

ASPECTOS APRENDIDOS SOBRE DISEÑO ESTRUCTURAL Y DETALLES CONSTRUCTIVOS DURANTE LA EJECUCIÓN DE UNA PASARELA PEATONAL DE HORMIGÓN DE MUY ALTO RENDIMIENTO. APRENDER DE LA EXPERIENCIA.

Por:
HUGO COLL CARRILLO

Septiembre 2013.

Autor / Author: Hugo Coll Carrillo		Fecha / Date: Septiembre 2013	
Título / Title Aspectos aprendidos sobre diseño estructural y detalles constructivos durante la ejecución de una pasarela peatonal de hormigón de muy alto rendimiento. Aprender de la experiencia.			
Directores del trabajo / Supervisores: Pedro Serna Ros		Código / Code: CST/MIH	Nº páginas / Pages: 96
Departamento / Department: INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN Y PROYECTOS DE INGENIERÍA CIVIL			
Universidad / University: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA		 UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA	
Palabras clave / Keywords: Hormigón, Alto rendimiento, Autocompactante, Fibras, HMAR, pasarela; Prefabricación; Concrete, High performance, Self-compacting; Fiber; UHPFRC, pedestrian bridge, Prefabrication.			
Código Unesco: 3305/05 Ciencias tecnológicas / Tecnología de la construcción / Tecnología del Hormigón			

INDICE

INDICE.....	1
INDICE DE FIGURAS.....	3
INDICE DE TABLAS.....	5
RESUMEN	7
ABSTRACT	9
1. INTRODUCCIÓN	11
2. OBJETIVOS	13
3. EL HORMIGÓN DE MUY ALTAS PRESTACIONES	14
a. Experiencia internacional	15
b. Aspectos destacables para el uso del HMAR	17
c. Instrucciones y Recomendaciones del HMAR (UHPFRC)	19
4. PROYECTO DE PASARELA PEATONAL CON HMAR	21
a. Descripción de la solución previa	22
b. Condicionantes para la modificación de la pasarela	22
c. Propuesta de pasarela alternativa en HMAR	23
d. Descripción de la pasarela en HMAR proyectada	25
5. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE DISEÑO, EJECUCIÓN Y MONTAJE	27
a. Aspectos previos	27
I. CONDICIONANTES ADMINISTRATIVOS	28
II. CONDICIONANTES TÉCNICOS	29
III. CONDICIONANTES ECONÓMICOS	30
b. Fase de diseño	35
I. ACCIONES Y CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL PARA PROYECTO	37
II. CRITERIOS DE CÁLCULO	41
III. MODELO REDUCIDO	44
c. Dosificación y fabricación del HMAR	46
I. EFECTOS SECUNDARIOS DE ADITIVOS Y ADICIONES	47

II.	MODIFICACIONES EN LA PROPORCIÓN DE ARENA GRUESA–ARENA FINA...	49
III.	IMPORTANCIA DEL AGUA	50
IV.	ORDEN Y CONDICIONES DE VERTIDO DE LOS MATERIALES.....	51
d.	Procedimiento constructivo	53
I.	FASE 1.- EJECUCIÓN DE CELOSÍAS LATERALES	54
II.	FASE 2.- EJECUCIÓN DEL CORDON SUPERIOR RESTANTE	55
III.	TRANSPORTE DE LATERALES Y COLOCACIÓN EN MOLDE DE ARTESA	56
IV.	FASE 3.- HORMIGONADO DEL FONDO ALIGERADO.....	57
V.	FASE 4.- HORMIGONADO DE LAS RIOSTRAS.....	58
VI.	EJECUCIÓN Y MONTAJE DE LAS LOSAS DE PAVIMENTO	59
e.	Puesta en obra y control de calidad.....	60
I.	CONDICIONANTES PARA EL HORMIGONADO.....	61
II.	PLANIFICACIÓN Y RESULTADOS DEL CONTROL DE CALIDAD	63
f.	Detalles finales y acabados.....	67
I.	TEXTURA EN SUPERFICIE	67
II.	PRESENCIA DE FIBRAS EN SUPERFICIE	70
III.	PIEZA ACABADA	73
g.	Transporte y Montaje	74
6.	CONCLUSIONES	77
7.	BIBLIOGRAFIA	79

ANEJO 1.- PLANOS DE DEFINICIÓN DE LA PASARELA (PROYECTO MODIFICADO)

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Pasarela en Sherbrooke, Canada. 1997	15
Figura 2. Peaje Viaducto de Millau, Francia 2004	16
Figura 3. Puente en Bourg-Les-Valence, Francia 2001	16
Figura 4. Familias de hormigones relacionadas con el HMAR	17
Figura 5. Infografía del diseño final presentado.....	24
Figura 6. Alzados y base de la pasarela.....	25
Figura 7. Secciones tipo de la pasarela.....	26
Figuras 8 y 9. Ejemplos de secciones equivalentes entre HP y HMAR	32
Figuras 10 y 11. Esquemas de diseño iniciales	36
Figura 12. Representación de la estructura propuesta en el Proyecto modificado	37
Figura 13. Curva constitutiva a compresión el UHPC con diferentes % de fibras	38
Figura 14. Comportamiento a tracción directa del UHPFRC [Spasojevic 2006].....	38
Figura 15. Tipos de fibras empleados en el HMAR. [Markovic 2006]	39
Figura 16. Curva tensión equivalente-flecha ensayo a flexión [Spasojevic 2006].....	39
Figura 17. Curva constitutiva característica del HMAR.....	40
Figura 18. Modelo de elementos finitos de la pasarela.....	42
Figura 19. Efecto de las fibras en juntas de hormigonado.....	43
Figura 20. Modelo reducido de celosía de HMAR en laboratorio.....	46
Figura 21. Secciones y rotura del modelo reducido de celosía de HMAR	46
Figura 22. Adición de fibra fina en bloque y “erizos” aparecidos en la puesta en obra.....	52
Figuras 23 y 24. Vistas del tramo de muestra a escala 1:1	53
Figura 25. Esquema de fases para la prefabricación.....	53
Figura 26. Fase 1: hormigonado laterales	54
Figura 27. Idealización de molde y pieza hormigonada Fase 1	54
Figura 28. Molde hormigonado correspondiente a medio lateral	55
Figura 29. Fase 2: hormigonado cabeza de compresión	55
Figura 30. Idealización de Fase 2 en bancada y pieza resultante	55
Figura 31. Hormigonado con embudo y speedy de la cabeza de compresión.....	56
Figura 32. Elevación laterales y colocación en molde artesana	56
Figura 33. Idealización de bancada basculante y pieza en molde artesana	56
Figura 34. Elevación de medio lateral desde bancada basculante	57
Figura 35. Fase 3: hormigonado de base (fondo).....	57
Figura 36. Idealización de molde celosía de fondo en artesana y pieza resultante	57
Figura 37. Preparación de armados en fondo (cercos de rasante).....	58
Figura 38. Fase 4: hormigonado de riostras apoyo de tablero.....	58
Figura 39. Aspecto de las riostras y cajado del cordón superior hormigonados	58
Figura 40. Preparación de moldes para hormigonado de losas.....	59
Figura 41. Hormigonado de losa en zig-zag con speedy	59
Figura 42. Losas colocadas	60
Figura 43. Hormigonado de laterales con HMAR verde	61
Figura 44. Hormigonado con embudo: Picado con barra y fibra en armadura.....	62

Figura 45. Ensayo a flexión-tracción. 22-11-2012 lateral 1	65
Figura 46. Ensayo a flexión-tracción. 27-11-2012 lateral 2.....	65
Figura 47. Ensayo a flexión-tracción. 30-11-2012 lateral 3.....	66
Figura 48. Ensayo a flexión-tracción. 05-12-2012 lateral 4.....	66
Figura 49. Ensayo a flexión-tracción. 19-12-2012 fondo 1	66
Figura 50. Ensayo a flexión-tracción. 21-12-2012 fondo 2	67
Figura 51. Pruebas de texturas para pavimento.....	68
Figura 52. Prueba de textura final antideslizante.....	68
Figura 53. Acabado en caras de llenado	69
Figura 54. Acabado en caras de llenado	70
Figura 55. Acabado repasado con mortero	70
Figura 56. Operario pasando soplete para eliminación de fibras en esquinas.....	72
Figura 57. Pasarela iluminada mediante leds encastrados en el cordón superior	73
Figura 58. Prueba de herrajes y vidrio. Cajeadado para iluminación en cordón	74
Figura 59. Pieza elevada en fase de montaje.....	75
Figura 60. Pasarela completa sobre transporte.....	75
Figura 61. Vista diurna de la Pasarela acabada	76
Figura 62. Vista nocturna de la Pasarela acabada	76

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dosificaciones estudiadas por el ICITECH (UPV)	31
Tabla 2. Comparativa de costes entre soluciones prefabricadas de hormigón convencional y estructuras equivalente prefabricadas con HMAR	32
Tabla 3. Resumen comparativa costes Hormigón pretensado – HMAR - Acero	33
Tabla 4. Parámetros elásticos del HMAR	40
Tabla 5. Parámetros mecánicos del HMAR	40
Tabla 6. Resumen de dosificaciones empleadas.....	47
Tabla 7. Control de calidad de la pasarela. Resultados de resistencia a compresión .	64
Tabla 8. Resultados de compresión HMAR laboratorio (cálculos) y Prevalesa (ejecución)	65

RESUMEN

La evolución en la tecnología del hormigón de las últimas décadas tiene una de sus mayores exponentes Hormigón de Muy Alto Rendimiento, HMAR (UHPC o UHPRFC en la bibliografía internacional). Este material combina en una sólo tres de las mejoras obtenidas por diferentes líneas de investigación: Hormigón autocompactante, Hormigón con Fibras y Hormigón de Muy Alta Resistencia.

Existen numerosos trabajos de investigación respecto al material, que a nivel internacional han fomentado su uso como material de construcción en la ejecución de diversos tipos de estructuras con resultados satisfactorios y añadiendo un valor añadido en cuanto a la optimización de materiales empleados y a la durabilidad del proyecto.

En España, pese a que grupos de investigación como el formado en el ICITECH de la UPV han conseguido situarse a primer nivel mundial en cuanto a conocimientos resultados y publicaciones, no se había realizado hasta la fecha ninguna construcción con empleando HMAR. En base a todo este trabajo, surge la oportunidad en septiembre de 2011 de proyectar y ejecutar una pasarela peatonal dentro de las obras de encauzamiento del Barranco de las Ovejas (Alicante).

La experiencia adquirida durante el trabajo realizado desde las fases de planteamiento de la idea y diseño, hasta la puesta en obra de la primera pasarela en España ejecutada con HMAR, ha aportado una valiosa información en las diferentes facetas, que permite abordar nuevos proyectos con garantía de éxito y definir nuevas líneas de trabajo en pro de acercar este nuevo material a la realidad de la construcción en España.

ABSTRACT

Developments in concrete technology achieved in recent decades have one of its greatest exponents with the Ultra High Performance Concrete (UHPC or UHPFRC in the international literature). This material combines three of the improvements obtained by different lines of research: Self-compacting Concrete, Reinforced Fiber Concrete and Very High Strength Concrete.

There are many research papers about the material, which have promoted its use as construction material in the execution of various structural solutions with satisfactory results and adding value in terms of materials optimization and durability of the project.

In Spain, although research groups as formed in the UPV ICITECH have managed to place a world-class knowledge about results and publications, there had been to date no construction using UHPFRC. Based on the work of this group, there is the opportunity in September 2011 to design and implement a pedestrian bridge in the channeling works of Barranco de Las Ovejas (Alicante).

The experience gained during the work done since the phases of launching idea and design to the laying of the first pedestrian bridge in Spain executed with UHPFRC, has provided valuable information on the different project phases that will address new projects secured of success and define new work lines with the aim of bringing this new material to the Spanish construction.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la tecnología del hormigón ha evolucionado hasta materiales cuyas propiedades distan enormemente del hormigón tradicional, consiguiéndose productos que ofrecen una mejora global en cuanto a prestaciones relacionadas no sólo con resistencia, sino con ductilidad, durabilidad, estética...

De este modo, la mejora en tanto en materiales básicos como en aditivos y adiciones, a la que se añade la dilatada experiencia en la utilización de fibras en el hormigón, ha permitido la obtención del denominado Hormigón de Muy Alto Rendimiento (en adelante HMAR), permitiendo resolver en un sólo material gran parte de la problemática relacionada con las estructuras y su puesta en obra (autocompactante, muy alta resistencia, ductilidad, control de la fisuración,...)

En continuidad con los trabajos del grupo de investigación del ICITECH dedicado al HMAR, se plantea dentro de un Proyecto Modificado de una obra actualmente en ejecución, la posibilidad de proyectar y ejecutar la primera pasarela en España con este nuevo material. El proceso de diseño, caracterización de materiales y puesta en obra de la misma, ha permitido confirmar la viabilidad del nuevo material y aportar conocimientos y resultados derivados del proceso constructivo de enorme interés, los cuales permitirán abordar futuros proyectos con garantías.

La oportunidad de participar tanto en el proceso de diseño como en el de fabricación y puesta en obra ha sido el motivo del presente Trabajo Final de Master, en el que se pretenden plasmar los conocimientos adquiridos durante la experiencia, como resultado final desde un punto de vista eminentemente práctico de la labor de investigación.

Es necesario aclarar que el proceso aquí resumido ha sido fruto de una ingente cantidad de trabajo por parte de todo un grupo de profesionales entre los que se encuentra el autor del presente trabajo, sin los cuales no hubiese sido posible culminar con éxito el proyecto.

Agradecer su colaboración en primer lugar, e incluir por tanto en el presente documento a Pedro Serna, Juan Angel López, Esteban Camacho y Juan Navarro por parte de la Universidad Politécnica de Valencia como verdaderos artífices del proyecto de la pasarela. Con ellos he compartido la fase de diseño y ejecución, recayendo en cada uno de ellos facetas clave del proceso cuya resolución permite dar contenido al presente trabajo.

A Fernando Galan y todo su equipo, que como Director Técnico de la empresa prefabricadora Prevalesa prestó su experiencia al proyecto, y que me ha permitido aprender y conocer junto a él aspectos clave durante las fases de diseño y principalmente en ejecución, sin las cuales no se hubiese sido posible alcanzar la excelencia del producto final puesto en obra, al tiempo que han sentado las bases para abordar los proyectos con HMAR actualmente en fase de diseño, con mayor grado de seguridad y certeza en cuanto a condiciones de ejecución y valoración del producto.

Incluir también a Pedro Ballesteros, como Director de la Obra que incluye la pasarela ejecutada, sin cuyo apoyo no hubiese sido posible llevar a cabo todo esto, y cuya colaboración en las facetas administrativas y de definición de la solución final han sido de vital importancia para alcanzar el resultado final.

Resaltar también el papel tanto de la U.T.E. encargada de la ejecución de las obras en las que se incluía la pasarela, formada por las empresas VIAS Y CONSTRUCCIONES SA y TARANCON Infraestructuras SA, que, como de los promotores de dicha obra, Ayuntamiento de Alicante y la Dirección General del Agua de la Consellería de Agricultura, Pesca, Alimentación y Agua.

Por parte de los promotores, solo el hecho de admitir la idea y permitir que se introduzcan resultados de la investigación en una de sus obras, merecería ya todo tipo de agradecimientos, puesto que permitiendo que esta transferencia se convirtiese en una realidad han conseguido que se pueda dar un salto cualitativo primando la I+D+i mediante esta incorporación de resultados en un caso real.

Del mismo modo la U.T.E. constructora realizó una importante apuesta, asumiendo poner en obra la primera pasarela en España con HMAR, con la responsabilidad que de esto se deriva.

En ambos casos, todo el personal técnico y administrativo mostró su apoyo al proyecto y, si bien en algunos casos el inicio fue titubeante, la totalidad quedó contagiada de la importancia del proyecto y se interesó e involucró en todas las fases del mismo.

Destacar finalmente, que el propio hecho de haber materializado la primera pasarela en España con un material fruto de un proceso de investigación, cuya definición y caracterización dista de estar normalizada en nuestro país, no así en otros países fuera y dentro de Europa, supone en sí mismo un hito que demuestra que la labor de I+D+i tiene frutos que recoger, y que con voluntad y trabajo es posible acercarnos a una construcción más eficiente, recortando la distancia entre los avances técnicos y tecnológicos y la realidad de las construcciones.

Es previsible que para los años venideros se produzca una regeneración en la filosofía del mercado de la construcción, sustituyendo la dinámica de excesos y relajación de la calidad, propia de los años de bonanza sobredimensionada, por una construcción de calidad en favor de la eficiencia y el control, basada en la introducción de nuevos materiales, diseños y procedimientos constructivos. Es ahí donde, desde la humilde opinión del autor, este trabajo pretende aportar su granito de arena, facilitando en la medida de lo posible, en base a los propios errores y el proceso de aprendizaje posterior, la incorporación del HMAR como material de construcción de uso común.

2. OBJETIVOS

Este Trabajo Final de Master pretende describir los resultados más destacables del trabajo realizado desde que se planteó la idea de emplear el HMAR en una estructura de una obra en ejecución, hasta que la primera pasarela realizada en España con este material se ha puesto en obra satisfactoriamente.

El proceso de estudio, toma de decisiones, aciertos y errores y puesta en obra final de una idea, ha permitido chequear la veracidad de algunos resultados teóricos, contrastar resultados de la investigación previa, definir unos criterios de diseño y cálculo acordes con las singulares características del material y comprobar las virtudes y defectos del HMAR en un proceso constructivo más exigente en plazos y costes que el correspondiente a un proyecto de investigación tradicional.

Esta parte final del trabajo es la que ha permitido definir una serie de premisas relacionadas con la dosificación del material, fabricación, puesta en obra y detalles constructivos, que no habría sido posible obtener en el laboratorio, y que suponen un gran avance en cuanto a la posibilidad de desarrollo del HMAR como material de construcción.

De este modo, los objetivos perseguidos en el trabajo que se presenta se podrían resumir del modo siguiente:

- ✓ Describir el estado actual del Hormigón de Muy Alto Rendimiento en cuanto a caracterización, experiencias realizadas, normativa,...
- ✓ Demostrar la viabilidad del HMAR como material de construcción y su idoneidad para el proyecto de la pasarela finalmente ejecutada
- ✓ Describir los elementos clave para el éxito del proyecto detectados a lo largo del proceso de diseño, cálculo y ejecución de esta pasarela peatonal
- ✓ Plantear las mejoras llevadas a cabo en dicho proceso, así como los aspectos en que avanzar en proyectos futuros.
- ✓ Realizar un análisis comparativo de las soluciones con otros materiales.
- ✓ Proponer unas recomendaciones para el uso del HMAR, fruto de la experiencia adquirida en el proceso, así como líneas de trabajo futuras.

El documento se estructura siguiendo la línea temporal del proyecto, tratando estos últimos objetivos de manera conjunta en cada una de las fases del proceso en las que se presentaban, entendiendo que resulta la mejor manera de transmitir la totalidad de la información, dado que parte de ellos se encuentran íntimamente relacionados.

Puesto que las facetas relacionadas con la definición del material se encuentran de sobra descritas en la diferente documentación existente, incluida en la bibliografía, el grueso del trabajo versará en presentar los resultados de la experiencia, residiendo en éstos el verdadero contenido del documento, dando por hecho en algunos apartados ciertos conocimientos del HMAR.

Para destacar los resultados más relevantes, se intercalaran con la descripción del proceso fichas descriptivas incluyendo: *PROBLEMÁTICA*, *RESOLUCIÓN*, *COMENTARIOS*.

3. EL HORMIGÓN DE MUY ALTAS PRESTACIONES

El hormigón se ha constituido desde hace décadas como el principal material de construcción y, consecuencia de lo cual, se han desarrollado numerosas líneas de investigación referidas tanto a la dosificación y fabricación, como a los materiales básicos, aditivos y adiciones.

Desde la década de los 60, gran parte de los trabajos se han encaminado a aumentar considerablemente la resistencia a compresión del hormigón, naciendo en la década de los 80 la idea que ha permitido el mayor desarrollo de resistencias, en base al uso de materiales ultrafinos, que permitiesen la generación de una matriz cementicia resistente muy densa y homogénea, permitiendo de este modo limitar al máximo la microfisuración que acelera en todos los casos la rotura.

El descubrimiento de adiciones minerales reactivas, que permitían sustituir que estos materiales de grano fino inertes por puzolanas, manteniendo las condiciones idóneas frente a la fisuración con un aumento de los compuestos resistentes, permitió un crecimiento exponencial de las resistencias, sin necesidad de condiciones específicas de laboratorio (altas presiones y curados al vapor).

En paralelo a estos progresos, la industria química relacionada con la fabricación del hormigón ha evolucionado en cuanto a la fabricación de aditivos capaces de modificar en gran medida las condiciones de trabajabilidad del hormigón fresco, estando en la actualidad completamente desarrollado el uso de hormigones autocompactantes, así como sus condicionantes de fabricación y uso.

Finalmente encontramos una línea de trabajo relacionada con la adición de fibras de diversos materiales en la matriz del hormigón, con la finalidad de mejorar su comportamiento frente a tracciones, ya sean de origen reológico (retracción) o estructural, encontrándose en la actualidad normalizado, y en ciertos usos generalizado, el uso del denominado "hormigón reforzado con fibras".

El Hormigón de Muy Alto Rendimiento (HMAR) más conocido en la bibliografía internacional como UHPC o UHPFRC, dependiendo del uso o no de fibras en su dosificación, combina estas tres tecnologías punteras del hormigón: alta resistencia, empleo de fibras de acero y autocompactabilidad. La AFGC (Asociación Francesa de Ingenieros Civiles) define el material como aquél con resistencia a compresión superior a 150 MPa, elevada resistencia a flexo-tracción y un comportamiento muy dúctil.

Se trata por tanto de un material de construcción relativamente joven muy poco conocido en España. Sin embargo, sus primeras aplicaciones en la ingeniería civil en el mundo se remontan a 1997 con la construcción de la primera pasarela realizada empleando este material en Sherbrooke (Canadá). A partir de ese momento surge un cada vez mayor número de investigaciones acerca de este material en todo el mundo así como crecientes aplicaciones de este material en todos los ámbitos, ingeniería civil, edificación, diseño industrial y arquitectónico.

a. Experiencia internacional

Es posible encontrar documentación respecto a las primeras investigaciones con miras a la aplicación del HMAR en construcción desde aproximadamente 1985, resultando en diversas soluciones técnicas para resolver problemas puntuales como rehabilitación de elementos prefabricados de puentes o de soleras industriales de gran capacidad, elementos para cimentaciones offshore, pilares para edificios de gran altura,... desarrollándose multitud de dosificaciones adaptadas a cada uso.

