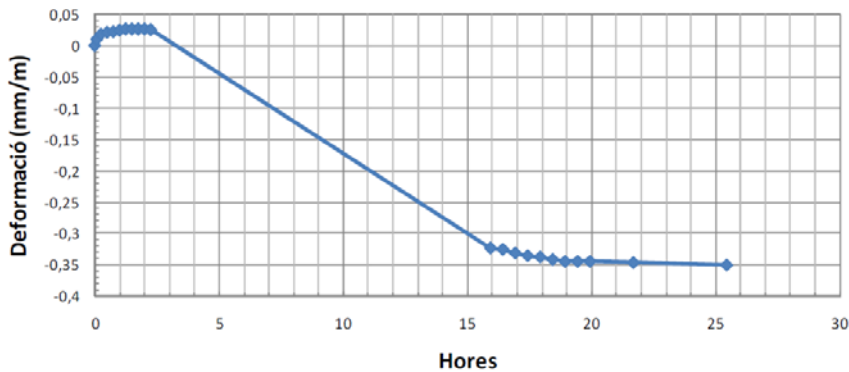


Figura 7. Evolución de la temperatura y humedad durante las primeras 24 horas de curado.

4.2.2. *Determinación de la retracción lineal impedida. Modificación de la UNE EN 12617-3*

El objetivo es determinar el efecto que puede tener impedir la retracción del hormigón. Para este ensayo se ha realizado una modificación del molde en forma de 'U' fijando las tabicas que limitan los extremos a la base y colocando anclajes de fijación para el hormigón fresco. De esta forma impedimos la retracción libre a medida que este va endureciendo.

El resultado es satisfactorio. Tan solo aparecen fisuras superficiales de retracción de 1mm de profundidad en la cara superior de la muestra. El principal motivo es la estratificación tanto del árido como de las fibras debido a su mayor densidad. Como veremos más adelante un proceso de amasado inadecuado, ayuda a que se produzca este efecto (figura 8).

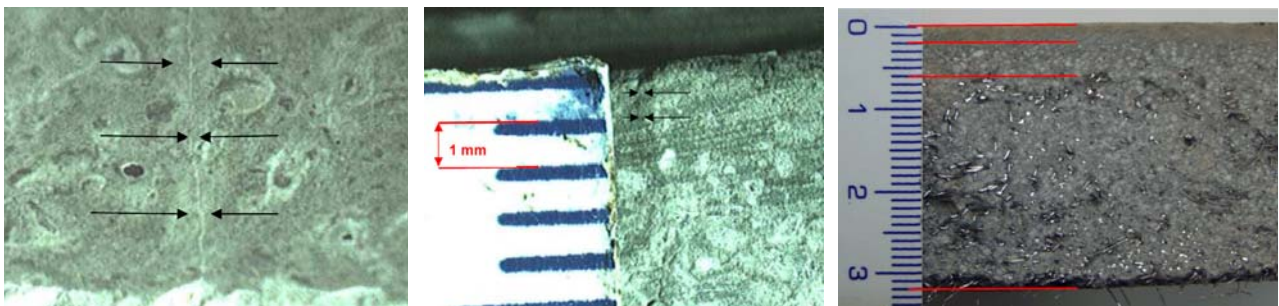


Figura 8. Micro-fisuración superficial por retracción del hormigón y por falta de fibras.

4.3. Ensayos de trabajabilidad

Los siguientes ensayos de trabajabilidad, desarrollados en CECAM (Centro de estudios de la construcción y análisis de materiales) no responden a ninguna normativa específica del hormigón y han sido diseñados para el uso y aplicación de este hormigón autocompactante para componentes de fachada.

4.3.1. *Ensayo para determinar los límites geométricos para la entrada del hormigón en moldes verticales mediante la técnica del vertido*

El molde está formado por dos planos paralelos coronados por un elemento en forma de tolva que canaliza la pasta de hormigón hacia el interior del molde. Se han probado tres secciones de entrada, 7, 10 y 12mm (figura 9).