No obstante, cabe destacar que en todos estos años la manera más generalizada de elaborar estructuras de HMAR ha sido mediante elementos prefabricados construidos con alguna de las patentes existentes en el mercado (Ductal®, BSI®, BCV® o CEMTEC®), calculando los elementos según las recomendaciones Francesas o Japonesas. Algunas empresas de prefabricados elaboran ya elementos con estos productos (Hurks Beton, Hi-Con), existiendo una minoría que ya elabora su propio HMAR (ELO Beton, desde 2004).

Desde 1997, coincidiendo con la ejecución de una pasarela peatonal híbrida (acero+HMAR) en Sherbrooke, Canada (Figura 1), la elaboración de estructuras con HMAR ha ido en aumento, en paralelo con la aparición de normativa y recomendaciones para su uso en los diferentes países que han apostado por este nuevo material.



Figura 1. Pasarela en Sherbrooke, Canada. 1997

Esta apuesta de algunos países por el uso de las nuevas tecnologías del hormigón ha permitido una evolución tanto del material como de la manera de utilizarlo, aportando valiosa información a la hora de ajustar las dosificaciones del HMAR a las necesidades específicas de un diseño o a los requerimientos estéticos o funcionales de la obra.

Del mismo modo, se puede apreciar una evolución progresiva de las formas estructurales elegidas para las diferentes aplicaciones con HMAR a lo largo de este tiempo, en busca de una explotación óptima del material. Una de las construcciones que ejemplifica esto es la cubierta del peaje en el Viaducto de Millau, Francia (Figura 2), que resuelve una superficie alabeada de 98 metros de largo y 28 de ancho con un espesor máximo de 85 cm sobre el apoyo central.



Figura 2. Peaje Viaducto de Millau, Francia 2004

Destacar que en algunos casos el control del material ha permitido la ejecución in situ de parte con destacable función estructural como el tablero de los puentes de Bourg-Lès-Valances, Francia (Figura 3), en los que se ejecutaron los tramos de tablero de vigas prefabricadas y se colocaron en el sitio para después unirlos con HMAR vertido in situ.



Figura 3. Puente en Bourg-Les-Valence, Francia 2001

Los países que concentran el mayor número de obras en este campo son Japón, EEUU, Francia, Alemania, Suiza y los Países Bajos. Las aplicaciones más destacables hasta la fecha son pasarelas, puentes de carretera, escaleras, balcones, fachadas y láminas. Muchas de estas explotan principalmente la elevada compacidad y las características mecánicas de compresión y flexión. Sin embargo, algunas otras aplicaciones emplean el material por su característica de elevada durabilidad (vigas de las torres de refrigeración de centrales nucleares, o los mismos puentes de carretera en zonas de hielo-deshielo).

b. Aspectos destacables para el uso del HMAR

El HMAR puede considerarse un material con propiedades híbridas entre el acero y el hormigón convencional a un precio intermedio, lo cual le proporciona un evidente potencial de crecimiento como material de construcción capaz de asumir las ventajas de las diferentes familias de hormigones producto de la investigación de las últimas décadas (Figura 4).

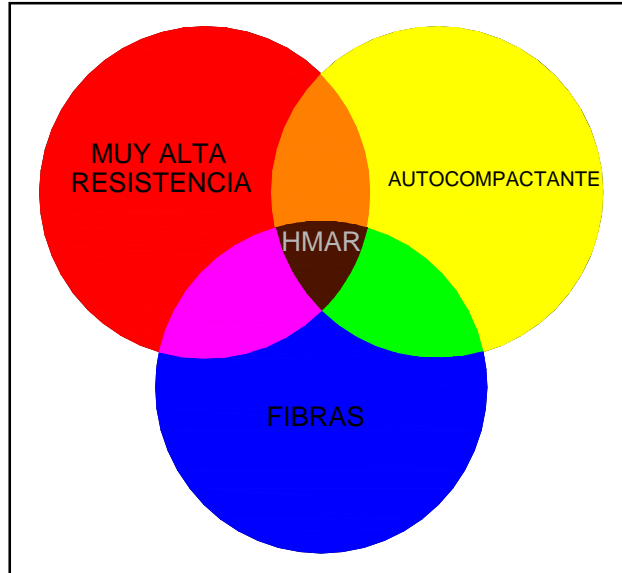


Figura 4. Familias de hormigones relacionadas con el HMAR

Elaborar este tipo de hormigón requiere materias primas exclusivas (fibras de alto límite elástico, superplastificantes de tercera generación, áridos con tamaño máximo reducido, etc.), maquinaria y procesos no convencionales (alta energía de fabricación, curado al vapor, etc.) y elevados niveles de control (humedad, dimensiones en elementos de reducido espesor, homogeneidad en procesos de fabricación).

La repercusión de las propiedades del HMAR para las aplicaciones estructurales es enorme y puede resumirse en los siguientes aspectos clave:

- ✓ Importante incremento de la resistencia a compresión del hormigón, y de la resistencia a corto plazo, permitiendo resolver esfuerzos de entidad con secciones esbeltas, y reducir la necesidad de sección y tiempos en soluciones pretensadas.
- ✓ Posibilidad de tener en cuenta la resistencia a la tracción, trabajando con elementos de hormigón. Los valores alcanzados resultan suficientes por si solos para resistir los esfuerzos secundarios que aparecen en los elementos estructurales tales como la retracción o los esfuerzos debidos a sollicitaciones tangenciales, pudiendo prescindir de armadura de cortante y secundaria.
- ✓ Ambos resultados permiten resolver las estructuras con una considerable reducción de secciones respecto al hormigón convencional, pudiendo suponer una disminución de volumen total de hormigón de entre el 60-75%. Puesto que el HMAR consume 3 veces más cemento que un hormigón convencional, esto permite mantener el volumen de cemento consumido.

- ✓ La disminución de volumen trae consigo una reducción del peso total de los elementos, permitiendo ahorros en los equipos de elevación, cimentaciones,... al tiempo que permite soluciones más esbeltas, fomentando la componente estética de las estructuras.
- ✓ La presencia de fibras, principalmente de la denominada fibra corta, en el seno del hormigón garantiza una distribución de esfuerzos internos, dotando a las estructuras de elevada ductilidad proporcionada por las fibras, y por tanto de un factor de seguridad adicional.
- ✓ La elevada presencia de materiales finos en la mezcla que constituye el HMAR unida al uso de superplastificantes de tercera generación, dota al material de propiedades autocompactantes que junto con la reducción de armado y la elevada resistencia hace posible la fabricación de elementos de espesor reducido.
- ✓ La finura de los materiales hace que los acabados de las superficies del HMAR imiten con extremada fidelidad las superficies del encofrado, uniéndose a la esbeltez a la hora de dotar de elevado valor estético a la construcción.
- ✓ Reducción de la *"fisuración apreciable"*. La presencia de fibras en el seno del hormigón contribuye a que el proceso de fisuración quede distribuido en una región amplia del elemento. A diferencia del hormigón tradicional en el que aparecen un número determinado de fisuras visibles y medibles, en el HMAR se produce lo que se conoce con el nombre de "multifisuración", esto es, el desarrollo de multitud de fisuras con un espaciamiento muy pequeño y una abertura mínima hasta llegar prácticamente a la rotura del material, lo que implica un incremento notable de la durabilidad de la estructura.
- ✓ La autocompactabilidad unida a la escasa fisuración hace del HMAR un material con excelentes condiciones de durabilidad incluso en los ambientes más agresivos. Esto permite la reducción de los recubrimientos de las armaduras, y por tanto una reducción de las secciones independiente de la debida a motivos resistentes.
- ✓ Se reducen por tanto los costes de mantenimiento de los elementos de HMAR (en relación con soluciones de hormigón tradicional o acero) y el volumen (en relación con soluciones de hormigón tradicional, manteniendo el consumo de cemento), al tiempo que se prolonga la vida útil, resultando por tanto un material aconsejable para fomentar una construcción sostenible.

De este modo, el HMAR nos permite conseguir estructuras esbeltas, alejadas del concepto megalítico del hormigón convencional y más próximas a las secciones propias del acero, pero con dos grandes ventajas respecto a este último: moldeabilidad (se consiguen las formas deseadas en una sola pieza con un mínimo de uniones, consiguiendo la textura superficial y el color deseados) y durabilidad (la compacidad del material permite garantizar su vida útil con un exiguo mantenimiento).

No obstante, alcanzar estas prestaciones supone elaborar un material con unos condicionantes muy específicos:

- ✓ Requiere materias primas exclusivas (fibras de alto límite elástico, superplastificantes de tercera generación, áridos con tamaño máximo reducido,

etc.), lo que supone complejidad para garantizar la temporalidad de los suministros y costes elevados.

- ✓ Será necesario emplear maquinaria y procesos no convencionales (alta energía de fabricación, curado al vapor, etc.), esto podría limitar su uso a tenor de los medios materiales disponibles por potenciales usuarios. Conlleva además la necesidad de un correcto estudio económico en lo referente a tiempos de fabricación y mano de obra, puesto que los ratios habituales de coste respecto al volumen de material fabricado son mucho mayores que los del hormigón convencional.
- ✓ Los moldes y medios de puesta en obra deben adecuarse a las características y tiempos del material, resultando necesaria una mayor calidad de los moldes y una correcta valoración de la mano de obra y los tiempos necesarios para la puesta en obra.
- ✓ Un factor clave para alcanzar el éxito será mantener un elevado nivel de control tanto en las materias primas como en el proceso de fabricación y puesta en obra. Será necesario modificar los criterios de control, controlando además de la trabajabilidad y la resistencia a compresión, que se alcanzan las resistencias a tracción consideradas en el cálculo y que existe coherencia entre lo ensayado y la realidad en cuanto al proceso de puesta en obra (orientación de fibras)

De este modo, el elevado coste y la escasa experiencia se convierten en factores que continúan limitando su empleo. Por tanto, para que el HMAR pueda competir en igualdad de condiciones con el resto de materiales es necesario el desarrollo de nuevos sistemas estructurales, formas, secciones y detalles que exploten al máximo las propiedades del material y permitan reducir al máximo el volumen empleado.

Es en estos aspectos en los que se fundamenta el presente documento, asumiendo como contrastados, tanto por la bibliografía como por la enorme experiencia del grupo de trabajo del ICITECH, los resultados previos de caracterización del material y dosificaciones, e incidiendo en las revisiones de los mismos y los nuevos aspectos aprendidos como resultado del diseño y la ejecución de un caso real.

c. Instrucciones y Recomendaciones del HMAR (UHPFRC)

Como hemos visto, nos encontramos ante un material con un enorme potencial, lo que ha fomentado una ingente cantidad de investigación en pro de su caracterización a nivel internacional.

Este proceso se ha intensificado en ciertos países que han visto la oportunidad de dar valor añadido a sus infraestructuras gracias a las propiedades del HMAR, lo que ha supuesto el surgimiento de una serie de documentos técnicos y recomendaciones que ofrecen criterios a la hora de caracterizar las propiedades y calcular estructuras materializadas con este material, de entre las que destacan:

- **France 2002: Interim Recommendations for UHPFRC - AFGC/SETRA.** Updated version 2013.

- **France** 2003: *Additional Informations for Interim Recommendations-AFGC/SETRA*
- **Japan** 2006: **JSCE** Recommendations UHSFRC
- **Germany** 2008: **DAfStB** Sachstandbericht UHPC
- **Australia**: Recommendation report for prestressed beams made with **ductal**
- **USA - FHWA** – Diversos documentos para caracterización completa de UHPC.
- General Recommendations for al fibre concrete types in **Model Code 2010**
- Recomendaciones de acuerdo con el **FIB TG 8.6**

Sin embargo, analizando aquellas de las que se han podido obtener documentación, se comprueba que existe aún cierta descoordinación a la hora de abordar criterios y parámetros que definan los procesos de caracterización y cálculo del material, por lo que parece necesario avanzar en la unificación de criterio, con la finalidad de generar una normativa internacionalmente aceptada.

A la hora de abordar el proyecto de la pasarela, se ha estimado oportuno seguir los criterios de las recomendaciones francesas AFGC/SETRA, documento eminentemente práctico basado en la experiencia francesa en cuanto a aplicaciones e investigación en los últimos años.

4. PROYECTO DE PASARELA PEATONAL CON HMAR

En fase de ejecución de las obras correspondientes al *Proyecto de acondicionamiento del Barranco de las Ovejas en su tramo final (pk 0+457 hasta desembocadura). Alicante*, surge la necesidad de plantear un proyecto modificado con la finalidad de resolver diversas problemáticas.

La Dirección de las Obras recaía en la empresa ICOSA Ingeniería Civil, en cuyo equipo trabajaba el autor del presente trabajo, compatibilizando dicho trabajo con la labor docente e investigadora en el Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Valencia.

Entre las actuaciones previstas en el proyecto, se planteaba la ejecución de una pasarela peatonal sobre el barranco la zona próxima a la desembocadura, permitiendo el tránsito de peatones desde el barrio de San Gabriel hacia el centro de Alicante, resuelta mediante un diseño de pasarela cubierta con estructura metálica, formada por una cercha en cajón.

Desde el grupo de investigación sobre tecnologías de hormigones especiales del ICITECH de la Universitat Politècnica de València, en coordinación con la Dirección de Obra, se propuso la opción de modificar el diseño de la pasarela con la intención de incorporar alguna de las últimas tecnologías desarrolladas por el grupo, recayendo en el autor del documento la responsabilidad de realizar su función como Dirección de Obra, resolviendo las modificaciones demandadas, al tiempo que participaba en el diseño, fabricación y puesta en obra de una solución estructural ejecutada con un nuevo material desarrollado por el grupo de investigación del que forma parte en la UPV.

El objetivo general de la propuesta era plantear una obra que fuese pionera en lo relativo al material empleado y el diseño constructivo, consiguiendo con tecnología española una realización que superase en estos aspectos a cualquier otra en España y que estuviese al nivel de los últimos avances incorporados en el resto del mundo, con la intención de que la pasarela que se construyese marcara un hito, procurando darle la máxima visibilidad posible y convirtiéndola en una obra emblemática para el barrio.

Esta propuesta se sustentaba en el hecho de que el grupo ha desarrollado los materiales y tecnología para garantizar la viabilidad del proyecto, a partir de las investigaciones y experiencias publicadas en los foros científicos más avanzados en la materia y siguiendo las recomendaciones francesas para el diseño con Hormigón de muy alta resistencia, a las que incorporar su propia experimentación y adaptándolas a las condiciones locales.

a. Descripción de la solución previa

Este proyecto incluía la ejecución de una pasarela peatonal de acero en el pk 0+160 del encauzamiento, con una longitud de 44.20 m, formada por un único vano, como elemento biapoyado entre los estribos evitando pilas intermedias que obstaculizasen el cauce.

Las principales características de la estructura proyectada eran:

- El ancho total del tablero era de 3.56 m, de los que son útiles 3 m.
- Trazado en planta en un solo tramo recto con un esviaje de 6.91° respecto al eje del cauce.
- Alzado horizontal, manteniendo los apoyos sobre la cota de inundación definida por los muros de encauzamiento.
- Estructura principal en cajón, formado por cuatro celosías planas, dos laterales, una superior y otra inferior, unido a la cubierta a lo largo de toda la pasarela por medio de montantes estructurales colocados cada dos metros, únicamente en uno de los laterales.

Se trataba de un elemento de acero corten (acero resistente a la corrosión atmosférica), prefabricado en taller por piezas de dimensiones adecuadas para el transporte, y posterior unión de los diferentes elementos a pie de obra mediante soldadura. Finalmente, y para su ubicación definitiva, se realizará un alzado de toda la estructura mediante grúa capaz de soportar el peso de la pasarela.

La pasarela debía quedar fuera de la cota de inundación, definida por el encintado de los muros de encauzamiento alineados con los estribos, cuya cota coincidía con la de la acera sobre la que desembarcará la pasarela en ambos laterales. Con esta configuración, el hecho de mantener un cajón de 1,2 metros de altura bajo la tarima sobre la que transitará el tráfico peatonal obligaba a realizar una rampa y una escalera en cada uno de las márgenes, necesarias para transitar entre la cota del tablero y la de la acera, siendo esta última bastante semejante en ambas márgenes, 5.22m en el margen derecho y 5.27m en el margen izquierdo.

b. Condicionantes para la modificación de la pasarela

El estudio de la zona, en cuanto a la conexión de la pasarela con la trama urbana en ambas márgenes, la singularidad del emplazamiento, a medias entre zona urbana, fluvial y marítima, y el interés transmitido por parte del Ayuntamiento de Alicante referente a la necesidad de reconsiderar y mejorar la solución proyectada, ponen de manifiesto la necesidad de estudiar con detalle la solución propuesta, de manera que resuelva de la manera más eficiente la funcionalidad de la misma, sin perder de vista el valor añadido que toda obra debe aportar al espacio en el que se desarrolla.

Respecto a la funcionalidad, se ha comprobado que, dado el escaso espacio de acera disponible en el desembarco de la margen izquierda, C/ Panamá (Plano de situación en Anexo 1), unido a los problemas derivados de la necesidad de garantizar el tráfico vecinal en dos sentidos en un único carril manteniendo los aparcamientos, sería

conveniente reducir el canto en apoyos, de manera que se realizase el desembarco a cota de acera, aun manteniendo la pasarela por encima de la cota de inundación.

De igual modo, el hecho de añadir al parque municipal la estructura de rampas y escaleras suponía una pérdida de zona verde y lúdica disponible actualmente poco aconsejable.

En ambos casos, el impacto visual de estos elementos con una altura considerable respecto a la cota de paseo actual hacían necesaria una reconsideración, al menos desde el punto de vista estético y de calidad visual del entorno.

En este sentido, la ubicación en planta de la pasarela, definida con la finalidad de dar continuidad a la salida de rampas y escaleras, dejaría de ser idónea, resultando más consecuente ubicar el desembarco en continuidad con la rampa y escaleras existentes en el parque, lo que conlleva trasladar la pasarela desde el pk 0+160 hasta el pk 0+140.9, coincidiendo también que en la margen izquierda no quede enfrentada con ninguna de las salidas de garaje existentes.

Continuando con las propuestas de mejora, en respuesta a las demandas del Ayuntamiento respecto a la calidad estética y singularidad de la solución proyectada, se estudian diferentes alternativas para modificar la tipología, materiales y geometría de la pasarela proyectada.

c. Propuesta de pasarela alternativa en HMAR

En una primera fase, una vez atendida la propuesta conjunta por parte del ICITECH y la Dirección de Obra a los promotores del Proyecto, Ayuntamiento de Alicante y Dirección General del Agua de la C.A.P.A.A., respecto a incorporar los resultados de la investigación sobre un nuevo material en el diseño de una pasarela alternativa a la proyectada, debían plantearse una serie de criterios y objetivos de partida sobre los que trabajar:

- Crear un diseño de máxima ligereza. Reduciendo el peso propio y procurando generar sensación de transparencia.
- Integrar la pasarela al entorno dándole un valor añadido que actúe como foco de atención.
- Crear una estética avanzada que reúna aspectos innovadores tanto en el diseño general de la obra como en los relacionados con la textura y color del material, pretendiendo que el aspecto responda a la innovación que representa, y por tanto marque las diferencias con otras tecnologías y materiales.
- El carácter relevante de la pasarela se pone de manifiesto considerando que la pasarela que se planea construir será la primera fabricada con HMAR en España, y la primera pasarela triangulada hecha exclusivamente con HMAR del mundo.
- **Estudiar en detalle el proceso de diseño, fabricación y puesta en obra, analizando los resultados aportados en las diferentes fases, con la**

finalidad de obtener conclusiones que permitan garantizar las condiciones de transferencia a una obra real, de los resultados teóricos y experimentales obtenidos hasta la fecha con el HMAR.

Tomando como referencia todos estos puntos, se aborda una primera fase de diseño con la finalidad de encontrar una solución que permitiese resolver los condicionantes del proyecto, adaptada a las propiedades del HMAR.

En esta fase, clave para el éxito del proyecto, se contó con los técnicos del grupo de trabajado del ICITECH, el personal técnico de la Dirección de Obra y el propio autor del presente documento.

Para alcanzar el resultado final, fue necesario un largo proceso iterativo en el que se fueron planteando y mejorando soluciones, producto no solo de adecuar estas soluciones a los condicionantes de la pasarela, sino de comprobar la viabilidad estructural de algunas secciones de HMAR propuestas al analizarlas en detalle o de tratar de aportar el valor añadido referente a la estética final que formaba parte de los objetivos del trabajo.

Como resultado de las diferentes propuestas estudiadas, cuyos aspectos destacables quedan recogidos en el apartado correspondiente, se obtiene un diseño de pasarela biapoyada en cajón de sección trapecial abierta prefabricada en hormigón pretensado, con canto variable y laterales aligerados en forma de celosía formados mediante elementos esbeltos, diseñada en su totalidad en HMAR con resistencia característica a compresión 150 MPa, coloreado en masa.

El tablero por el que circularán peatones y ciclistas transita entre márgenes con un alzado parabólico, en paralelo con el trazado del canto variable de los laterales, de manera que el peatón no aprecia el cambio de sección desde el interior de la misma.

Este tablero estará formado por losas de 3 metros de ancho y hasta 4 metros de longitud, apoyadas en el esquema resistente de la viga principal. Estas losas se han diseñado con HMAR de resistencia característica a compresión 135 MPa, coloreado en masa, únicamente con 3 cm de espesor y sin armado tradicional adicional a las fibras. Sección impensable en hormigón que permite apreciar el potencial del material.



Figura 5. Infografía del diseño final presentado

De este modo se consiguió diseñar la que es la primera pasarela en España ejecutada en HMAR y la primera en el mundo con un diseño de celosía como el que se muestra en la Figura 5, cuyas características principales se resumen a continuación y se desarrollan con mayor detalle en el Anexo 1, en el que se han incluido los planos del proyecto constructivo al que pertenece.

d. Descripción de la pasarela en HMAR proyectada

La pasarela finalmente diseñada salvará una luz libre de 42.81 metros en eje, mediante un elemento de 43.51 metros en eje, con ambos apoyos esviados, con un canto total en apoyos de 1.44 metros y un canto en centro luz de 2.06 metros, incluyendo en ambos casos la altura barandilla estructural. El ancho libre para el tránsito de peatones es de 2.80 metros.

Tanto los laterales como la base se han aligerado buscando un equilibrio entre la componente estética y la eficiencia del material, buscando emplear la sección de material necesaria únicamente en la posición que lo requiera, manteniendo un criterio formal para garantizar un agradable efecto visual en el resultado final.

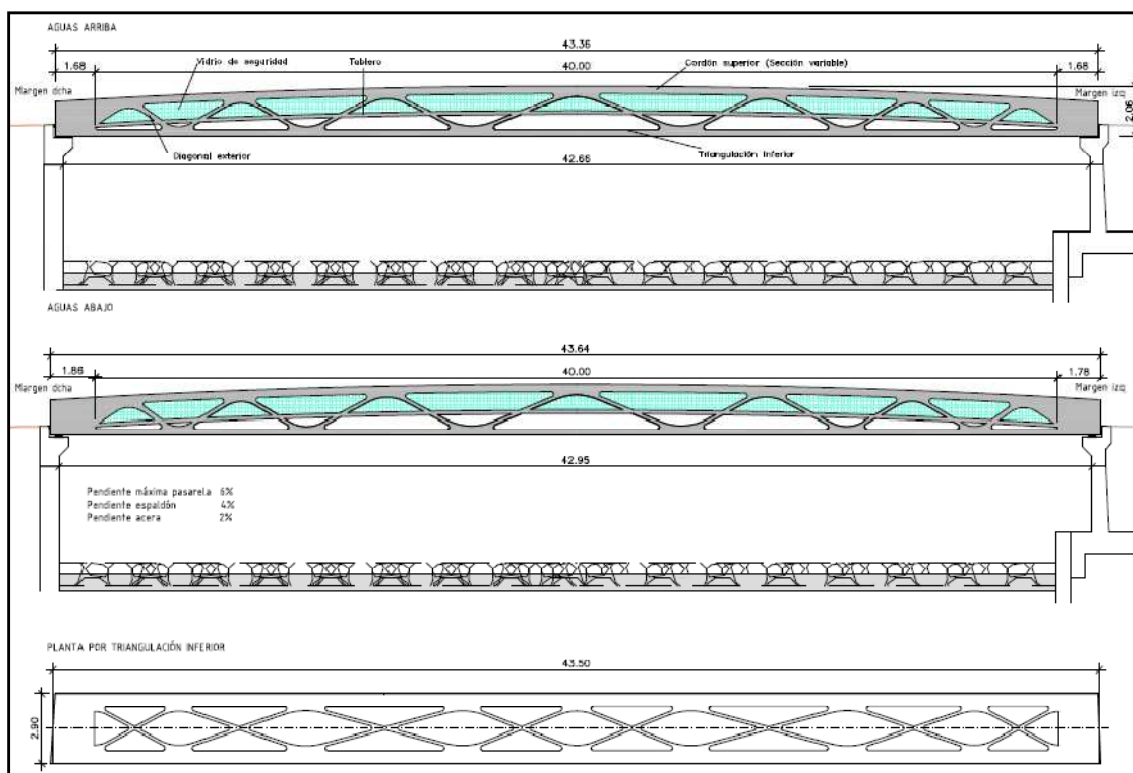


Figura 6. Alzados y base de la pasarela

La estructura se resuelve mediante una sección tipo cajón en U pretensada en su base (18+18 cables de 0.6"), con los laterales inclinados hacia el exterior con pendiente 1H:6V, manteniendo un ancho en el plano inferior de la base de 2.90 metros, y alcanzando en coronación un ancho máximo de 3.60 metros, coincidiendo en el centro luz con la sección de mayor canto.

La superficie pisable mantiene una altura sobre rasante constante de 1.05 metros, quedando las losas de 3 cm de espesor que la forman simplemente apoyadas en las riostras horizontales dispuestas a lo largo de la estructura, coincidiendo en su mayoría con los encuentros del tablero con las diagonales laterales. Estas riostras cierran estructuralmente el cajón inferior, permitiendo a la estructura resistir correctamente el cortante debido a acciones horizontales y los torsores.

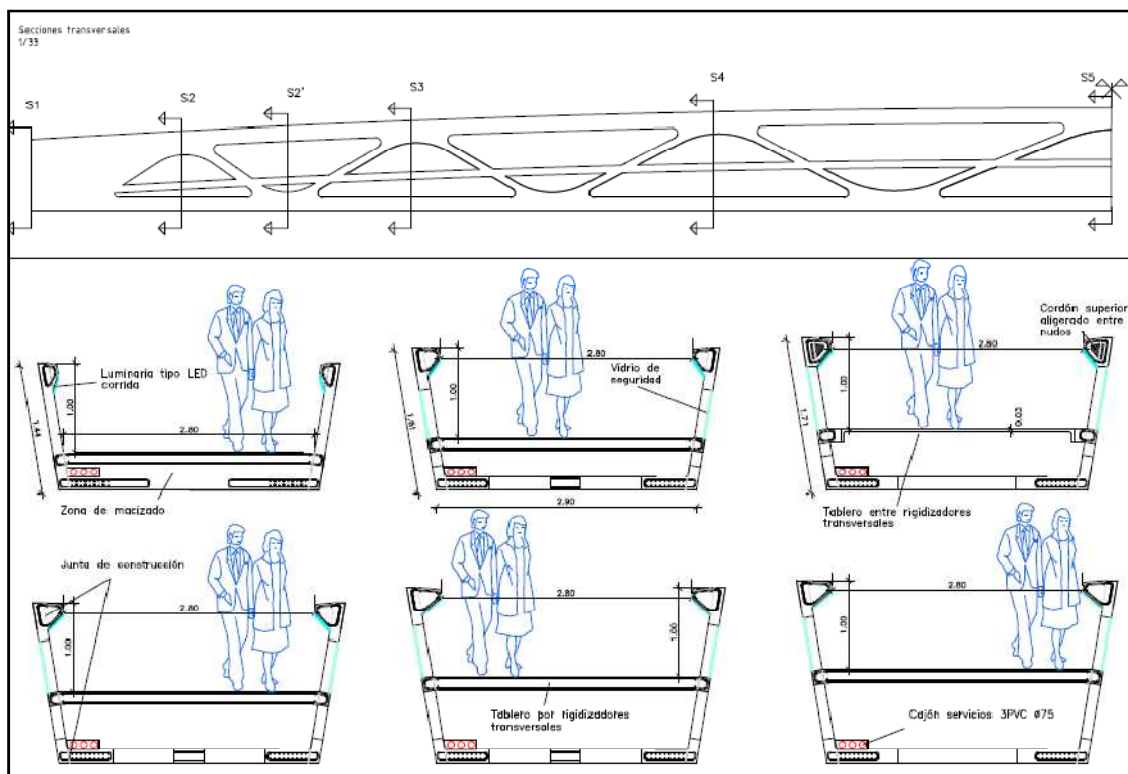


Figura 7. Secciones tipo de la pasarela

La estructura de HMAR se planteó para ser ejecutada íntegramente en taller, llevándose a obra y colocándose sobre los aparatos de apoyo previamente dispuestos en obra.

Para la ejecución de la estructura resistente de la viga se han empleado 28 m³ de HMAR, lo que supone un peso propio de la estructura de 70.000 Kg, frente a los 67.000 Kg de acero que proponía la estructura metálica del proyecto previo.

El pavimento pisable, ejecutado también en HMAR texturizado en superficie, supone otros 5 m² de material, alcanzando un total de 80.000 Kg, equivalente al peso total de la estructura de acero al añadirle los elementos de cobre de la cubierta, tarima de madera y barandillas de acero.

La totalidad del HMAR de la viga principal se ha coloreado en masa mediante pigmento con una tonalidad verde oscura, mientras que las losas que forman el pavimento añaden a la textura antideslizante superficial y tono ocre, obtenido en la masa del HMAR mediante pigmentos.

5. DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS DE DISEÑO, EJECUCIÓN Y MONTAJE.

a. Aspectos previos

Resulta necesario explicar previamente a la descripción de trabajos relacionados directamente con el proyecto y la ejecución de la pasarela, una serie de valoraciones y planteamientos previos que permitieron lanzar este proyecto adelante.

En estos momentos es un hecho que la primera pasarela en España ejecutada con HMAR está puesta en obra y estamos finalizando otros proyectos con este material, teniendo absolutamente clara la viabilidad de los mismos, sin embargo, si nos remontamos al verano de 2011 estas sensaciones cambiarían notablemente.

Esto es debido a que el hecho de poner en obra nada menos que una pasarela peatonal de 43 metros de luz y 3 metros de ancho, con un material nunca utilizado en este país y sin normativa española de referencia, como prueba de que el HMAR es el material idóneo para este tipo de obra, no parece lo más habitual, al menos en el mercado de la construcción español.

Dicho de otro modo, la idea de plantear una alternativa a una pasarela de acero dentro de un Proyecto Modificado de una obra en ejecución en base a que, como tantas veces se ha repetido, el resto de países han echado mano del dinero invertido en I+D+i y han apostado por emplear esos resultados, mientras que nosotros hemos alcanzando un altísimo nivel de investigación pero estamos lejos de ponerlo en práctica, puede parecer algo totalmente razonable, y los hechos demuestran que es así, pero por desgracia la realidad no se mueve en estos parámetros.

La primera labor a realizar, una vez puesta la idea sobre la mesa y realizado un primer predimensionamiento para evaluar las posibilidades del proyecto, consistía en concretar, estudiar y resolver todos los aspectos administrativos, técnicos y principalmente económicos que conlleva una proyecto de ejecución en relación con el uso de un material nunca empleado, de manera que una propuesta de aplicación de nuevas tecnologías se presentase sin dejar cabos sueltos que pudiesen poner en duda la viabilidad global de la misma.

Esto supone que el haber podido realizar este interesante trabajo, y contar con todos los resultados que aquí se presentan, parte de una labor previa de justificación de la “aventura” que comenzaba, que debía ser capaz de convencer tanto a las personas involucradas en el proyecto, como a todos aquellos cuyo consentimiento era necesario para ponerlo en práctica. Estos aspectos pueden parecer lejanos en cuanto al talante investigador del trabajo, pero como se ha comprobado suponen condición necesaria para un proceso de transferencia de los resultados de la investigación.

I. CONDICIONANTES ADMINISTRATIVOS

El primer escollo a salvar a la hora de introducir la pretendida modificación de la pasarela reside en la justificación de la modificación en sí misma, puesto que los aspectos antes comentados respecto a la inconveniencia de la solución inicial no resultaban de por sí motivos de cambio, y en ningún caso se trataba de problemas que no pudiesen solventarse con los materiales y procedimientos previstos en proyecto.

Requería por tanto de una justificación que motivase y justificase tanto legal como administrativamente un cambio de tal calado respecto a lo proyectado.

La idea y motivación del cambio propuesto se correspondía con la filosofía preponderante en las últimas modificaciones de la Ley de Contratos del Sector Público es el denominado desarrollo sostenible, entendido en toda la amplitud que se pueda entender (desde consumos y gestión de residuos hasta las formas de contratación), de manera que la legislación aplicable a la hora de abordar el Proyecto Modificado, *Real Decreto Legislativo 3/2011, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Contratos del Sector Público*, incorpora en el Título V “Modificación de los Contratos”, y en particular con el apartado d) del nuevo Artículo 92 quáter, el siguiente texto como circunstancia que justificadamente motivada resulta suficiente para realizar modificaciones al proyecto:

“d) Conveniencia de incorporar a la prestación avances técnicos que la mejoren notoriamente, siempre que su disponibilidad en el mercado, de acuerdo con el estado de la técnica, se haya producido con posterioridad a la adjudicación del contrato.”

Debemos tener en cuenta que el proyecto contemplaba una pasarela de acero a escasos 200 metros del mar, planteamiento que preocupaba notoriamente tanto a la Dirección de Obra como al Ayuntamiento de Alicante, propietario final de la pasarela, puesto que en las fechas de inicio de la obra acababa de clausurarse al público una pasarela de acero en El Perelló (Valencia), en un entorno prácticamente igual al de la pasarela de proyecto, por problemas de inseguridad debida a la oxidación de diversos elementos.

Así, la posibilidad de emplear un material aportase una solución equivalente en coste y funcionalidad a la del proyecto existente y que redujese prácticamente a cero el problema de durabilidad de la estructura resultante, sin necesidad de un mantenimiento en el tiempo costoso, resultaba una opción muy conveniente.

Esta conveniencia llevó a la Administración contratante a valorar muy positivamente la incorporación del HMAR como material para la pasarela, delimitando una serie de consideraciones:

- La modificación de la obra se realiza a coste cero. El coste real de la pasarela diseñada, así como de las unidades de obra afectadas, no debían modificar al alza el coste previsto para las mismas en el proyecto previo. Este condicionante implica la idea de que la actuación sólo se realiza si es competitiva en sí misma en la actualidad con otras soluciones comerciales, especialmente en una época de crisis como la actual.

- Si bien es importante aprovechar las sinergias entre las investigaciones de la Universidad, los apoyos de la financiación pública y la actividad de las empresas y administraciones, es también importante diferenciar los costes de las actividades. Por ello la repercusión económica a la obra será la exclusivamente relacionada con la ejecución de la pasarela en aquellos elementos necesarios para su funcionamiento como tal. No se incluirán otros elementos que puedan incorporarse para analizarla con fines investigadores. En la misma línea las ayudas a la investigación recibidas serán utilizadas para los fines que puedan ser justificados como I+D+i, y nunca para reducir el coste real de la obra. Evidentemente los conocimientos y experiencias servirán para mejorar el valor de las dos actividades.
- La obra se realiza con riesgo cero. Es decir, sólo se incorpora las innovaciones contrastadas por los estudios previos, por las experiencias del equipo, por la realización de ensayos que verifiquen el comportamiento real, y por todas las actuaciones que se realizarán durante el proceso de ejecución.
- El nivel de exigencia general de la obra se mantiene. En este sentido:
 - Las exigencias hidráulicas de la obra se deben mantener o incrementar.
 - Las solicitaciones para las que se calcula, y sus coeficientes de seguridad deben mantenerse o incrementarse.
 - Las garantías de durabilidad deben incrementarse.
 - Las condiciones previstas para el uso de la pasarela deben garantizarse o mejorarse, reduciendo los costes de mantenimiento previstos.

En este términos se planteó la propuesta, y en estos términos la Administración responsable admitió la incorporación de una pasarela de HMAR en el Proyecto Modificado.

II. CONDICIONANTES TÉCNICOS

Resuelta la parte administrativa, era necesario justificar que existía una base técnica suficiente, que permitiese garantizar que el material estaba suficientemente controlado y contrastado.

En primer lugar se presento la experiencia internacional antes comentada, a la que se adjuntó el extenso dossier de trabajos y publicaciones realizados por los técnicos del ICITECH que iban a participar en el proyecto.

En cuanto a las dudas acerca la normativa y criterios a emplear en el diseño y ejecución, el planteamiento resulto sencillo partiendo de un razonamiento que resume los aspectos técnicos que avalan la propuesta:

La EHE define los criterios con los que diseñar y ejecutar estructuras de hormigón en nuestro país, incorporando ya en su última revisión hormigones con resistencias a compresión hasta 100 MPa, hormigón autocompactante (Anejo 17 EHE-08) y

hormigón con fibras (Anejo 14 EHE-08), por lo que el material que se propone no deja de ser una mejora de todo estos conceptos incorporados en un único material.

Esta revisión de la instrucción, según reza el Real Decreto 1247/2008 por el que se aprueba, “...se configura como un marco de unicidad técnica coherente con lo establecido en la normativa técnica europea y armonizado con las disposiciones relativas a la libre circulación de productos de construcción dentro del mercado único europeo, en particular con la Directiva 89/106/CEE.” Por lo tanto, el hecho de encontrar soluciones comerciales del material como el ©DUCTAL o ©CEMTEC equivalentes al que se propone y cuyo uso estaría permitido, unido a la existencia de Instrucciones y Recomendaciones al respecto de diversos países de la CEE avala el uso de este material manteniendo los criterios de la propia EHE.

Como aspecto más clarificador de la posibilidad de abordar el proyecto, encontramos la referencia del *Artículo 2º: Ámbito de aplicación* de la EHE que incluye el siguiente párrafo: “*Cuando a la vista de las características de la obra, definidas por la Propiedad, la estructura pueda considerarse como una obra especial o singular, esta Instrucción será de aplicación con las adaptaciones y disposiciones adicionales que, bajo su responsabilidad, establezca el Autor del proyecto para satisfacer las exigencias definidas en esta Instrucción, con su mismo nivel de garantía.*”

No dejando dudas, una vez demostrados los conocimientos del material, de la viabilidad técnica de la propuesta asumida por los autores del proyecto.

III. CONDICIONANTES ECONÓMICOS

Una vez resueltos estos condicionantes, debía quedar fundamentada una de las premisas incluidas en la justificación administrativa:

“La modificación de la obra se realiza a coste cero”

Con la finalidad de clarificar este término, cuya ratificación vendría dada con el presupuesto de la prefabricadora, se partía de las dosificaciones propias desarrolladas y valoradas por la UPV (Tabla 1, [Camacho 2012]).

De ellas se optó por emplear la de Nivel Alto, por presentar el mayor nivel en cuanto a características resistentes lo que debía permitir optimizar la estructura hasta un nivel suficiente para garantizar la competitividad del proyecto.

Esta dosificación, en cuanto a fabricación y materias primas tenía una valoración suficientemente acotada por las diferentes realizaciones ejecutadas por la propia UPV con PREVALESA, la prefabricadora a la que se iba a encomendar la ejecución, pudiendo presuponer un coste de 900 €/m³ de material fabricado.

Dosificación	Nivel básico	Nivel medio	Nivel alto
Tipo de cemento	42.5 R/SR	42.5 R/SR	42.5 R/SR
Contenido de cemento (Kg/m ³)	635	850	1000
Tipo de adición activa	HdS Ferroat	FC3R	FC3R
Contenido de adición activa (% s.p.c.)	10%	10%	15%
Relación Agua/Conglomerante	0.26	0.21	0.175
Aditivo PCE (% s.p.conglom.)	4.5% tipo C	4.5% tipo C	3% tipo B
Árido grueso calizo 4-7 mm (Kg/m ³)	600	0	0
Dmax. Arena (mm)	1.3	1.3	1.6
Tipo de fibras largas	RC-65/35-BN	RC-80/30-BP	RC-80/30-BP
Contenido de fibras (cortas+largas) (%)	0.75% + 0.75%	1% + 1%	1% + 1%
Paste Volume Fraction (%)	42.5%	52.7%	59%

Propiedades	Nivel básico	Nivel medio	Nivel alto
T50 (s.)	30	17	7.5
Escurrimiento (mm)	588	763	800
Resistencia compresión a 24 h (MPa)	62.4	76.2	71.9
Resistencia compresión a 7 días (MPa)	101.5	120.6	139.2
Resistencia compresión a 28 días (MPa)	127	137.2	161.2
Resistencia a flexión lineal equiv. (MPa)	17.8	25.3	31.1
Energía acum. hasta 3 mm (MPa*mm)	47.2	66	80.1

Tabla 1. Dosificaciones estudiadas por el ICITECH (UPV)

Estos costes con dosificación propia, permiten una reducción considerable respecto a los derivados de emplear patentes comerciales del material, que aún pudiendo aportar valores de resistencia mayores, requieren para ello de sobrecostes en fabricación y puesta en obra (curado al vapor, tiempos de amasado) además de la repercusión del coste de la patente aún no amortizado.

De acuerdo con la bibliografía [Walraven 2012], si diferenciamos el HMAR de acuerdo con la nomenclatura aceptada internacionalmente encontramos los UHPFRC (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete) con resistencias a compresión superiores a 150 MPa y los VHPFRC (Very High Performance Reinforced Fiber Concrete) que con unos niveles de resistencia a compresión entre 120 y 140 MPa son los que aportan resultados óptimos teniendo en cuenta el peso, durabilidad, resistencia a la abrasión y coste.

Pese a que la estructura de la pasarela de referencia es de acero, fue inevitable que esta primera valoración obligase a una primera comparación con el precio del hormigón convencional. Como veremos después, esto tiene más que ver la denominación de este nuevo material, cuyas propiedades y reología distan más en algunos aspectos del hormigón que del acero, y con la elección de las unidades con las que realizar la valoración (€/m³ en lugar de los €/kg propios del acero) que con una equivalencia entre materiales que permita comparativa.

Así, este coste podría parecer desproporcionado si se toman como referencia los valores habituales del hormigón tradicional, unos 60 €/m³, pero evidentemente la comparación debe hacerse en términos de igualdad, por lo que deben ser los costes de un elemento que permita resolver de igual modo las acciones a las que está sometido, empleando soluciones con ambos materiales, los que se comparen. Existen diversos trabajos al respecto que permitieron aclarar en tema rápidamente.

Tomando los resultados para elementos de luz considerable trabajando principalmente a flexión, equivalentes a la pasarela que nos ocupaba, encontramos valores de

reducción de secciones entre elementos prefabricados de hormigón pretensado y elementos de HMAR entre el 20% y el 40%.



Figuras 8 y 9. Ejemplos de secciones equivalentes entre HP y HMAR

De este modo, una propuesta genérica de valoración aportada por [Camacho 2012] (Tabla 2), deja claro como una reducción del volumen de material empleado de $\frac{1}{4}$ permite materializar estructuras de HMAR con un coste equivalente, al que se debería añadir la evidente mejora de durabilidad, y por tanto la reducción de unos costes de mantenimiento de difícil valoración.

Solución	Coste m ³	Vol. usado	Tiempo montaje	Coste transporte	Vida útil
H. convencional	1	1	1	1	1
UHPFRC	8-10	0.2-0.5	0.2-0.5	0.3	4

Tabla 2. Comparativa de costes entre soluciones prefabricadas de hormigón convencional y estructuras equivalente prefabricadas con HMAR

Los trabajos que están realizándose en la actualidad han permitido comprobar un factor añadido al comparar las soluciones de HMAR respecto a las equivalentes en hormigón pretensado convencional, como consecuencia de que el aumento de sección necesaria aumenta a su vez las necesidades de sección por peso propio.