El objetivo de este ensayo es determinar la sección mínima por la que el hormigón puede avanzar por el efecto de la gravedad.

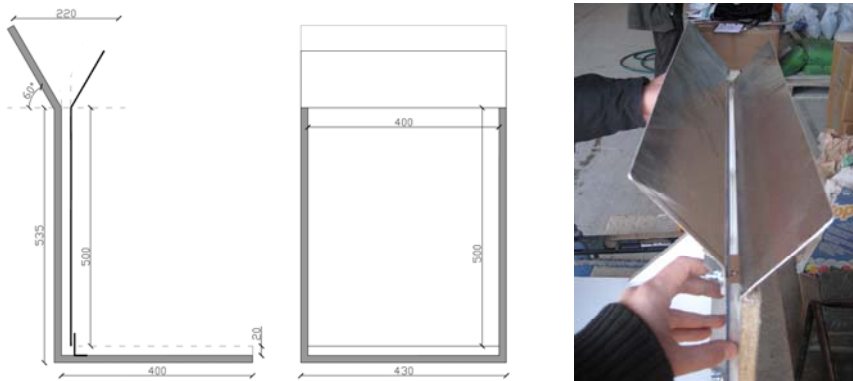


Figura 9. Molde vertical para ensayo de vertido de hormigón. Entrada para el hormigón.

Para las entradas de 7 y 10mm, debido a la consistencia fluida del hormigón, durante el proceso de vertido la entrada al molde queda obturada impidiendo la salida de aire del molde y dificultando la entrada del hormigón. En cambio para la sección de 12mm gracias a la rapidez de entrada del propio hormigón no llega a colapsar la tolva.

Para la sección de 7mm, tanto la longitud de la fibra como los nidos de fibra que se generan, dificultan la entrada del hormigón por gravedad.

La sección de 10mm permite interrumpidamente la entrada del hormigón en el molde. Hay que intervenir puntualmente para deshacer los nidos de fibra que se producen en la boca del molde.

Para la sección de 12mm la entrada del hormigón es correcta. El hormigón llena el molde vertical sólo con el vertido en la tolva (figura 10).

Los resultados del ensayo permiten extraer dos conclusiones importantes:

- 1-. Debe de preverse una salida de aire del molde.
- 2-. La longitud de la fibra marca la dimensión mínima de la entrada del molde.



Figura 10. Imágenes del proceso de vertido para la entrada de 12mm

4.3.2. *Ensayo para determinar la capacidad de penetración del hormigón en secciones complejas de borde de molde*

Este ensayo tiene como objetivo comprobar la capacidad del hormigón por introducirse en geometrías complejas de pequeña escala mediante la técnica del vertido. Se ha desarrollado un molde plano con diferentes secciones de perfiles que funcionaban a modo de molde perdido perimetral (figura 11).

Una vez vertida la pasta sobre el molde, gracias a su consistencia fluida y a al pequeño tamaño del árido, el hormigón llena los recovecos milimétricos de los perfiles laterales con la propia extensión del flujo durante el vertido. Gracias al éxito del ensayo, ahora podemos garantizar, la correcta unión entre los moldes perimetrales y el hormigón.