Requerir secciones mucho mayores para resolver una estructura a flexión redundante en un aumento considerable del peso propio a resistir por la propia estructura, dado que contamos con un peso específico equivalente entre materiales, lo que supone una mayor necesidad de armado activo y de sección, convirtiéndose en un proceso iterativo partiendo de las secciones mínimas del HMAR hasta que la estructura acaba “soportándose a sí misma” además de a las sobrecargas equivalentes en ambos casos.

Cubiertas las primeras dudas relativas al orden de magnitud del coste de este nuevo hormigón, debía considerarse su relación respecto a la estructura de acero que nos ocupaba.

Dada la necesidad de cumplir el objetivo de incremento cero con la nueva solución, el razonamiento era sencillo: la solución competitiva con la estructura de acero planteada debía pesar lo mismo que ésta, no incrementando el coste de las subestructuras y equipamientos, y ejecutarse con materiales cuyo coste no supere al del acero.

Atendiendo únicamente al material, un coste aproximado de los aceros en el mercado podría estar entre 1-1.5 €/kg, encontrando aquí una de las claves que citábamos anteriormente, puesto que con una densidad de 7850 kg/m³ supone entre 7850-11750

€/m³, valores muy superiores a los del HMAR y que sí llamarían la atención mal referenciados.

Llevando estos números a la práctica, el acero empleado en proyecto suponía unos costes medios del material puesto en obra, incluyendo transporte, uniones y acabados, de 2.5 €/kg.

Esto dejaba claro el objetivo, y serviría para garantizar en una primera fase este condicionante económico, de manera que la estructura a proyectar debía resolver la luz del barranco con un peso equivalente al de la estructura de acero proyectada (67.000 kg de acero en estructura portante) y los costes del material no deberían exceder los 2.5 €/kg (lo que suponía 6250 €/m³ para una densidad de 2500 kg/m³ del HMAR).

Teniendo en cuenta la relación de densidades entre el acero y el HMAR, esto suponía conseguir una relación de secciones de 1/3, valores asumibles a tenor de los estudios realizados, con lo que contábamos con unos 5000 €/m³ a repercutir en moldes, fabricación, armaduras activas y pasivas, transporte y demás costes relacionados con la prefabricación de la pasarela.

Partiendo de los diseños previos y la experiencia adquirida en los elementos con HMAR realizados en los anteriores proyectos de investigación, se realizó el pertinente estudio con la empresa de prefabricados PREVALESA, concluyendo que era razonable alcanzar estos costes, lo que haría el proyecto viable.

Tomando este dato para el HMAR como válido, podemos resumir todo esto en la Tabla 3, en la que se pueden comprobar de un modo más claro las referencias entre materiales y las diferencias entre posibles soluciones.

	HP-50	HMAR	Acero
Coste material base [€/m3]	60	900	7850
Coste material base [€/kg]	0.026	0.36	1
Coste estructura puesta en obra [€/m3]	1000	6250	19625
Coste estructura puesta en obra [€/kg]	0.4	2.5 (*)	2.5
% material/estructura	6.00%	14.40%	40.00%
% (armados, uniones, moldes,...)/estructura	94.00%	85.60%	60.00%
Volumen estructura tipo ref. HP [m3]	1	0.25	0.08
Peso estructura tipo ref. HP [kg]	2500	625	628
Coste total estructura tipo [€]	1000	1562.5	1570
(*) Valor objetivo propuesto, validado por la prefabricadora			

Tabla 3. Resumen comparativa costes Hormigón pretensado – HMAR - Acero

Para confeccionar esta tabla se han tenido en cuenta precios de mercado, extrayendo el *Coste estructura puesta en obra* para la solución de hormigón pretensado como un precio medio en base a diferentes presupuestos de vigas prefabricadas pretensadas cubicadas para este fin. Los valores totales de estructura se encuentran referenciados a un valor unidad para el volumen de una solución tipo en hormigón pretensado.

De su análisis se pueden extraer valiosas conclusiones que permitieron en su día validar económicamente la continuidad del proyecto, y que cobraron mayor valor al

comprobarse una vez ejecutada la pasarela el cumplimiento de las consideraciones de partida:

- Introducir en la comparación los precios del material base (hormigón, HMAR o acero) carece de sentido, puesto que las propiedades de cada material imponen una serie de elementos y procesos hasta que realmente resulta una estructura puesta en obra suponen más del 50% del coste total en todos los casos.
- Cuanto mejores son las características mecánicas del material base, mayor es el porcentaje que supone sobre el total del coste de la estructura, equiparándose prácticamente en el acero, y suponiendo el coste del hormigón pretensado únicamente un 6% del coste total del elemento prefabricado. El HMAR se encuentra en valores intermedios, resultando más significativo sobre el total, 14.4%, el coste del material base respecto al HP-50.
- Manteniendo la relación de secciones equivalente avalada por la experiencia (HMAR/HP=1/4, Acero/HMAR=1/3), nos encontramos con estructuras de acero y HMAR con peso y coste equivalente, pero que suponen un incremento de coste del 50% respecto a las soluciones en HP, al tiempo que reducen el peso al 25%.
- El incremento de coste de estas soluciones debe venir compensado con la mejora estética en cuanto a esbeltez, la reducción de cantos por necesidades de gálibo, reducción de costes en subestructuras o reducción de cargas a cimentación. Al igual que ya ocurría entre el hormigón y el acero, esto supone que las condiciones de cada obra aconsejarán el uso de un material u otro.

Así pues, quedaba claro que para demostrar la competitividad económica del material, no resultaba tan limitante el coste de las materias primas, pese a su importancia, resultando clave el trabajo que se realizase para obtener un diseño que optimizase el uso del material, al tiempo que permitiese una ejecución sencilla minimizando en la medida de lo posible los costes de moldes, mano de obra para la ejecución,...

Puesto que la singularidad del proyecto era en sí uno de los objetivos marcados al inicio del proyecto, se puede comprobar que en la fase de diseño que no se primó esta faceta de ejecución sencilla, considerándose clave el aportar este valor añadido a la solución final, lo que supuso derivar toda la labor de control de coste a la reducción del volumen de material empleado y el estudio de los procedimientos más económicos en fase de ejecución.

PROBLEMÁTICA: La solución con HMAR debía suponer un importe equivalente a la estructura proyectada en acero, partiendo de un material con un coste de 900 €/m³.

RESOLUCIÓN: Aprovechando las excelentes cualidades del material resultaba posible plantear estructuras esbeltas, que resolvían el paso con un peso equivalente al de la estructura metálica propuesta, por lo que garantizando que los costes de fabricación y puesta en obra permitían alcanzar unos valores equivalentes a los del acero de proyecto (2.5 €/kg) se demostraba la viabilidad económica del proyecto. Estos valores vinieron avalados por el estudio inicial de la casa de prefabricados.

COMENTARIOS: Para que las soluciones con HMAR resulten competitivas, el factor clave es un correcto diseño con dos objetivos claros: 1) Reducir el volumen del material hasta estructuras con peso equivalente a las de acero. 2) Minimizar los costes derivados del procedimiento constructivo (moldes, fases de ejecución,...). Añadiendo esto a un estudio de las materias primas y el proceso de fabricación el material podemos obtener un resultado incluso más económico que las soluciones equivalentes.

b. Fase de diseño

El objetivo por tanto era claro, por una lado conseguir una estructura en HMAR con un ancho de paso y una longitud equivalente a la pasarela proyectada. Al mismo tiempo, trabajar esa solución hasta conseguir una solución estética acorde con la singularidad demandada, optimizando las secciones con el doble objetivo de conseguir esbeltez y reducir del volumen de material empleado.

Tomando como referencia las aplicaciones del material hasta la fecha y sus características, parecía evidente abordar el problema mediante estructuras en celosía, cuyas triangulaciones llevasen a los elementos que las componen a trabajar predominantemente a axil, consiguiendo así la mayor eficiencia estructural en el uso del material.

La moldeabilidad del material, unida a posibilidad de acabados de calidad en el proceso de prefabricación, permitiría resolver las uniones de las triangulaciones en laterales mediante trazados curvos sin juntas, alejándonos de la estética industrial de la celosía propuesta en proyecto, y consiguiendo unas formas novedosas sin necesidad de complejas soldaduras.

A estos planteamientos de partida se unieron ciertos condicionantes de diseño relacionados con la obra de encauzamiento en la que se incluía:

- Ancho libre 3 m
- Luz libre entre apoyos 43.5 m
- Entronque en apoyos con acera y barandilla de 1 m
- Pendiente máxima del 6% (accesibilidad)

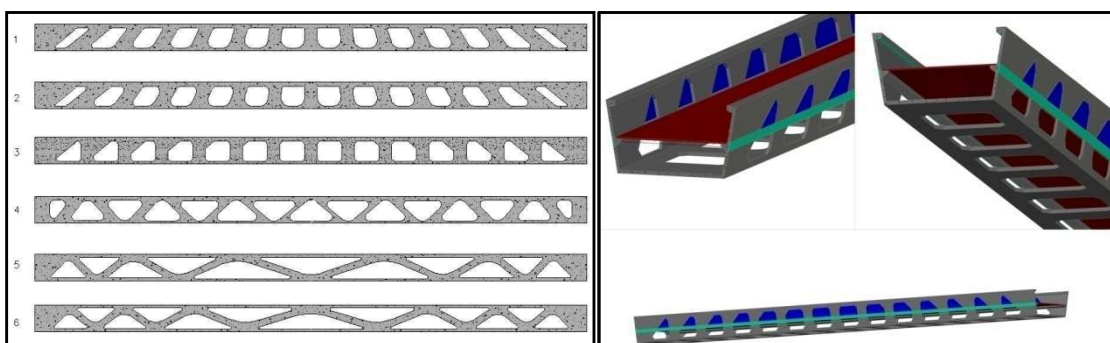
Con un ancho aproximado de tres metros y el objetivo de minimizar el impacto visual, la opción más razonable era una sección en cajón, aprovechando la altura de barandilla necesaria como canto estructural, de manera que estos laterales triangulados trabajen con el brazo total desde base a pasamanos, minimizando el canto total de pasarela necesario y obteniendo un diseño transparente en alzado con secciones reducidas.

Establecido una primera idea de diseño, con la finalidad de facilitar el objetivo de alcanzar el precio perseguido mediante la minimización de costes derivados de la prefabricación del elemento, se atendieron los condicionantes geométricos expuestos por esta en cuanto a geometría de moldes disponibles.

- Sección transversal enmarcada en la geometría del molde en artesana.
- Pendiente de los laterales hacia el exterior 6V:1H
- Cordón superior hacia el interior de la pasarela
- Máxima anchura en base de la pasarela 2.90 m

Contando con las limitaciones expuestas se inicia un proceso de diseño con la finalidad de encontrar una solución que aúne la estética, la funcionalidad y optimización de secciones, aportando la esbeltez suficiente para cumplir el condicionante económico mediante una resolución del sistema estructural elegante y compensada.

Se plantean diferentes estructuras de celosía (Pratt, Virendel,...) concluyendo que un diseño en celosía tipo Warren sin montantes verticales y con longitudes de paso variables, permite una mejora estética considerable respecto al resto de configuraciones, al tiempo que optimiza el material, introduciendo diagonales de mayor longitud en la zona central (menores esfuerzos) y más cortas en la zona de apoyos (mayores esfuerzos).



Figuras 10 y 11. Esquemas de diseño iniciales

Una vez acordada la tipología de los laterales, restaba por definir la ubicación del pavimento, su unión a la estructura y el entronque con las aceras y muros del encauzamiento.

En las primeras versiones (figuras 10 y 11) se proponían soluciones similares al cajón de la pasarela de acero inicial, sin embargo dentro de la filosofía de optimización estructural con la que se abordaba el proyecto, no se consideró razonable el resolver un elemento biapoyada mediante una viga de canto constante, por lo que se optó por mantener el canto mínimo necesario en apoyos, transitando hasta el canto necesario para el mantener diagonales esbeltas en centro luz.

Esto permitía definir la sección mínima en apoyos, en función de la necesidad de canto en la base para resolver esfuerzos de cortante, torsor y pretensado, de manera que con 1.44 m (0.44 de estructura y 1 metro de barandilla) quedaba resuelto el problema estructural, al tiempo que se generaba un encuentro homogéneo con la geometría de los muros del encauzamiento.

Esta sección aumenta la altura de sus laterales de acuerdo con un trazado parabólico, partiendo de un 6% hacia la horizontal para cumplir las condiciones de accesibilidad, hasta alcanzar un canto total de 2.06 metros en el centro de vano.

Sobre esta geometría se planteó la distribución de longitudes de diagonales, introduciendo un modelo de elementos finitos en el SAP2000 con la finalidad de evaluar esfuerzos y deformaciones de la estructura resultante.

El desarrollo de los cálculos necesarios para asegurar los niveles de seguridad requeridos para la estructura se encuentra detallados en el Proyecto Modificado [11], describiéndose aquí únicamente los aspectos más significativos del mismo e incidiendo en los aspectos relacionados con el procedimiento constructivo de la pasarela y algunas conclusiones extraídas al comprobar y verificar los resultados.

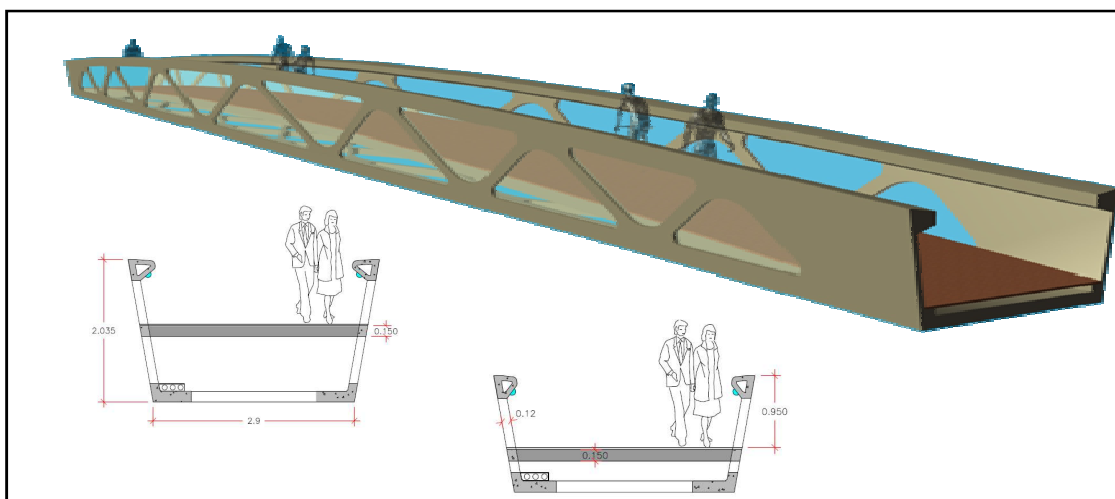


Figura 12. Representación de la estructura propuesta en el Proyecto modificado

I. ACCIONES Y CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL PARA PROYECTO

En lo referente a acciones, Estados Límite y combinaciones, para el proyecto de la pasarela se ha seguido la “Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera IAP-11”, puesto que no existe limitación en cuanto al uso del material que la haga incompatible con el proyecto, permitiendo así dimensionar la estructura de acuerdo con los criterios habituales de las pasarelas peatonales ejecutadas en España.

Para la caracterización del material debe tenerse en cuenta que la composición del mismo hace variar la respuesta frente a sollicitaciones del material en relación con el hormigón convencional. Así, tendremos:

- Resistencias a compresión entre 100 y 150 MPa, estando estos valores vinculados al contenido en fibras y a las condiciones de curado
La rama elástica a compresión se mantiene hasta un nivel del 70-80% de la carga máxima [Spasojevic, 2006], definiendo un diagrama a compresión típico del HMAR, con una variación tangible de la ductilidad en función de la cantidad de fibras presentes [Fehling 2004].

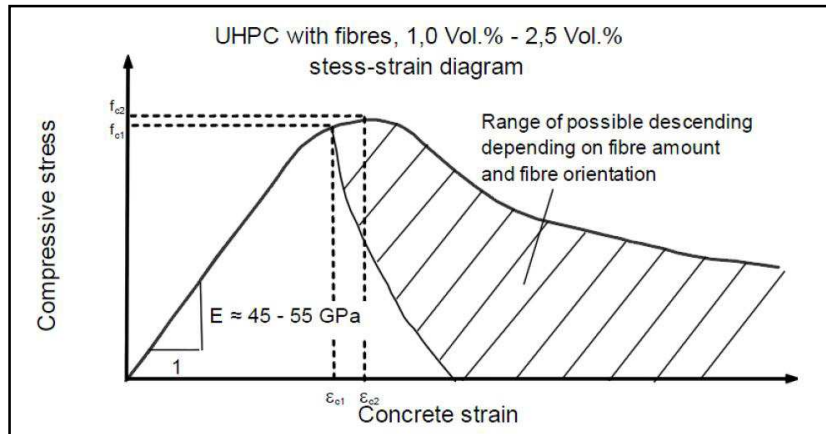


Figura 13. Curva constitutiva a compresión el UHPC con diferentes % de fibras

De acuerdo con las recomendaciones, los parámetros para formar la ecuación constitutiva de esta rama adoptados se corresponden con una deformación máxima del 3.5 por mil y la adopción de una rama elástica hasta el 85% de la resistencia máxima a compresión, con $E_{28\text{días}} = 44000 \text{ MPa}$ y $E_{7\text{días}} = 4000 \text{ MPa}$, a la que seguirá una rama perfectamente plástica.

- La Resistencia a tracción, determinada mediante un ensayo de tracción directa con un contenido de fibras de un 2%, alcanza valores entre 10-12MPa. El comportamiento constitutivo típico observado en el ensayo a tracción directa del HMAR permite distinguir 3 fases (Figura 14) claramente diferenciadas como son: una rama elástica, una rama de endurecimiento y una rama de ablandamiento tras la rotura.

Serán los valores obtenidos en ensayos previos de la dosificación los que permitan confirmar la ecuación constitutiva del material que complete la rama definida anteriormente. En la determinación de estos parámetros afectan tanto la cantidad de fibras, como su esbeltez y su tipología (Figura 15).

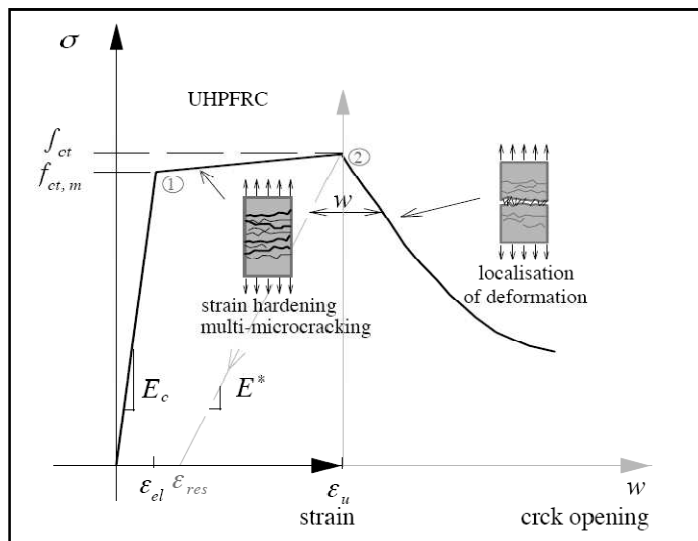


Figura 14. Comportamiento a tracción directa del UHPFRC [Spasojevic 2006]

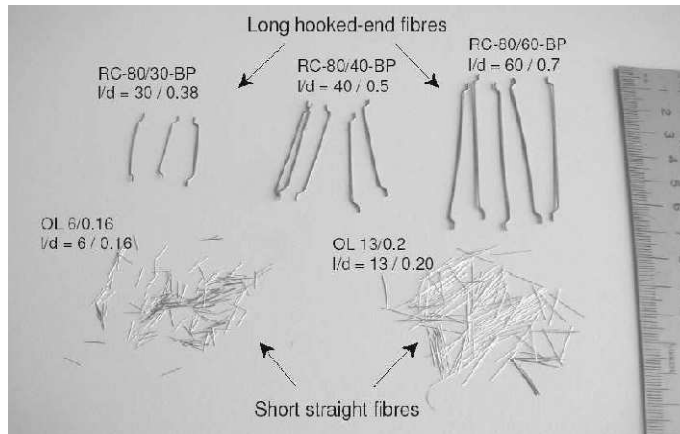


Figura 15. Tipos de fibras empleados en el HMAR. [Markovic 2006]

- El comportamiento a flexión del HMAR, comprobado mediante un ensayo a flexión a 3 ó 4 puntos, permite distinguir 3 zonas caracterizadas por su estado de fisuración, en relación a las diferentes ramas de la zona traccionada, y por la ley de tensiones existente en la sección más desfavorable (Figura 14).

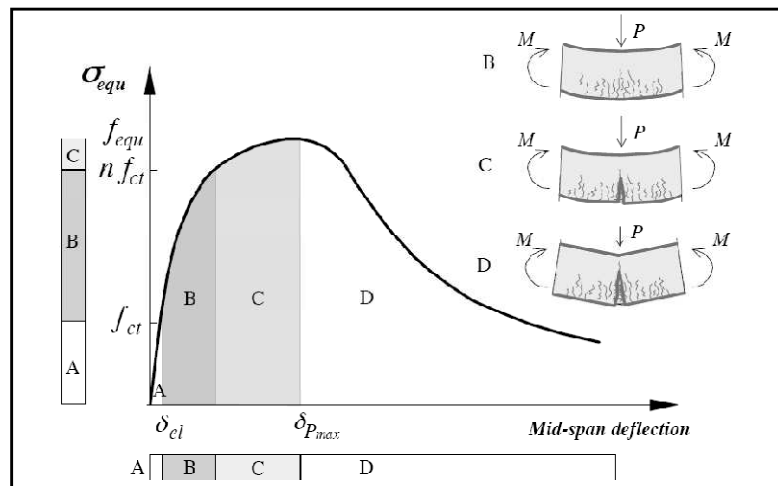


Figura 16. Curva tensión equivalente-flecha ensayo a flexión [Spasojevic 2006]

Cabe destacar que puesto que el proceso responde en gran medida a la respuesta a tracción de la zona traccionada del material, los parámetros se definen la gráfica son muy sensibles tanto la cantidad de fibras, como su esbeltez y su tipología.

De este modo se ha confirmado que, en general, las denominadas fibras cortas actúan en la región “B”, mientras que las fibras largas tienen un comportamiento más activo en las regiones “C” y “D”. La fibra fina ofrece una mayor capacidad del elemento a costa de una menor ductilidad; por su parte, una combinación de fibras cortas y largas ofrece una capacidad resistente similar pero con una mayor ductilidad y con un menor coeficiente de variación [Gröger 2012].

Esto hace que el hormigón híbrido sea quizás la opción más adecuada para muchos casos en la práctica ingenieril ya que posee un mayor control del proceso de fisuración y una mayor ductilidad, sobre todo en elementos que carecen de refuerzo. Sin embargo, su principal inconveniente es mantener la

trabajabilidad del hormigón a la vez que se evita la segregación de las fibras largas.

De este modo, las recomendaciones permitían una caracterización completa del material, contando de este modo con las ecuaciones constitutivas necesarias para el cálculo seccional, en base a la resistencia a compresión definida para el material y la cantidad y tipo de fibras empleadas. Para el proyecto estos valores fueron:

Parámetros elásticos	
E_{c28}	44000 MPa
E_{c7}	40000 MPa
ν	0.2

Tabla 4. Parámetros elásticos del HMAR

	7 d	28 d	Ud.
f_{ck}	110	150	MPa
ϵ_{ck}	0.0035	0.0035	-
ϵ_{celk}	0.00234	0.0029	-
f_{tk}	7.5	10	MPa
ϵ_{tk}	0.0001111	0.0001111	-
f_{tek}	8	11	MPa
ϵ_{tek}	-	-	-
f_{tuk}	0	0	MPa
ϵ_u	-	-	-

Tabla 5. Parámetros mecánicos del HMAR

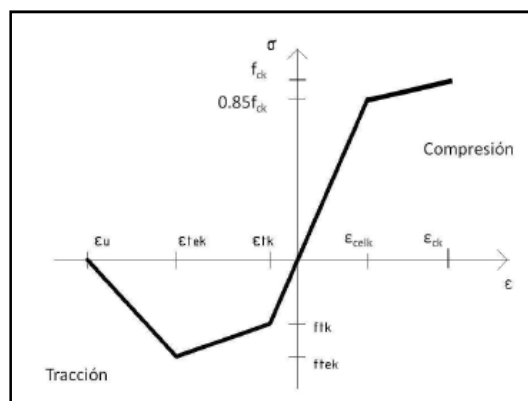


Figura 17. Curva constitutiva característica del HMAR

Todos estos valores resultaron necesarios para el cálculo de la estructura y se determinaron en los ensayos previos de la dosificación realizados en los laboratorios del ICITECH. Este volumen de información respecto al material empleado en el cálculo de la estructura supone que, a diferencia del hormigón convencional, el control del material no deberá limitarse a ensayos de resistencia a compresión, resultando necesario incorporar un procedimiento que permita su caracterización completa, garantizando de este modo que los valores empleados en el cálculo se mantienen en la pieza realmente ejecutada. Este tema se desarrollará en el apartado de control de calidad.

Un hecho que avaló la necesidad de contar con datos relativos a los diferentes modos de trabajo del material se comprobó al trasladar las dosificaciones del laboratorio a la amasadora de la planta.

La modificación de los medios de fabricación supuso una modificación en las propiedades del material que requirieron de ajustes sobre la dosificación inicial para obtener las características equivalentes a las obtenidas en laboratorio, descritos con detalle en los apartados relativos a la dosificación y fabricación del material y puesta en obra del mismo.

Estos problemas se detectaron durante la ejecución del modelo reducido que se describe en la sección III del presente apartado, confirmando la necesidad de realizar ensayos previos del material con las condiciones reales de ejecución para validar las dosificaciones propuestas y los datos empleados en el diseño.

Como se puede comprobar en los resultados del control de calidad de las amasadas de la pasarela, apartado 5.e.II, las dosificaciones finalmente empleadas en la planta de prefabricados no alcanzaron la resistencia característica a compresión obtenidos en laboratorio para la dosificación (150 MPa), definiendo los resultados de ensayos una resistencia característica a compresión de 135 MPa.

Sin embargo, los resultados a flexotracción obtenidos con el material en planta, permitían validar los valores de resistencia y deformaciones a tracción, lo que confirmaba que no existía una relación directa entre estos valores, avalando la necesidad de plantear un control de calidad que abarcase todos estos valores.

Se comprobó que con esta modificación del comportamiento a compresión no se producía un perjuicio significativo, puesto que los coeficientes de seguridad de los elementos en los que la compresión era el esfuerzo predominante tenían un resguardo suficiente para asumir esta merma de resistencia manteniendo los criterios de seguridad requeridos.

De este modo, se propuso como definitiva esta dosificación, modificando los valores de las ecuaciones constitutivas en la comprobación definitiva en la modelización que se describe en la sección II del presente apartado.

II. CRITERIOS DE CÁLCULO

Para la determinar los esfuerzos de la estructura en base a las bases de cálculo de la IAP-11 se implementó un modelo de elementos finitos en el SAP2000. Se emplearon elementos tipo placa (Shell) para la zona de apoyos y la parte superior del tablero, mientras que para el resto de la estructura se consideró suficiente aproximación el empleo de elementos tipo barra (Frame), subdividiendo estas en un número suficiente de elementos para captar los efectos P- Δ de la estructura.

Con la finalidad de garantizar la representatividad del modelo, dada la singular estructura en celosía a modelizar, en el modelo se han considerado como nudos rígidos de dimensión finita los encuentros de diagonales y cordones superior e inferior.

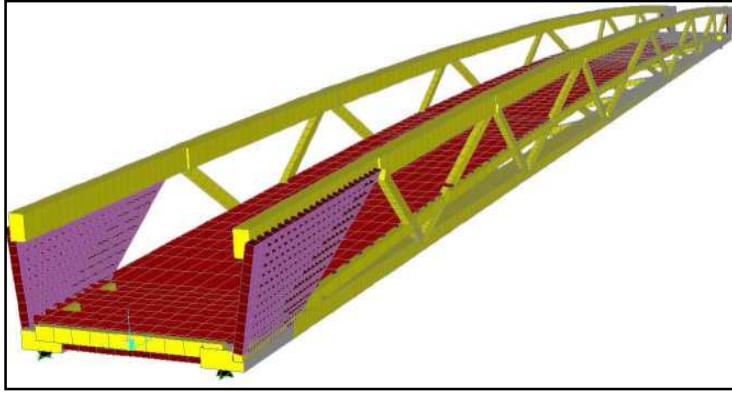


Figura 18. Modelo de elementos finitos de la pasarela

Se realizó un primer estudio elástico lineal de la estructura principal que forma la viga, de manera que se obtuviesen los esfuerzos en las secciones más desfavorables, realizando una comprobación seccional mediante las ecuaciones constitutivas definidas anteriormente, con la finalidad de comprobar la rigidez del elemento para el estado tensional y de deformaciones definido.

Sobre los resultados del análisis de este primer modelo se plantearon las revisiones necesarias para el análisis no lineal de respuesta de la estructura.

El desarrollo completo de estos cálculos se encuentra en el correspondiente Proyecto Modificado [11], de entre los que podemos extraer conclusiones significativas:

- Al trabajar con HMAR es necesario tener en cuenta que no se trata de un material estrictamente homogéneo, puesto que gran parte de sus propiedades dependen de unas fibras cuya distribución en la masa tampoco lo es, ya que se ve afectada en cuanto a orientación y densidad por diferentes factores relacionados con la puesta en obra y los laterales del molde.
De este modo, la orientación de las fibras determinará las direcciones principales en cuanto a resistencia. Dado que esta orientación se corresponderá en general con la dirección de hormigonado, gracias a la autocompactabilidad del material, deberemos mantener íntimamente relacionados los valores incluidos en el cálculo de los elementos con la forma de hormigonado de los mismos.
Otro caso se produce con el denominado “efecto pared”, que fomenta la alineación de las fibras con la pared del molde al golpear estas con él durante el hormigonado, generando capas densas de fibras paralelas al plano del molde e incrementando notablemente la resistencia a tracción en esa capa en la dirección de hormigonado.
- Para el cálculo de las secciones se siguieron las Recomendaciones AFGC-SETRA francesas. Dado el carácter empírico de las mismas, su planteamiento a la hora de abordar estos cálculos viene íntimamente relacionado con los ensayos sobre el material, de manera que tiene en cuenta todos estos efectos mediante la incorporación de los “coeficientes k” de minimización de los valores de capacidades mecánicas del material en función de la relación de la resistencia esperada de la pieza real (teniendo en cuenta dirección de hormigonado, espesor, efecto pared,...) con la obtenida en probetas normalizadas del material.

Evidentemente, dicho valor requeriría tener la resistencia del material en probeta y la de un elemento real ejecutado, problema que las Recomendaciones resuelve incluyendo la necesidad de generar un modelo a escala suficiente que respete las condiciones de hormigonado de la pieza final.

En caso de no disponer de esta información, se emplearían factores de corrección $1/k$, con K entre 1.35 y 1.75.

A juicio del equipo de trabajo, estas consideraciones deberían ser revisadas, puesto que este procedimiento obligaría a adoptar una reducción de las prestaciones del HMAR entre estos valores, o de lo contrario a ejecutar previamente a cada diseño un modelo reducido, lo que supondría en ambos casos eliminar la competitividad del coste final del material.

Considerando la experiencia adquirida previamente y durante el proceso, tanto en esta pasarela como en las que se están diseñando en la actualidad se ha recurrido a las referencias de datos de las innumerables probetas ensayadas por el equipo para adoptar unos valores del coeficiente k adaptados a cada elemento y su procedimiento de hormigonado.

Del mismo modo, un ejemplo de la insuficiencia del criterio lo encontramos al no incorporar coeficientes incluso más restrictivos en casos como las juntas frías generadas en el encuentro de dos frentes de hormigonado, en las que la generación de una capa superficial poco permeable en el HMAR genera secciones de debilidad por la dificultad de garantizar el cosido de las fibras (Figura 19).

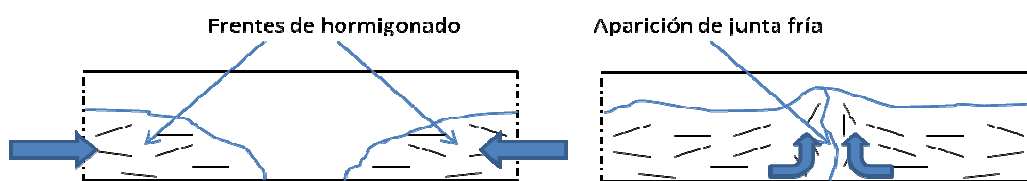


Figura 19. Efecto de las fibras en juntas de hormigonado

- En lo referente a las comprobaciones resistentes y de servicio de la estructura, es necesario tener en cuenta, como así se hizo para esta pasarela, que para los elementos de HMAR en general el proceso de obtener secciones muy esbeltas trae consigo otro tipo de problemas relacionados con efectos que habitualmente resultan triviales en las estructuras de hormigón, pero que no lo son en las estructuras de acero, al igual que deben contemplarse en las estructuras de HMAR.

Así, trabajamos con un material que permite una importante reducción de las secciones, y por tanto del peso de la estructura, lo que conlleva la necesidad de tener en cuenta en el cálculo fenómenos como vibraciones (frecuencias fundamentales bajas debido al escaso peso propio), fatiga (haciendo necesaria comprobaciones de estados tensionales en servicio) o pandeo (obligando a realizar un análisis de segundo orden con comprobación de deformaciones)

Uno de los ejemplos de este problema se presentó en la cabeza comprimida de la celosía, en la que la escasa rigidez lateral, debido a la esbeltez de las diagonales que lo arriostraban en ese sentido, obligo a realizar un análisis de segundo orden con la finalidad de comprobar deformaciones y tenerlas en

cuenta en el dimensionamiento del elemento, derivando los resultados en el armado de parte de las diagonales, con el objetivo de aumentar la rigidez de las mismas y por tanto el arriostramiento lateral, para poder mantener unas dimensiones razonables de pieza en cabeza.

Las losas del pavimento, simplemente apoyadas en las riostras colocadas con una cadencia de aproximadamente 1.60 m, se dimensionaron y comprobaron mediante un modelo de viga continua, en el que se tuvo empleó la ecuación constitutiva del material con un coeficiente $k=1$ debido a que la forma de hormigonado y el espesor de la misma eran equivalentes, o incluso más favorables en cuanto a espesor, a las de la probeta de ensayo.

PROBLEMÁTICA: El HMAR presenta un comportamiento heterogéneo ante los esfuerzos en diferentes direcciones, debido a que la respuesta estructural depende en gran medida de la orientación de las fibras. Esto debe tenerse en cuenta a la hora de realizar el diseño, que deberá contemplar el proceso de hormigonado a la hora de definir las direcciones principales.

RESOLUCIÓN: La propuesta de las Recomendaciones francesas supone incorporar un coeficiente reductor para la rama de tracción de su ecuación constitutiva, en función del tipo de elemento y forma de hormigonado. Este valor se obtiene después de caracterizar el material mediante un modelo a escala que permita evaluar la correspondencia entre los valores alcanzados por la probeta y los de un testigo, o equivalente, extraído del elemento real. En el caso de la pasarela se ejecutaron ensayos sobre elementos equivalentes a los que componen la estructura para la determinación de los coeficientes “k”, cuya validez se comprobó mediante la respuesta de un modelo reducido que permitiría además definir las condiciones de puesta en obra de cada uno de los elementos.

COMENTARIOS: El procedimiento seguido, de acuerdo con las Recomendaciones francesas, permite cuantificar el efecto de la orientación de las fibras de un modo sencillo y claro, pero poco económico. Como propuesta de futuro no parece competitivo requerir de un modelo a escala suficiente para validar cada elemento diseñado, resultando necesario abordar líneas de investigación que aporten criterios cualitativos y cuantitativos para la definición de estos coeficientes en función únicamente de la propuesta de diseño y los resultados de ensayos convencionales.

Por otro lado, los valores incorporados por las Recomendaciones en caso de ausencia de modelos, pueden resultar excesivamente conservadores (valores de minoración entre 1/1.35 y 1/1.75) o llegar a quedar del lado de la inseguridad como en el caso de las juntas de hormigonado, requiriendo un estudio detallado y conocimientos suficientes del material para su correcta aplicación.

III. [MODELO REDUCIDO](#)

Aun manteniendo las discrepancias respecto a la filosofía descrita en el apartado 5.b.III con respecto al empleo de los coeficientes k, se consideró necesario mantener las indicaciones de las Recomendaciones francesas referidas a materializar un modelo

reducido para validar resultados, en primer lugar por el compromiso de regir el diseño por instrucciones reconocidas a nivel internacional y en segundo lugar porque la singularidad geométrica de la estructura así lo aconsejaba.

El modelo incorporaba no sólo los condicionantes de hormigonado de los diferentes elementos que formaban la estructura, sino que se debía ejecutar siguiendo el procedimiento constructivo previsto para la pasarela, según se describe en el apartado 5.d, de manera que validase al mismo y aportase los datos necesarios para comprobar las secciones críticas derivadas de la prefabricación en fases.

Como se verá en la descripción de las fases constructivas de la pasarela, las celosías que forman los laterales deberán hormigonarse sobre una bancada horizontal, elevándose y transportándose hasta su posición definitiva. Posteriormente se completará la sección.

Esto supone someter a una estructura en celosía los esfuerzos producidos por el desmoldeo de la pieza, ortogonales al plano de trabajo para el que se configuraba. Añadiendo además la componente temporal, puesto que el proceso de prefabricación requería un desmoldeo a edades tempranas, no habiendo alcanzado el material los valores resistentes de cálculo.

El modelo ejecutado debía garantizar pues, que el procedimiento previsto para la ejecución de la pasarela no afectaba a los elementos fabricados por separado.

Para garantizar el comportamiento conjunto de los diferentes elementos ensamblados en la sección definitiva, resultaba necesario comprobar que el comportamiento frente a esfuerzos de rasante en las juntas frías originadas entre fases de hormigonado, respondía a lo previsto en el diseño, de manera que la unión mediante armado pasivo cosiendo esta junta resistiese de acuerdo con los valores introducidos en la modelización sin introducir desplazamientos entre los elementos incompatibles con las hipótesis de deformación plana definidas para el comportamiento de la sección completa.

Se ejecutó, extrajo del molde y transportó un modelo reducido de celosía que constituyó en sí mismo un trabajo de investigación al que el presente documento pretende dar continuidad [López 2012], validando con ello el planteamiento previsto para la prefabricación de la pasarela.

Los resultados del ensayos permitieron a su vez:

- ✓ Garantizar la correcta distribución de fibras emulando los procedimientos de hormigonado que se emplearían posteriormente en la ejecución de la pasarela
- ✓ Asegurar el comportamiento de las diagonales traccionadas
- ✓ Comprobar el correcto funcionamiento de la transmisión de esfuerzos en los nudos
- ✓ Comprobar el rasante producido en la junta de hormigonado del cordón inferior, ejecutado en dos fases distintas, a la hora de transferir el pretensado incluido en una de las fases a la sección completa.
- ✓ Verificar la capacidad de las diagonales comprimidas



Figura 20. Modelo reducido de celosía de HMAR en laboratorio



Figura 21. Secciones y rotura del modelo reducido de celosía de HMAR

c. Dosificación y fabricación del HMAR

Como se ha explicado, el proyecto parte de una dosificación del material controlada y contrastada, resultado del estudio de más de 100 dosificaciones [Camacho 2012] y seleccionada entre estas por aportar las propiedades idóneas para la estructura a proyectar.

Los materiales se dosificaron manualmente. Las arenas empleadas venían ensacadas y con una humedad garantizada del 0% por lo que no fueron necesarias correcciones de humedad. Los únicos elementos que se dosificaron de manera electrónica fueron el agua y el aditivo. Debido a que en el UHPC la cantidad de agua es muy pequeña y debe de estar totalmente controlada, se optó por dosificar de forma electrónica, aproximadamente el 90% del agua total y manualmente el resto, ya que en cada golpe de tecla podían introducirse de 2 a 3 litros de agua. A diferencia del agua, el aditivo se controlaba de manera muy precisa, por lo que se decidió dosificar de manera electrónica en su totalidad.

Uno de los resultados más destacables obtenidos en la ejecución del modelo reducido fue la posibilidad de contrastar la diferencia de resultados en el hormigón al cambiar del volumen y la amasadora de laboratorio al volumen y amasadora en planta, permitiendo corregir errores de planteamiento en cuanto a dosificación y fabricación en el caso real.

Estas comprobaciones hicieron aún más necesario un planteamiento que se había propuesto inicialmente para comprobar la funcionalidad, acabados y procedimiento constructivo de la sección de pasarela, mediante la ejecución de un tramo a escala 1:1 de la pasarela que permitiese descartar cualquier duda y confirmar la viabilidad del planteamiento constructivo. Si bien esta decisión podría parecer contraria a la filosofía de cumplir el condicionante económico, su materialización resultó clave en el necesario proceso de aprendizaje previo a la construcción de los elementos definitivos.

Un resumen del proceso de optimización de las dosificaciones puede verse en la Tabla 6, en la que se incluyen las dosificaciones finalmente empleadas en planta en las diferentes fases del proyecto, como resultado de las modificaciones necesarias para obtener las características del HMAR necesarias para el proyecto.

Código	VOLUMEN	CEMENTO	HDS	HARINA CUARZO	ARENA GRUESA	ARENA FINA	FIBRA CORTA	FIBRA LARGA	Agua añadida + Agua aditivo Se supone humedad 0%	20HE	a/b	OTROS
HMAR VERDE dosificación laboratorio	1000	1000	150	-	700	300	78	78	201.25	34.5	0.175	VERDE: 23
HMAR VERDE prueba pasarela	1000	1000	150	-	600	400	78	78	201.25	34.5	0.175	VERDE: 23
HMAR VERDE prueba pasarela	1000	1000	150	-	500	500	78	78	201.25	34.5	0.175	VERDE: 23
HMAR VERDE pasarela	1000	1000	150	-	500	500	78	78	184	34.5	0.16	VERDE: 23
HMAR VERDE pasarela cambio orden mat.	1000	1000	150	-	500	500	78	78	184	30.4	0.16	VERDE: 23
Código	VOLUMEN	CEMENTO	FCC	HARINA CUARZO	AG	AF	FIBRA CORTA	FIBRA LARGA	Agua añadida + Agua aditivo Se supone humedad 0%	20HE	a/b	OTROS
HMAR OCRE dosificación laboratorio	1000	800	120	160	734.3	314.1	78	78	204.4	32,4 (3%)	0.185	ROJO: 3.2 AMARILLO: 21.6 COMO BINDER
HMAR OCRE prueba prevalesa	1000	800	120	160	524.2	524.2	78	78	204.4	28.51 (2.64%)	0.185	ROJO: 3.2 AMARILLO: 21.6 COMO BINDER
HMAR OCRE pasarela	1000	800	120	160	682	367	78	78	204.4	28.51 (2.64%)	0.185	ROJO: 3.2 AMARILLO: 21.6 COMO BINDER

Tabla 6. Resumen de dosificaciones empleadas

Se resumen a continuación los aspectos más relevantes del proceso de control y mejora en los procedimientos de fabricación y en las dosificaciones empleadas.

I. EFECTOS SECUNDARIOS DE ADITIVOS Y ADICIONES

Como hemos comentado anteriormente, una de las claves del éxito del material reside en el uso de materiales singulares que dotan al conjunto de propiedades particulares como la condición de autocompactante (superplastificante de tercera generación), o la compacidad y alta resistencia (Humo de sílice o Residuo de Craqueo Catalítico Fluidizado)

La experiencia con estos materiales venía contrastada por la diversidad de dosificaciones controladas por el grupo de trabajo del ICITECH que participaba en el proyecto. No obstante su aplicación en la fabricación en planta aportó información de utilidad para mejorar su rendimiento, e incluso propició en algunos casos modificaciones de entidad en la dosificación o el proceso de fabricación.

Respecto al superplastificante empleado, SIKA 20-HE, destacar que, si bien permite obtener el hormigón deseado en cuanto a trabajabilidad (escurrimiento y tiempo

abierto) y compacidad (alcanza los valores de resistencia previstos a 7, 15 y 28 días), provoca un retraso en el inicio del fraguado y la adquisición de resistencias iniciales a 24 horas (50 MPa) respecto a otras soluciones comerciales como el GLENIUM.

Esto repercute en la planificación del hormigonado de piezas sucesivas, no permitiendo el desmoldeo rápido de las piezas, obligando a tiempos de espera de casi 48 horas para garantizar las propiedades que permitan desmoldeo y manipulación.