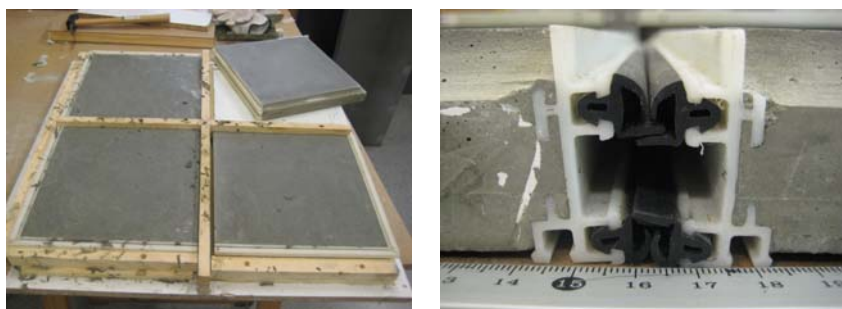


Figura 11. Molde con los perfiles perimetrales. Detalle de la pieza hormigonada

5. Conclusiones y perspectivas

5.1. Conclusiones del estudio

5.1.1. Durabilidad

Los resultados de los ensayos de durabilidad frente a la cristalización de sales y la niebla salina nos garantizan el buen comportamiento de este hormigón para elementos de fachada. La elevada cohesión que genera la matriz y las fibras permite garantizar la durabilidad necesaria para elementos de edificación expuestos a ambientes agresivos.

5.1.2. Trabajabilidad

La elevada trabajabilidad del hormigón y su consistencia fluida lo hacen muy adecuado para hormigonar componentes de fachada con geometrías complejas, llegando hasta el último rincón del molde y garantizando un muy buen acabado.

Sustituir el armado convencional (barras de acero) de los paneles por las fibras de aplicación en masa potencia su uso para conformar elementos de geometrías complejas.

5.1.3. La influencia del amasado y el vertido en la sedimentación de las fibras

El proceso de amasado es de vital importancia. Realizar un correcto amasado garantiza una buena homogeneidad entre la matriz y las fibras minimizando el efecto de la sedimentación al fondo de molde. En este sentido estamos iniciando análisis mediante sistemas de radiografía (figura12) para determinar el grado de sedimentación de las fibras en función del tipo de amasado y las diferentes maneras de verter el hormigón sobre el molde. [4,5]

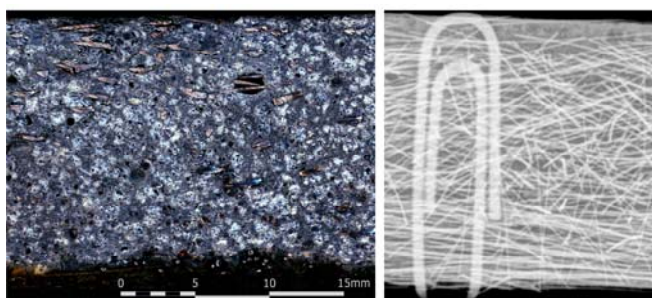


Figura 12. Estructura interna del hormigón. Imagen radiografiada.

Tanto la sedimentación de las fibras como su orientación paralela al fondo de molde abre un camino hacia la optimización del comportamiento mecánico de los elementos delgados. En nuestro caso, para elementos de fachada de entre 10 y 15mm de espesor la fibra se coloca paralela al fondo del molde mejorando el comportamiento de la pieza a esfuerzos de flexotracción.

5.1.4. Coste vs Resistencia

Como ya hemos introducido al inicio de la presentación, se han desarrollado diferentes dosificaciones del hormigón en base a una misma matriz modificando las cuantías de fibra acero. Esto nos permite llegar a relacionar la capacidad mecánica del hormigón, las solicitaciones requeridas por el elemento constructivo, y el coste (tabla 4).

Debe considerarse que aun siendo un hormigón más caro por metro cubico que otro de convencional, gracias a su elevada resistencia, permite obtener paneles de fachada entre tres y cuatro veces más delgados que los habituales optimizando el uso del hormigón. Si consideramos el coste de un panel convencional de fachada de 16cm con doble armado (20€/m²) y lo comparamos con los costes de un panel de 4cm con este hormigón para resistencias equivalentes (19€/m²) observamos cómo este puede ser muy competitivo. Además deben considerarse los beneficios de la eliminación del armado convencional y las operaciones de vibrado.

Tabla 4 Analisis comparativo entre cuantía de fibra, coste del hormigón y resistencias.