El Humo de Sílice (HDS) empleado en la pasarela es del tipo D, en lugar de recurrir a materiales de mejor calidad como el tipo U que permitirían un aumento de resistencia respecto a este, puesto que en las malas experiencias previas en cuanto a su empleo en amasadora convencional, formando terrones que difícilmente se deshacen, lo desaconsejaba.

La adición del Residuo de Craqueo Catalítico Fluidizado (FC3R), que junto con la adición de Harina de cuarzo serán necesarios como alternativa al HDS para conseguir el hormigón de tono ocre de las losas, así como cualquier tono claro en masa, dado su elevado índice de blancura.

La presencia de aluminatos cálcicos, responsables de la blancura del FC3R, provoca una grave disminución de fluidez, requiriendo una mayor energía de amasado y generando una costra superficial que dificulta la puesta en obra.

Esto repercute en el volumen que puede fabricarse de una sola vez en la amasadora, puesto que para movilizar un volumen del orden de 700-800 litros la amasadora de la planta de prefabricados empleaba la máxima potencia disponible. De este modo, deberemos tener en cuenta en las planificaciones que se hagan empleando este material, que el número de amasadas será el doble que empleando la adición de HDS.

Una de las ideas que la experiencia permitió descartar por equivocada, fue la de añadir el FC3R en la fase final de amasado, después del agua, con la finalidad de que pasase el menor tiempo posible hasta su puesta en obra y que el efecto de trabado no se sumase al de los propios componentes previamente mezclados.

Se descartó esta solución en la primera prueba, puesto que con la adición final del FC3R sobre la mezcla con agua se produjo un cambio radical en la fluidez de la mezcla, llegando a romper una de las palas de la amasadora.

Una vez descartada esta opción, se ajustó el momento de aplicación, hasta definir un criterio por el cual añadiendo el FC3R al principio, junto con las arenas, y dosificando el agua en dos veces, dejando los 5 litros para añadir en el momento que el watímetro de la amasadora empieza a marcar un aumento de la energía necesaria, reducimos considerablemente el consumo energético total del amasado.

Pese a esta modificación, en las primeras pruebas de puesta en obra de losas se comprobó que con la trabajabilidad de la mezcla y la formación de costra resultaba prácticamente imposible hacer fluir el hormigón en el escaso espesor disponible, al tiempo que se generaban juntas frías en todas aquellas zonas en las que se debía completar la altura de sección en una segunda pasada de hormigón.

La opción de aumentar la cantidad de agua en espera de mantener las prestaciones quedó descartada con las primeras experiencias, puesto que las dosificaciones con FC3R presentan una gran tendencia a la segregación, resultando conveniente quedar en seco para evitar este proceso irreversible. En la práctica este problema quedaba resuelto mediante el control de esos últimos 5 litros de agua, quedando a expensas del criterio del técnico responsable del hormigonado su adición completa.

Finalmente se optó por la corrección en la proporción de arenas para estos elementos, como se comenta más adelante, que añadida a estas correcciones permitió obtener un HMAR de color ocre viable para la prefabricación.

PROBLEMÁTICA: Las dosificaciones previstas partían de un proceso de optimización en laboratorio, en pro de alcanzar unos objetivos relacionados con la trabajabilidad y las características mecánicas. Los volúmenes fabricados y los requisitos de tiempos en la realización de ensayos no se corresponden con la realidad de un proceso de prefabricación, comprobando que al fabricar un mayor volumen de material, efectos inapreciables de los aditivos en laboratorio, se amplificaban hasta suponer un problema en la planta de prefabricados.

RESOLUCIÓN: Los efectos en la trabajabilidad de la adición del FC3R con los volúmenes de planta hicieron necesario reconsiderar el volumen total por amasada y estudiar el momento óptimo para su adición.

El Humo de sílice y el superplastificante empleados permitían obtener los resultados esperados en laboratorio, manteniendo su comportamiento en planta, por lo que no se introdujeron modificaciones. No obstante, en ambos casos la mejora en trabajabilidad obtenida repercutía en una reducción de resistencias iniciales, que en un proceso de prefabricación acabaron resultando un inconveniente al requerir una variación en la planificación de ciertos elementos.

COMENTARIOS: Queda patente que para fabricar elementos con HMAR es necesario adaptar la dosificación, no sólo a cada tipología de elemento, sino a los requisitos de fabricación del mismo, si se pretende conseguir un material competitivo.

II. MODIFICACIONES EN LA PROPORCIÓN DE ARENA GRUESA–ARENA FINA

Manteniendo la dosificación obtenida de los ensayos en laboratorio, Nivel alto Tabla 1 con relación 70-30% de arena gruesa (0.8-2mm) arena fina (0-0.8mm), se obtuvo un hormigón algo menos homogéneo y con una ligera tendencia a la segregación. Este proceso pudo deberse a una menor capacidad para controlar el vertido de los componentes o a la menor energía de la mezcladora por kilo de hormigón.

Por ello, se decidió revisar la dosificación en las siguientes amasadas, optando por cambiar la relación de arena fina/arena gruesa, manteniendo igual la cantidad total de arena por metro cúbico. Así, en la siguiente amasada se pasó a una relación arena gruesa-arena fina de 60-40%, corrigiéndose nuevamente hasta la relación 50-50% con la que se ejecutó la pasarela. Con ello se consiguió una mejor homogeneidad del HMAR, controlar la segregación y garantizar la trabajabilidad necesaria.

Con esta relación de arenas se obtuvo un HMAR coloreado de verde en masa con las condiciones requeridas para la puesta en obra de los diferentes elementos, confirmando la tendencia de que una mayor proporción de arena fina garantiza una mejor distribución de arenas y fibras en el avance del material por el molde.

Es importante tener en cuenta que esta tendencia resulta válida para la dosificación del HMAR verde, puesto que el HMAR ocre, que contaba con adición de FC3R en lugar de HDS, mostro una tendencia contraria, comprobándose que para resolver los enormes problemas de trabajabilidad del HMAR ocre de las losas, se optó una proporción final de 65% arena gruesa y 35% arena fina, resultando clave para el éxito en la ejecución de las piezas.

III. IMPORTANCIA DEL AGUA

Como en cualquier hormigón, una correcta dosificación del agua resulta fundamental para obtener el resultado deseado, pero en el caso del HMAR esta afirmación se lleva al extremo, hasta el punto que no sólo es necesario controlar de forma intensiva la cantidad de agua total introducida en la mezcla, sino el momento y forma de hacerlo.

Estas consideraciones se amplifican aún más en el caso de fabricación en una amasadora de planta de prefabricados, en la que se comprobaron las siguientes particularidades:

- El HMAR, y especialmente el que incluye adición de FC3R, es extremadamente sensible a la variación de agua en su dosificación, habiéndose comprobado que una variación de la relación agua/binder de 0.005 (es decir 5 litro de diferencia) modifica sustancialmente el resultado.
- La cantidad de agua no controlada que puede almacenar una amasadora de planta por lavado o variaciones en la humedad ambiental, así como la variación de la humedad de los áridos, pueden suponer volúmenes incluso superiores a los definidos como umbral de sensibilidad (5-10 litros), de manera que junto con un control intenso de los materiales, medios y condiciones ambientales, se deberá implementar un sistema que permita un control de la mezcla independiente de estos factores.

La solución empleada en este caso fue dosificar a mano los últimos litros de agua, controlando mediante la inspección visual de un técnico (experiencia) y los datos del watímetro la necesidad real de agua en la amasada.

PROBLEMÁTICA: La dosificación del HMAR exige un control exhaustivo del agua realmente introducida en la mezcla, puesto que variaciones superiores a 5 litros pueden influir en las resistencias obtenidas e incluso producir la segregación del material.

RESOLUCIÓN: El escaso margen de variación en la cantidad de agua no permitía el uso exclusivo de los medios disponibles para su dosificación, puesto que el orden de magnitud del error era equivalente al margen. A este problema se añadía que la

variación en las condiciones ambientales, tanto en días sucesivos como a lo largo de un mismo día, o las condiciones de uso previo de la amasadora, podía suponer variaciones de humedad en la mezcla superiores al margen.

Para resolverlo se optó por dosificar el 10% de agua a mano, de manera que tan sólo se añadiese la cantidad necesaria tomando como referencia dos factores: Inspección visual del técnico responsable con experiencia, datos de la potencia demandada por el amasado en esa fase final (watímetro).

COMENTARIOS: Pese a la avanzada tecnología que implica la consecución de este material, por el momento en el caso del agua se requerirá siempre de la experiencia humana a la hora de garantizar resultados. El empleo exclusivo del watímetro, que se comprobó como instrumento de gran ayuda, no parece una solución, puesto que puede conducir a interpretaciones erróneas, resultando clave la experiencia en el material del responsable del hormigonado para tomar estas decisiones.

IV. ORDEN Y CONDICIONES DE VERTIDO DE LOS MATERIALES

Otro aspecto aprendido al trasladar la dosificación de laboratorio a la amasadora de la planta de prefabricados fue la importancia del orden en el que se echaban los materiales y las necesidades específicas para el vertido y amasado de algunos de ellos. Siendo necesario modificar el orden previsto inicialmente para esta amasadora, tras comprobar el resultado de las primeras amasadas de prueba.

Como se ha explicado antes, en las primeras amasadas en planta se comprobó la necesidad de introducir el agua en fases, de manera que se reservase un 10% de agua para añadirlo en la fase final de amasado en función de la necesidad. Sin embargo en la práctica evidenció la necesidad de introducir una parte del agua al inicio, previamente al vertido de los materiales, puesto que la finura de los mismos provocaba pérdidas de material en algunas de las juntas de la amasadora.

Esto podría haberse resuelto con el uso de una amasadora estanca, pero con las posibilidades de la existente, el aporte de humedad permitía un sellado de esas juntas con la propia mezcla de finos y agua. Este proceso resultaba muy significativo en los primeros hormigonados, y no tanto en los siguientes, puesto que los propios restos sellaban las juntas.

Otra variación en el orden previsto vino referida a la introducción de las fibras, resultando necesario trasladar al final del proceso su adición, de manera que entrasen en contacto con una mezcla húmeda y fluidificada por el aditivo, puesto que de otro modo la energía transmitida a los materiales sueltos por una amasadora convencional no era suficiente para romper los “erizos” de fibras provocados por el apelmazamiento de elementos tan esbeltos.

Además de este procedimiento, que permitía evitar el apelmazamiento en la amasadora, resultaba necesario un proceso manual de disgregación del bloque de fibra fina previa introducción en la amasadora.



Figura 22. Adición de fibra fina en bloque y “erizos” aparecidos en la puesta en obra

Otro elemento que ya en laboratorio se introducía en fases era el aditivo, introduciendo un 50% en la amasadora y esperando a que se activase en la mezcla antes de introducir el 50% restante.

Evidentemente, los tiempos totales del proceso aumentan enormemente respecto al amasado habitual en planta de prefabricados (4 minutos), debidos a la introducción controlada y en diferentes fases de los componentes, a los que se añaden los tiempos de espera para garantizar las condiciones de la mezcla antes de la introducción del siguiente componente y principalmente al tiempo necesario para la adicional manual de las fibras al final del proceso, con la necesaria manipulación de las mismas.

Estos nuevos tiempos de amasado (40 minutos) supusieron un sobrecoste no contemplado para la empresa de prefabricados, y suponen uno de los aspectos a mejorar en futuras ejecuciones.

PROBLEMÁTICA: El uso de materiales de gran finura y la adición de fibra no habituales, de escasa longitud y gran esbeltez, no permitía emplear los sistemas habituales con una amasadora convencional.

RESOLUCIÓN: Para adaptar el proceso de amasado a la energía y capacidad de la amasadora de planta fue necesario modificar el orden y forma de introducir las fibras, incrementando con ello los tiempos de amasado y la mano de obra necesaria. Esto supuso sobrecostes a tener en cuenta para futuras aplicaciones.

COMENTARIOS: El hecho de estudiar coste para un único proyecto, no permitió asumir el gasto de equipos específicos para la adición de fibra que, aún siendo muy costosos, podrían llegar a ser amortizados en el momento que se establezca un uso continuado del material, provocando una enorme reducción de los costes de fabricación.

d. Procedimiento constructivo

Como se ha adelantado, pese a tener un planteamiento del procedimiento constructivo claro, se optó por realizar una primera prueba a escala 1:1 con una zona del molde que se empezaba a fabricar, con la finalidad de validar las formas de puesta en obra previstas, las operaciones intermedias con piezas y las sensaciones del resultado final.

Esta pieza sirvió además para ejecutar sobre ella todo tipo de pruebas respecto a acabados y rejuntado de elementos, permitiendo valorar soluciones sin actuar sobre la pieza definitiva.



Figuras 23 y 24. Vistas del tramo de muestra a escala 1:1

El sistema constructivo planeado, contemplaba que la totalidad de la pasarela fuese construida en fábrica para posteriormente ser transportada como elemento único y montada en su emplazamiento final. Sin embargo, la complejidad del diseño y la magnitud del elemento hacían imposible por motivos técnicos y económicos que la pasarela se pudiese fabricar en una sola pieza.

Por ello, se decidió fabricar la estructura primaria de la viga en 4 fases de hormigonado, incluyendo procedimientos intermedios de transporte de las diferentes partes ejecutadas por separado en taller y ensamblaje de las mismas en el molde completo, operaciones de tesado y transferencia,... Los esfuerzos derivados de ello se tuvieron en consideración a la hora de calcular los diferentes elementos que componen la pasarela

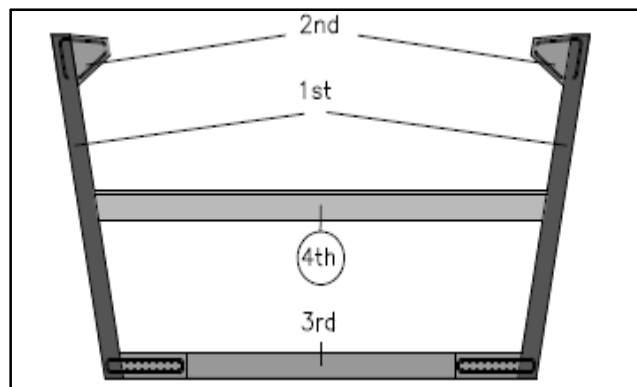


Figura 25. Esquema de fases para la prefabricación

Una vez finalizada la ejecución de la viga, se procedió al hormigonado de las losas de 3 cm de espesor que formarían el pavimento, para después montarlas y sellar las juntas entre ambos elementos.

I. FASE 1.- EJECUCIÓN DE CELOSÍAS LATERALES

Los primeros elementos en fabricarse fueron las diagonales laterales. Estos elementos se hormigonaron en posición horizontal, mediante el uso de un molde correspondiente con medio lateral de 22 m de largo, 0.12 m de canto y ancho variable siguiendo la parábola descrita por el cordón superior.

Dentro del encofrado, se disponen los elementos necesarios para crear la celosía propuesta además del nervio más exterior del tablero. En esta fase se coloca toda la armadura pasiva necesaria así como la armadura de conexión a rasante entre fases.

Este procedimiento permitió minimizar el coste de los moldes, requiriendo únicamente materializar el perímetro exterior de un cuarto de pasarela, y los aligeramientos correspondientes.

Esta decisión resultó clave a la hora de garantizar la viabilidad económica del proyecto, puesto que el coste de estos moldes suponía gran parte del coste de la operación y sus posibilidades de reutilización eran prácticamente nulas (una única pasarela singular). El motivo del elevado coste se basa en que moldes requeridos debían ser suficientemente estancos y rígidos para contener un material autocompactante, con gran presencia de finos en su composición, al tiempo que capaces de tener cierta movilidad para posibilitar el desmoldeo de la pieza



Figura 26. Fase 1: hormigonado laterales

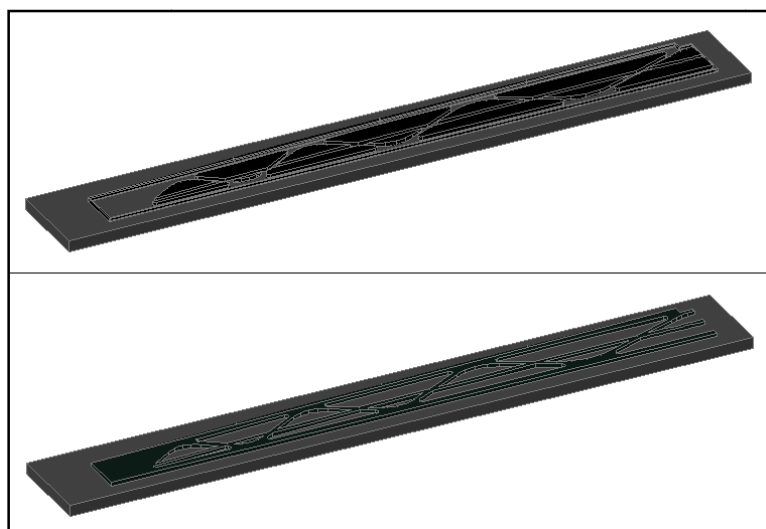


Figura 27. Idealización de molde y pieza hormigonada Fase 1



Figura 28. Molde hormigonado correspondiente a medio lateral

II. FASE 2.- EJECUCIÓN DEL CORDON SUPERIOR RESTANTE

Tras el hormigonado de la celosía lateral y manteniendo ésta en su posición horizontal, se hormigonan los cordones superiores con sus correspondientes aligeramientos en las regiones entre nudos.

Puesto que el cordón superior se utiliza de barandilla, se deberá garantizar un buen acabado superficial. Como se detallará en el apartado de ejecución, la geometría del molde, el escaso espacio para la entrada del hormigón y el armado necesario por rasante para garantizar que la sección completa absorbe los esfuerzos de tracción conllevaron severas dificultades, siendo necesarios reconsiderar este procedimiento para elementos con esta configuración en futuras actuaciones.

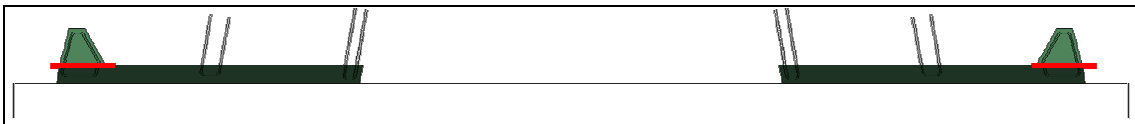


Figura 29. Fase 2: hormigonado cabeza de compresión

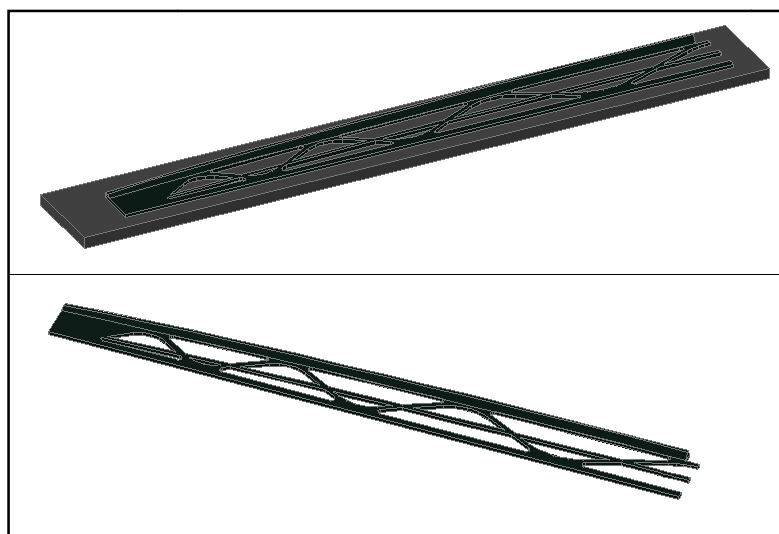


Figura 30. Idealización de Fase 2 en bancada y pieza resultante

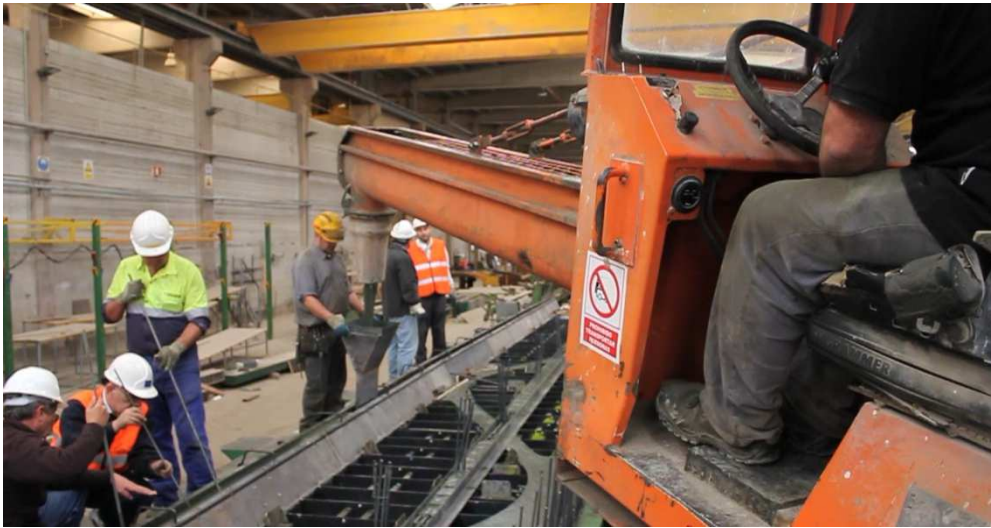


Figura 31. Hormigonado con embudo y speedy de la cabeza de compresión

III. TRANSPORTE DE LATERALES Y COLOCACIÓN EN MOLDE DE ARTESA

Al día siguiente al hormigonado, se desencofra y se colocan las celosías en su posición definitiva con una pendiente 1H:6V. Una vez en el sitio, se encofró y hormigonó el cajado de unión en el cordón superior, que permitía la colocación de barras soldadas para materializar el empalme entre piezas



Figura 32. Elevación laterales y colocación en molde artesa

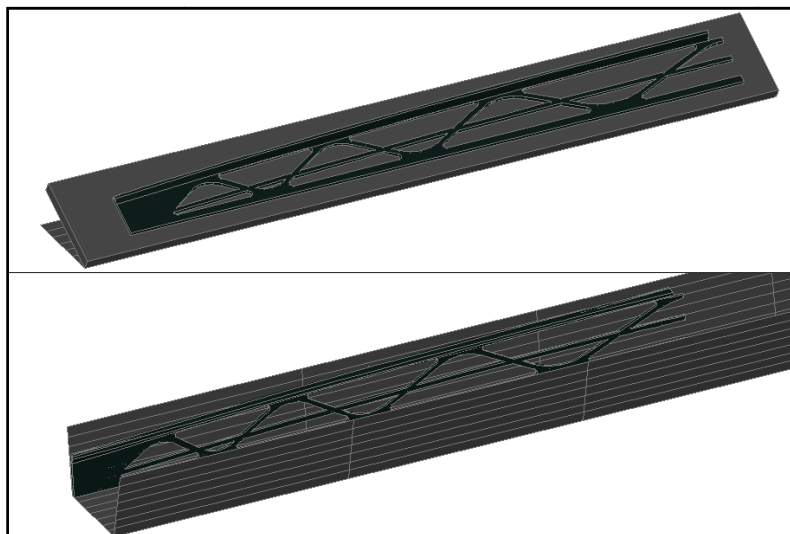


Figura 33. Idealización de bancada basculante y pieza en molde artesa



Figura 34. Elevación de medio lateral desde bancada basculante

IV. FASE 3.- HORMIGONADO DEL FONDO ALIGERADO

En la tercera fase, estando las celosías en su posición definitiva, se colocan los cables de pretensado en el cordón inferior, la armadura pasiva necesaria en las diagonales traccionadas de la base y por rasante, así como todos los elementos que han de servir de encofrado para el hormigonado del cordón y celosía inferior.