Dosificación	Cuantía Fibra	Coste panel de 4cm	Resistencia Compresión UNE 80-101-88	Resistencia Flexotracción UNE-EN 14651	Resistencia Tracción UNE 83515
1	190 Kg/m ³	29 €/m ²	143 MPa	46 MPa	9 MPa
2	170 Kg/m ³	27 €/m ²	141 MPa	38 MPa	8 MPa
3	160 Kg/m ³	26 €/m ²	140 MPa	31 MPa	8 MPa
4	130 Kg/m ³	24 €/m ²	120 MPa	28 MPa	7 MPa
5	80 Kg/m ³	19 €/m ²	110 MPa	20 MPa	7 MPa

5.2. Aplicación para componentes planos de fachada de 10, 20 y 40mm de espesor

Actualmente estamos utilizando este hormigón para el desarrollo de componentes planos de fachada según dos funciones:

- 1-.Paneles autoportantes de fachada de 40mm de espesor
- 2-.Paneles exteriores para sistemas de fachada ventilada de entre 10, 15 y 20mm de espesor

En el primer caso los paneles autoportantes representan la hoja principal del sistema de fachada y deben asumir las cargas de viento. El panel es también el soporte del resto de elementos del sistema de fachada ya sea convencional, 'ETICS' o ventilada. Gracias al hormigón podemos garantizar un correcto comportamiento con 40mm de espesor a cargas de viento de hasta $1,50\text{kN/m}^2$ y luces de 3,00m (figura 13).



Figura 13. Componentes completos de fachada con paneles de HUAR de 4cm de espesor.

En el segundo caso el hormigón nos permite desarrollar paneles exteriores para el sistema de fachada ventilada con geometrías macizas o caladas de espesores variables en función de la distancia entre soportes (figura 14).

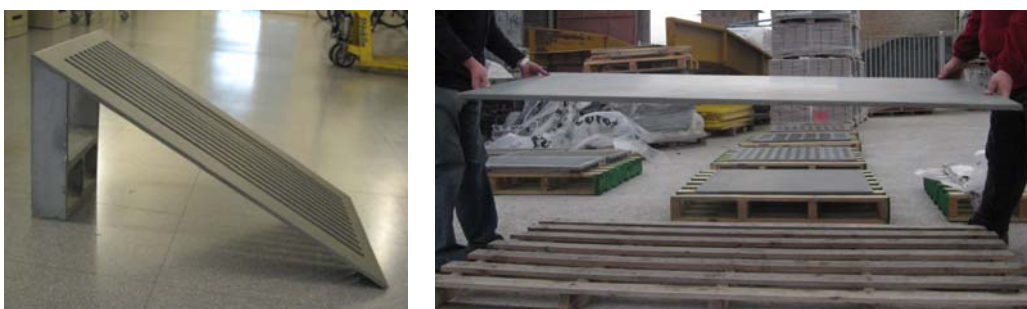


Figura 14. Paneles para la hoja exterior de la fachada ventilada de 10 y 20mm de espesor.

6. Referencias

- [1] HANDEGORD G.O. "The Performance of Exterior Walls". Building Science Forum. 1982. National Reserch Council Canada – Institute for Reserch in Construction.
- [2] BERMÚDEZ M.A., ALAEJOS P. "Métodos de control de la durabilidad del hormigón armado en ambiente marino". *IV Congreso ACHE 2008*.
- [3] SANTOS A., AGUADO A., AGULLÓ L., MASÓ D., "Retracción y fluencia en hormigones autocompactantes". *IV Congreso ACHE 2008*.
- [4] TORRIJOS M.C., ZERBINO R., "Estudio de la orientación y distribución de fibras de acero en hormigón autocompactante". *HAC. 1er Congreso Español sobre Hormigón autocompactante, 2008, pp.555-565*.
- [5] MORA F., MOLINS C., AGUADO A., "Estudio sobre distribución y orientación de fibras en dovelas". *IV Congreso ACHE 2008*.