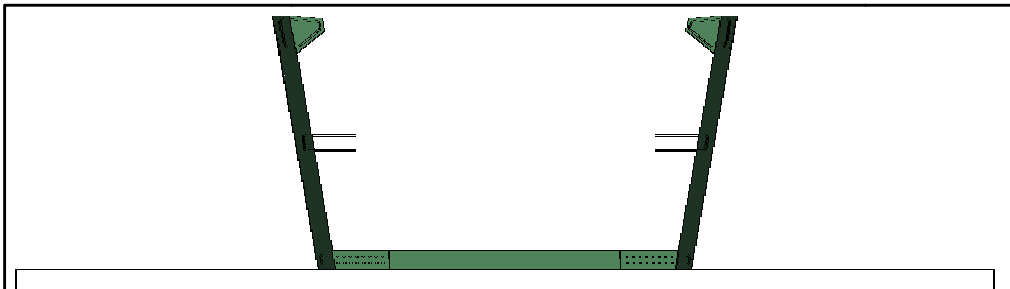


Figura 35. Fase 3: hormigonado de base (fondo)

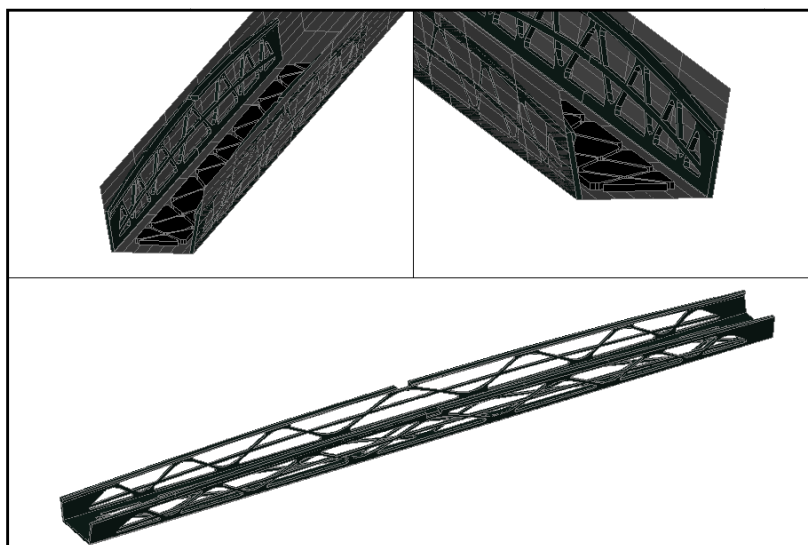


Figura 36. Idealización de molde celosía de fondo en artesa y pieza resultante



Figura 37. Preparación de armados en fondo (cercos de rasante)

V. FASE 4.- HORMIGONADO DE LAS RIOSTRAS

En esta última fase de la estructura principal, se encofran y hormigonan las diferentes riostras a lo largo de la estructura. En esta fase se colocan barras soldadas de unión y se hormigona cajón del cordón superior para formar una junta constructiva del mismo.

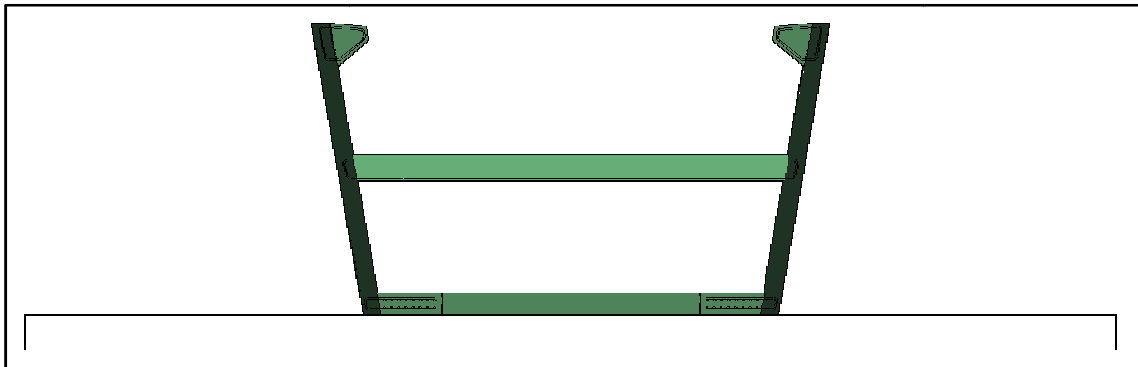


Figura 38. Fase 4: hormigonado de riostras apoyo de tablero



Figura 39. Aspecto de las riostras y cajado del cordón superior hormigonados

Una vez completada la estructura principal se procedió a la transferencia del pretensado, cortando los cables en extremos.

VI. EJECUCIÓN Y MONTAJE DE LAS LOSAS DE PAVIMENTO

Una vez ejecutada la estructura principal de la viga, se hormigonaron las losas de 3 cm de espesor que configurarían el pavimento. Para ello se empleo la dosificación del hormigón ocre, extendiéndose sobre un molde de goma para texturizar la superficie.

La clave para la correcta puesta en obra, aprendida en las pruebas iniciales, resultó una correcta velocidad y movimiento del speedy, de manera que serpenteando a lo largo de toda una dimensión, y con la velocidad adecuada, se asegurase que la cantidad vertida en la zona completaba el espesor total de la pieza. Con esto resultaba suficiente, puesto que el propio hormigón se nivelaba y no se producían problemas de juntas con la costra superficial del material al echarlo en una sola tongada.



Figura 40. Preparación de moldes para hormigonado de losas



Figura 41. Hormigonado de losa en zig-zag con speedy

Estas losas se levantaron y voltearon, para lo que fue necesario evaluar la resistencia a 18, 24 y 36 horas, de manera que con las propiedades del material a edad temprana y un sistema de elevación rígido, fuese posible compensar la succión del fondo de molde texturizado sin dañar la pieza.

Este problema resultó derivado en la rotura de la primera pieza, puesto que el molde de goma se había pegado a la bancada, de manera que la pieza tuvo que resistir una carga muy superior a la de su peso propio a las 24 horas.

Con el uso de un sistema de enganche adecuado, la colocación de gomas sueltas, de manera que se separasen de la losa una vez levantada, y tiempos de espera en torno a las 48 horas, el resto de piezas se desmoldaron y manipularon sin problema. Una alternativa a valorar para el desmoldeo rápido sería el curado al vapor, tanto en estas como en el resto de piezas, puesto que se ha demostrado una mejora de las propiedades en general y una aceleración del endurecimiento.

Finalmente se colocaron las losas en su posición definitiva apoyadas en las riostras, empleando un mortero con resina para garantizar el correcto apoyo que evite impactos y vibraciones propios de una unión seca. La holgura con elementos se selló con el mismo material.



Figura 42. Losas colocadas

e. Puesta en obra y control de calidad

Se ha descrito ya con suficiente claridad la importancia de los procedimientos de puesta en obra a la hora de determinar las propiedades resistentes de las secciones, dada la importancia de la orientación y densidad de las fibras en el seno del hormigón. Así pues, una parte importante a la hora de planificar la ejecución de estructuras con este material residirá en un planteamiento completo del proceso constructivo, que permita plantear en el propio diseño las formas de llenado en los moldes para cada tipo de elemento.

Se deberá procurar, dentro de la filosofía de control de calidad, que los operarios estén informados y que en todo momento haya una supervisión del proceso por parte de un técnico que conozca los planteamientos del diseño. De este modo, el hormigonado de cada pieza se realizó siguiendo las indicaciones del equipo técnico presente en todas las fases de hormigonado, decidiendo in situ zonas de hormigonado, direcciones, velocidad,...

Pese a que el material presenta unas buenas condiciones de puesta en obra, tras resolver los inconvenientes iniciales de algunas dosificaciones, el resultado de algunos procedimientos y decisiones debe ser tenido en cuenta para futuras aplicaciones.

En cuanto al control de calidad, el resultado final y los valores obtenidos en la prueba de carga permiten afirmar que el alcance y tipología de ensayos resulta suficiente para garantizar las exigencias del material, y que el estado de conocimiento del material está muy avanzado, permitiendo que las decisiones sobre componentes y procesos no derivasen en modificaciones de las propiedades necesarias del material.

I. CONDICIONANTES PARA EL HORMIGONADO

En el hormigonado de zonas con laterales de molde verticales y ancho suficiente para realizar un vertido correcto y permitir la salida del aire ocluido en la masa, el hormigonado se realizó sin problemas, permitiendo que el hormigón fluyese de la manera prevista en el diseño.

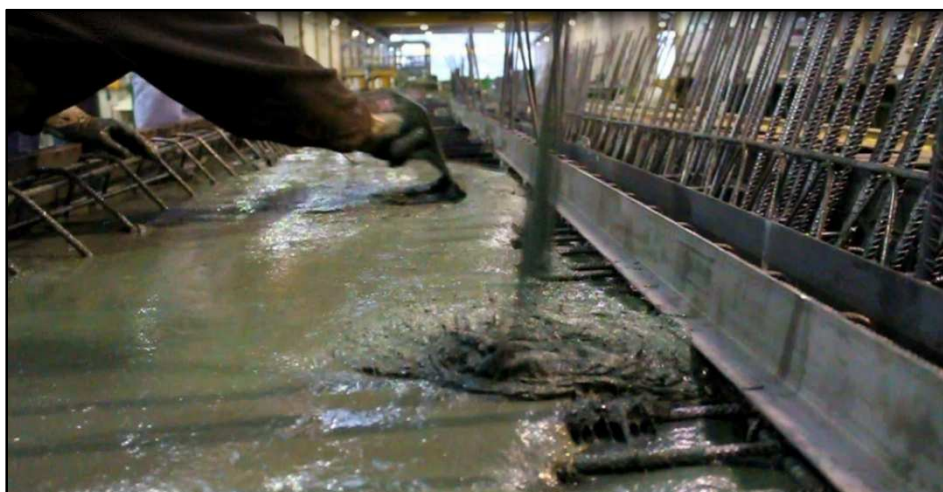


Figura 43. Hormigonado de laterales con HMAR verde

El principal problema a tener en cuenta en estos casos es la generación de esta costra superficial característica del material, que no permite completar secciones en una segunda pasada de hormigonado con garantías, por pronto que se haga. Para evitar algunos problemas de este tipo aparecidos en la fase de ejecución es necesaria una correcta programación de zonas y volumetrías, de manera que se consiga completar espesor en una tongada en todos los casos.

En la fase 2, con un ancho limitado para el hormigonado y presencia de armaduras, se detectaron la mayor parte de los problemas relacionados con la puesta en obra del material.

La propia geometría del molde, que se ensanchaba hacia la base limitando la salida del aire ocluido en la masa, no resultaba la más conveniente. El resultado obtenido pone de manifiesto que la condición de autocompactante del material no resulta suficiente para garantizar la salida del aire ocluido sin un aporte suficiente de energía,

ya sea por el propio peso del material, disponiendo de altura suficiente, o mediante medios auxiliares.

Se comprobó también que la fibra, y principalmente la larga, se queda enganchada entre las armaduras de manera que la pasta pasa y la fibra se queda (segregación por sistema de vertido).

Como solución a ambos problemas se acompañó la entrada del hormigón con un picado con barra que evitaba que las fibras quedasen enganchadas, al tiempo que daba alternativas de salida al aire ocluido y le aportaba energía.



Figura 44. Hormigonado con embudo: Picado con barra y fibra en armadura

Esta solución permitió paliar estos problemas, puesto que no se consiguió eliminar totalmente el aire apareciendo pequeñas coqueras sin excesiva relevancia, pero conllevó una problemática que no se advirtió al inicio de la fase de ejecución.

El picado con barra del hormigón provocó un efecto de alineación de las fibras que en ningún caso se había considerado en los cálculos. Dada la dirección del picado, las fibras quedaron parcialmente alineadas con la dirección transversal del tablero, y por tanto del elemento. Con esta configuración, su capacidad frente a esfuerzos normales varía significativamente, incrementando su resistencia a compresión, puesto que se cuenta con una mayor presencia de fibras para resolver las tracciones secundarias, pero mermando su resistencia a tracción, puesto que la presencia de fibras en esta dirección se ve reducida.

El cordón superior trabaja a compresión, por lo que no se consideró un problema en cuanto al comportamiento en servicio de la pasarela, sin embargo, en algunas zonas se detectaron fisuras de retracción en este elemento, puesto que se habían generado sección con una menor capacidad de control de estas tracciones longitudinales. Evidentemente estas fisuras quedaron selladas al entrar en carga el elemento, no

resultando un problema en sí mismas, más allá de permitir la detección de un error en el proceso de fabricación a evitar en futuras aplicaciones.

II. PLANIFICACIÓN Y RESULTADOS DEL CONTROL DE CALIDAD

Una primera fase del control de calidad residiría en la caracterización previa de la dosificación propuesta, dada la sensibilidad del material a diversos factores como el tipo de amasadora, condiciones de los materiales,... La cual debe hacerse en las condiciones de fabricación de la estructura proyectada para garantizar la validez de los resultados.

En el caso de la pasarela, tanto el modelo reducido como la prueba a escala 1:1 permitieron realizar una serie suficiente de hormigonados para validar las propiedades del material y los coeficientes k empleados en los cálculos. Para ellos fueron necesarios Ensayos de Esguerramiento, Ensayos de Resistencia a Compresión (con probetas cúbicas de 100 mm de arista adaptadas a la capacidad de la prensa disponible), Determinación del Módulo de Deformación con probetas cilíndricas 150x300 mm y Ensayos a flexión con probetas prismáticas 100x100x500 mm, que aportaban con la aplicación del análisis inverso (Método propio del ICITECH) obtener los valores a tracción.

Una vez definida la dosificación y comprobada su validez en planta, se planteó una campaña de ensayos consistente únicamente en la comprobación de los valores de compresión y flexión a diferentes edades, según las necesidades de cada caso, cuya metodología únicamente variaba respecto a la caracterización en la geometría de las probetas para control de las losas, en las que se realizaban probetas de 150x30x450, con la finalidad de que en todos los casos las probetas fuesen representativas de la geometría y forma de hormigonado de la pieza que representaban.

PROBLEMÁTICA: Las características mecánicas del HMAR, principalmente su resistencia a tracción, se encuentran íntimamente relacionadas con la orientación de las fibras, lo que a su vez depende del procedimiento de hormigonado y la geometría del elemento.

RESOLUCIÓN: Para garantizar que los valores de resistencia, deformación pico,... empleados en las ecuaciones constitutivas introducidas en el cálculo responden a la realidad se realizaron los ensayos previos y el modelo reducido. Sin embargo, dentro de un proceso de fabricación industrializado se hacía necesario proponer unos controles para las amasadas que resultasen suficientes sin desbordar la previsión de costes a tal efecto. Además estos controles no podían limitarse, como en el hormigón tradicional, únicamente a la compresión, si no que debían validar los resultados propuestos a tracción. Para ello se planificaron campañas de ensayos de compresión y flexotracción sobre cada amasada, confirmando los valores esperados, demostrando finalmente que resultaba un control suficiente a la luz de los datos obtenidos de la prueba de carga.

COMENTARIOS: Es fundamental tener en cuenta la necesidad de control de calidad en el HMAR, y en particular el hecho de necesitar de un control de resultados a

tracción que a demás marcará el proceso de hormigonado. de este modo, los costes derivados del control de calidad son muy superiores a los habituales, no solo por el número y tipología de ensayos, sino porque debe añadirse al de los ensayos el coste derivado del control del hormigonado.

CONTROL DE CALIDAD. PASARELA SOBRE EL BARRANCO DE LAS OVEJAS										
COMPRESIÓN										
Probetas cúbicas 100x100x100 mm										
Fecha	Fase	Amasada	Por amasada			Por Fase Constructiva				
			Resistencia		Media	Desv. Tip.	C.V (%)	Media	Desv. Tip.	C.V (%)
22/11/2012	Lateral 1	1	142.04	142.90	140.40	2.46	1.75	146.12	5.47	3.74
			137.75	138.90						
	Lateral 1	2	148.90	158.90	150.23	5.89	3.92			
			146.60	146.50						
Lateral 1	3	147.20	150.20	150.23	2.18	1.45				
		151.30	152.20							
Lateral 1	4	140.05	146.05	143.63	2.67	1.86				
		145.20	143.20							
27/11/2012	Lateral 2	1	141.60	144.30	143.49	1.27	0.89	146.56	3.20	2.18
			143.85	144.20						
	Lateral 2	2	146.91	145.50	146.80	1.94	1.32			
			145.30	149.50						
Lateral 2	3	151.26	151.37	150.32	1.73	1.15				
		148.32								
30/11/2012	Lateral 3	1	131.10	151.05	143.38	10.47	7.30	147.58	7.32	4.96
			153.05	138.30						
	Lateral 3	2	152.30	151.40	151.58	0.64	0.43			
			151.05							
Lateral 3	3	152.05	153.70	148.79	5.22	3.51				
		147.30	142.10							
05/12/2012	Lateral 4	1	145.90	153.45	147.46	9.13	6.19	146.23	6.90	4.72
			155.30	135.20						
	Lateral 4	2	147.60	148.80	146.63	5.75	3.92			
			151.70	138.40						
Lateral 4	3	138.05	142.25	144.59	7.25	5.02				
		143.10	154.95							
19/12/2012	Fondo 1	1	142.76	152.45	148.48	4.48	3.02	147.76	3.97	2.68
			151.62	147.10						
	Fondo 1	2	148.40	150.20	147.05	3.91	2.66			
			148.24	141.34						
21/12/2012	Fondo 2	1	156.45	150.62	148.67	6.16	4.14	147.75	6.04	4.09
			142.83	144.76						
	Fondo 2	2	154.59	139.36	146.84	6.70	4.56			
			149.75	143.64						
Resistencia Media			147							
Desviación Típica			5.56							
Coeficiente Variación (%)			3.79							
Resistencia Característica			138							
Módulo de Elasticidad (Gpa)			48							

Tabla 7. Control de calidad de la pasarela. Resultados de resistencia a compresión

Se comprobó también una correlación entre los resultados obtenidos con el hormigón fabricado en laboratorio, cuyos valores se introdujeron en el cálculo, y el obtenido en Prevalesa, tras las modificaciones descritas anteriormente para acoplar dosificación y fabricación a las nuevas condiciones de amasado.

Days	Laboratorio		PREVALESA	
	Res. comp. (MPa)	Desviación	Res. comp. (MPa)	Desviación

	Valor medio	estándar	Valor medio	estándar
1	79	3.3	71	9.3
2	103	2.9	100	2.2
7	128	2	122	3.4
28	150	5	150	2.7

Tabla 8. Resultados de compresión HMAR laboratorio (cálculos) y Prevalesa (ejecución)

Como ya se adelantó en el apartado 5.b, la resistencia característica obtenida para el HMAR fabricado en panta fue de 135MPa, valor empleado en la revisión de los cálculos iniciales, en los que se mantenían los resultados de la dosificación propuesta en laboratorio (50 MPa).

Resultados a flexión-tracción, con probetas prismáticas 100x100x500 mm, ensayo a 4 puntos sin entalla, luz libre 450 mm, separación entre cargas 150 mm.

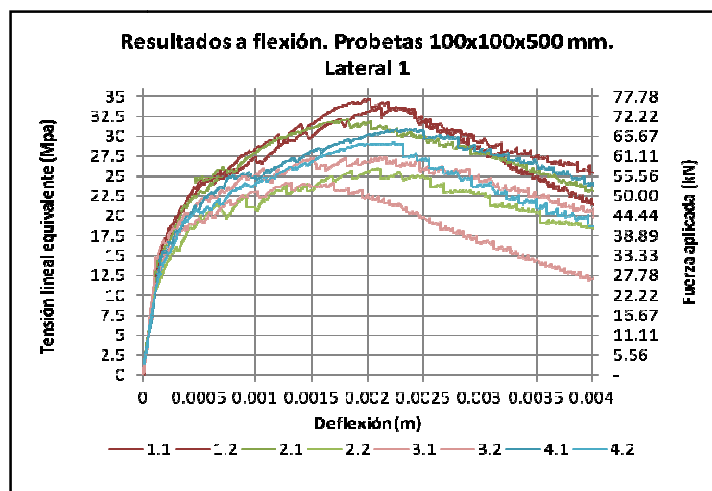


Figura 45. Ensayo a flexión-tracción. 22-11-2012 lateral 1

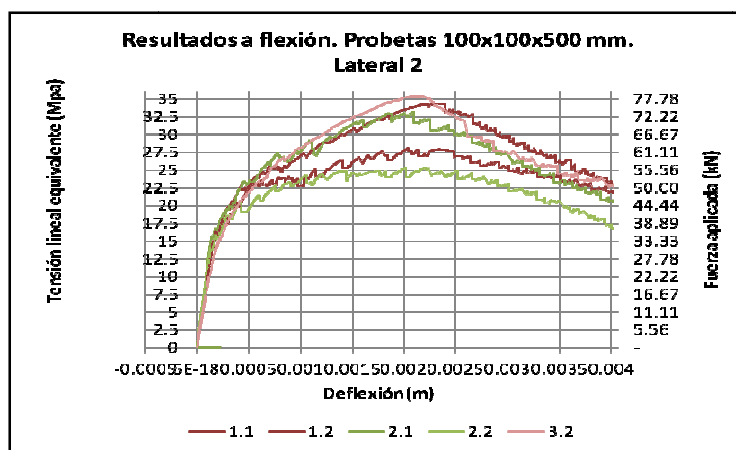


Figura 46. Ensayo a flexión-tracción. 27-11-2012 lateral 2

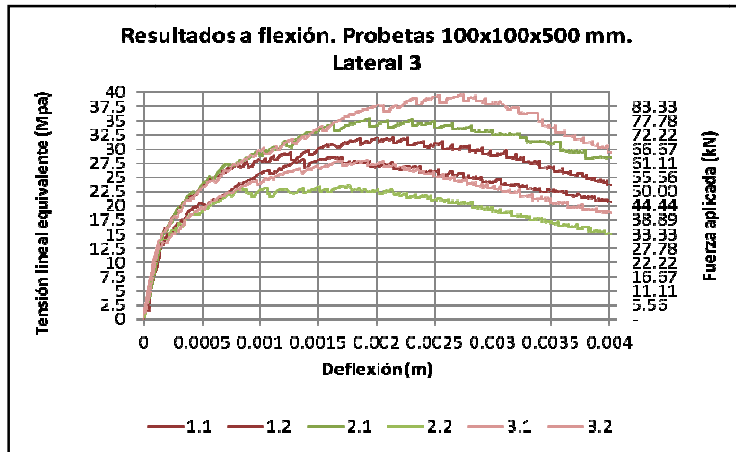


Figura 47. Ensayo a flexión-tracción. 30-11-2012 lateral 3

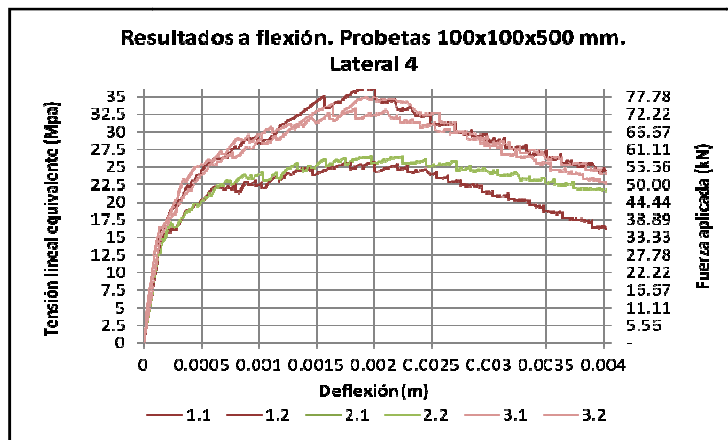


Figura 48. Ensayo a flexión-tracción. 05-12-2012 lateral 4

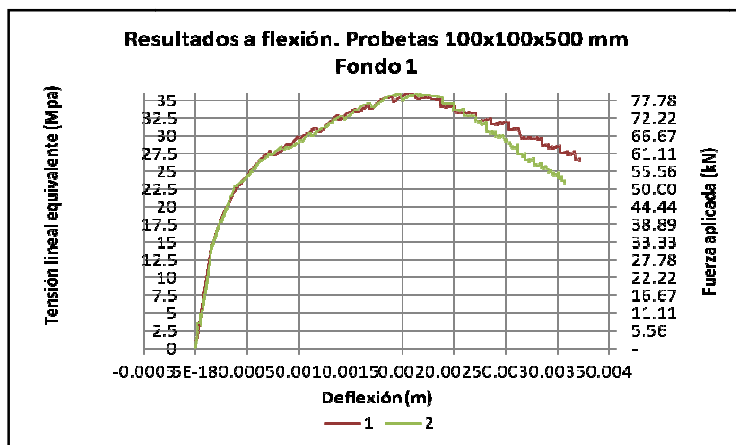


Figura 49. Ensayo a flexión-tracción. 19-12-2012 fondo 1

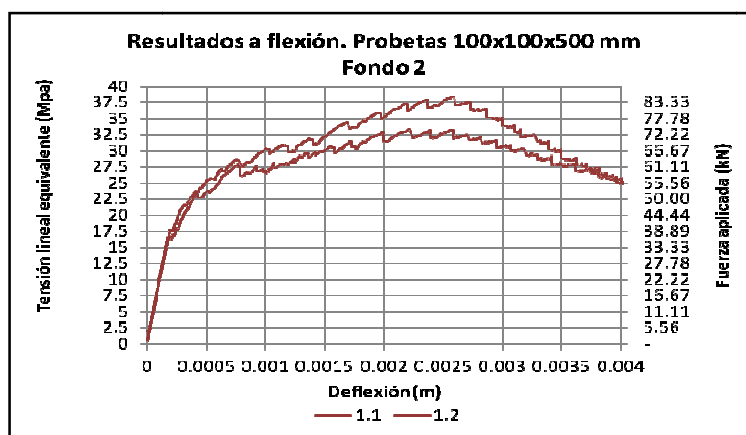


Figura 50. Ensayo a flexión-tracción. 21-12-2012 fondo 2

En este aspecto, el HMAR fabricado en planta sí alcanzaba valores equivalentes a los obtenidos por la dosificación de partida en el laboratorio, que fueron los introducidos en el cálculo.

Estas diferencias en el comportamiento final a tracción y compresión entre las dosificaciones fabricadas y ensayadas en laboratorio y en planta de prefabricados, suponen la confirmación de que el control de calidad del material debe incorporar como mínimo ensayos tanto para compresión como para tracción, puesto que no existe una correlación que permita una extrapolación directa entre ambos resultados.

f. Detalles finales y acabados

Uno de los objetivos definidos en la construcción de la pasarela, y que se adelantaba como uno de los valores añadidos del HMAR, es la capacidad para generar superficies vistas con acabados de gran calidad.

Considerando que los requisitos de fabricación y control lo asocian a la construcción de prefabricados, este concepto cobra mayor relevancia, puesto que incide en una de las virtudes del prefabricado.

Sin embargo, a la hora de llevar a la práctica los elementos, al tiempo que se pudieron conseguir resultados de gran calidad, nos encontramos con ciertos problemas que merece la pena destacar, y que será necesario estudiar para futuras aplicaciones.

I. TEXTURA EN SUPERFICIE

Una de las ventajas del material reside en su capacidad para imitar cualquier tipo de acabado superficial sobre el que se hormigone. Esto permite obtener una gran calidad en la superficie en contacto con molde o encofrados, pero obliga a que éstos mantengan un nivel de calidad acorde. Esto supone que se deberá prestar especial atención en la estanquidad y el acabado de los moldes que se empleen, revisando prácticas habituales en la prefabricación como puntos de soldadura, sellado de juntas

o lijado de fondos de molde, puesto que cualquier imperfección quedará reflejada en el HMAR.

Esta cualidad nos permitió dotar a la superficie pisable de las losas de un acabado antideslizante que aportó una estética final muy conseguida al conjunto. Para la selección de la textura se probó con diferentes tipos de acabado, descartando algunos basados en moldes plásticos, puesto que la gran capacidad de imitación del material dejaba la superficie resbaladiza, pese al relieve de la misma.



Figura 51. Pruebas de texturas para pavimento

Finalmente se apostó por un acabado rugoso, imitando una superficie terrosa, que unido al color del elemento ofrecía el resultado esperado. Para materializarlo se recurrió a contramoldes de goma de una patente alemana.



Figura 52. Prueba de textura final antideslizante

En cuanto al resto de superficies vistas de la pasarela, correspondientes a los laterales de la estructura principal, ejecutados en HMAR coloreado de verde, se presentaban

claras diferencias entre las correspondientes a las caras de llenado y las de fondo de molde.

Las superficies que dado el proceso de fabricación correspondían con una de las superficies del molde mantenían un acabado liso y homogéneo de gran calidad, por lo que no se preveía tratamiento sobre las mismas.

En el caso de las caras de llenado, el acabado que ofrecía el HMAR distaba mucho del concepto estético con el que se planteaba la pasarela, por lo que se estudiaron alternativas para conseguir un resultado final acorde con el resto de la pasarela.

Al tratarse de un hormigón autocompactante, estas caras de llenado quedaban correctamente niveladas, por lo que la actuación debía encaminarse únicamente a mejorar su textura deteriorada principalmente por costra superficial que se generaba en el material durante el hormigonado.

Esta fina capa plástica en superficie retenía algunas fibras, generando pequeñas protuberancias alrededor de estas, mantenía oquedades en superficie, debido al aire ocluido que aun quedaba en la masa al atravesarla, y se deformaba dando lugar a ciertas arrugas cuando una parte del hormigonado empujaba lateralmente elementos hormigonados tan sólo unos minutos antes.

Esto supuso un problema a lo largo de toda la ejecución, no habiéndose encontrado hasta la fecha un sistema para evitar su aparición. Para la pasarela, se optó por recubrir estas superficies con una capa de mortero, sobre la que se aplicaba una pintura homogeneizando el acabado y color de la estructura.

En las Figuras 53 a 55 se ofrece una muestra de los resultados previos y tras la aplicación del mortero y la pintura.



Figura 53. Acabado en caras de llenado



Figura 54. Acabado en caras de llenado



Figura 55. Acabado repasado con mortero

II. PRESENCIA DE FIBRAS EN SUPERFICIE

El principal problema relativo a los acabados de las estructuras de HMAR reside en que las fibras necesarias para alcanzar las excelentes características mecánicas del material aparecen sistemáticamente en la superficie, resultando un problema de seguridad en todas aquellas superficies al alcance del usuario, puesto que dada su finura se clavan y cortan con facilidad.

Esto era un hecho conocido al abordar el proyecto, y para ello se tomaron medidas desde el inicio, que tuvieron que complementarse posteriormente con otras para alcanzar un resultado que permitiese garantizar la funcionalidad de la pasarela en este aspecto.

En los trabajos previos se había comprobado que las fibras no aparecían en las caras de llenado, debido al efecto pared del molde, por lo que esas superficies aparecían exentas de fibras y se prestaban al servicio sin más, pero en la cara de llenado, como

adelantábamos al explicar las texturas, la costra superficial atrapaba las fibras dejando puntas de las mismas repartidas por la superficies.

Esto suponía un problema de entidad en cuanto al acabado de los laterales, puesto que la cara de llenado sería finalmente la de acceso al personal que circulase por ella, por lo que se propuso hormigonar estos elementos dejando la última capa de 5 mm sin hormigonar, para rellenar hasta alcanzar la altura completa del elemento con un mortero en el que se sustituían las fibras de acero por fibras plásticas, evitando así daños al usuarios aun cuando quedasen vistas.

Para garantizar la unión, pese a que el proceso se realizaba inmediatamente después del primer hormigonado, se aplicó un puente de unión, resolviendo los problemas que hubiese podido ocasionar la costra superficial para garantizar la unión entre mortero y hormigón.

Esta solución, si bien resolvía el problema de las fibras en superficie, no resultó todo lo efectiva que se esperaba. Las fibras no aparecieron en la cara superior, pero a cambio apareció una junta inevitable a lo largo de todo el cordón superior, en la que se detectó presencia de fibras de acero. Además, el espesor de la misma, definido con la finalidad de no comprometer los valores de sección propuestos en los cálculos, resulto insuficiente para algunas fibras que sobresalían de ambas fases de hormigonado.

De este modo, al presentar la estructura principal acabada se comprobó que debía resolverse el problema de las fibras en la cara de llenado.

A estas fibras hubo que añadir otras no previstas inicialmente en las caras correspondientes al fondo de molde. En estas superficies, como ya se ha dicho, no aparecían fibras, pero en las esquinas de los moldes, selladas con silicona para garantizar la estanquidad, las fibras quedaban clavadas a la silicona durante la fase de hormigonado, apareciendo a lo largo de todas las aristas vivas de la estructura.

Este segundo problema se pudo paliar en las fases finales, dando mayores tiempos de espera para el secado de la silicona, de manera que el endurecimiento superficial de la misma evitase que las fibras quedasen clavadas, pero no consiguió resolverse por completo.

Para resolver el problema de las fibras en superficie se hicieron pruebas de lijado sobre la muestra escala 1:1, comprobándose que para una eliminación completa de las puntas de fibras era necesario actuar de manera intensa sobre la totalidad de la superficie afectada, lo que suponía estropear el acabado de superficies vistas y mantenía la incertidumbre sobre aparición de nuevas fibras al eliminar parte de la capa superficial.

Finalmente se propuso por parte de los técnicos de la casa de prefabricados una solución que permitió resolver el problema, combinando la eliminación mecánica mediante un lijado liviano de esquinas y superficies con fibras con una pasada de soplete que permitía fundir las puntas eliminando el riesgo sin dañar la superficie de hormigón.



Figura 56. Operario pasando soplete para eliminación de fibras en esquinas

Con este sistema se consiguió resolver el problema, requiriendo no obstante una cantidad de horas de mano de obra que deberán incorporarse en futuras aplicaciones.

PROBLEMÁTICA: Los elementos prefabricados con HMAR presentaban dos problemas principales respecto a las superficies vistas. Por un lado, el acabado de las caras de llenado no se correspondía con la calidad estética del resto. Además, las fibras de acero se presentaban en estas caras y en los cantos vivos, suponiendo un riesgo para el usuario si no se tomaban medidas.

RESOLUCIÓN: La cara de llenado se repasa con mortero y posteriormente con pintura, permitiendo un acabado acorde con la estructura.

Para resolver el problema de las fibras, pese a contar en caras de llenado con una capa de mortero con fibra plástica en los 5 mm finales, resultó necesario un primer lijado de las fibras salientes y una pasada de soplete que eliminase las puntas. La esbeltez del material permitía que con una mínima actuación del soplete se eliminase la punta sin afectar al hormigón.

COMENTARIOS: Pese a que el problema ha quedado resuelto, la mano de obra dedicada a tal efecto no resulta razonable para conseguir un material competitivo en costes, por lo que resulta necesario continuar estudiando alternativas que permitan un mayor control de las fibras en caras de llenado y aristas.

La presencia muy superficial de las fibras también puede llegar a suponer un problema en el caso que el desgaste elimine la capa de escaso espesor que las cubre. Esto puede producir oxidación puntual a largo plazo de estas fibras, lo que no supondría un problema respecto a la durabilidad, puesto que la compacidad del material impediría que esta oxidación evolucionase hacia el interior, pero si para la componente estética, puesto que aparecerían pequeñas marcas de óxido en superficie. Esto se puede paliar mediante la aplicación de pinturas hidrófugas en superficie, pero debe estudiarse correctamente su influencia real y la vida útil de las mismas.

III. PIEZA ACABADA

Para finalizar la pasarela se habían previsto en proyecto una serie de equipamientos que se diseñaron de modo que procurasen mantener o mejorar la estética con la que se planteaba la estructura. Para ello se tuvo en cuenta en el proceso de prefabricación la colocación de todos aquellos elementos ocultos de los equipamientos embebidos en los elementos prefabricados, minimizando los elementos vistos que pudiesen afectar a la estética final.

De este modo, para el cableado de la iluminación se incorporaban tubos de PVC a lo largo de ambos cordones superiores, aprovechando el macizado en extremos para sacar estos tubos bajo la superficie pisable.

Estos tubos se intercalaban a su vez con el cajeadado para la colocación de leds, suministrado previamente por la casa de iluminación, lo que permitía dejar toda la iluminación encastrada en la estructura, obteniendo un resultado muy satisfactorio.



Figura 57. Pasarela iluminada mediante leds encastrados en el cordón superior

Los huecos generados entre diagonales en la zona superior por la que se transita estaba previsto cubrirlos con vidrio de seguridad. Para la sujeción de estos vidrios se empleaban herrajes de acero inoxidable que debían quedar anclados en la estructura, por lo que en el hormigonado de los laterales se dejaron unas hembras de métrica 10 en la posición que debían colocarse los herrajes, de manera que únicamente se viese el enganche superior en inoxidable.



Figura 58. Prueba de herrajes y vidrio. Cajeado para iluminación en cordón

g. Transporte y Montaje

Finalmente la pasarela completa debía llevarse desde la casa de prefabricados en Buñol, hasta el Barranco de las Ovejas en Alicante. Los requisitos no distaban de los habituales para el transporte de un elemento de estas dimensiones, pero si es cabe destacar que tuvo que estudiarse convenientemente la posición de los puntos de apoyo, tanto para la elevación como para el transporte.

Esto se debe a que, a diferencia de las estructuras de hormigón tradicional, el diseño se había realizado con una finalidad clara de optimización de secciones y con una previsión de hormigonado que orientase las fibras del modo más eficiente para los esfuerzos de servicio. Esto obliga a estudiar con mayor detalle que en otros elementos la configuración estructural con la que va a trabajar el elemento en fases de transporte y montaje.

En el caso de la pasarela, resolver la elevación resultó sencillo, puesto que era posible disponer los elementos de enganche en la posición de los apoyos finales en servicio, por lo que no deparaba nuevos esfuerzos.

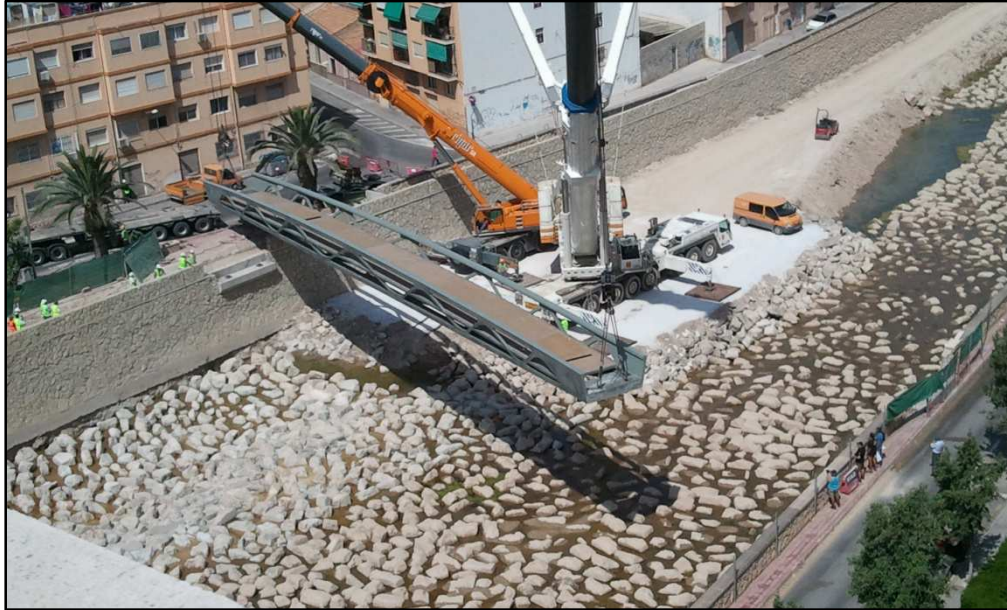


Figura 59. Pieza elevada en fase de montaje

Sin embargo, la configuración del dolly que debía transportar la pieza obligaba a apoyar la pasarela en la intersección de las primeras diagonales, de modo que se generaba un voladizo de la zona final. Se comprobó que el cordón superior era capaz de absorber estas tracciones previa carga sobre el transporte.

Pese a que el elemento resistía, se comprobó en el cálculo que las tensiones podían provocar un inicio de fisuración aun quedando en fase elástica. Esto se pudo comprobar durante la carga, en la que se llegó a apreciar un inicio de fisura en el cordón superior que quedó cerrado al poner la pieza en obra y quedar comprimida dicha sección.



Figura 60. Pasarela completa sobre transporte

La pieza quedó apoyada sobre los neoprenos, y una vez dispuesta en su posición final se montaron los vidrios de seguridad y los leds correspondientes a la iluminación.



Figura 61. Vista diurna de la Pasarela acabada

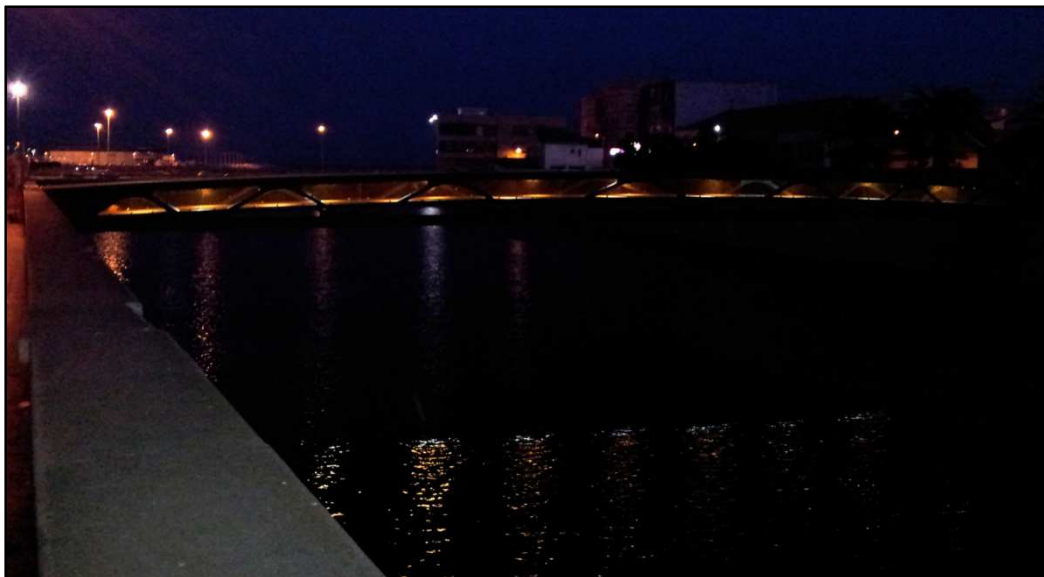


Figura 62. Vista nocturna de la Pasarela acabada

6. CONCLUSIONES

Materializar con éxito la ejecución y puesta en obra de la primera pasarela en España con HMAR ha permitido validar el uso de este material como alternativa al acero para este tipo de estructuras, aportando un valor añadido en cuanto a la reducción de costes de mantenimiento, de gran interés para las Administraciones promotoras de este tipo de proyectos.

Un requisito indispensable para plantear el material como alternativa real a los materiales convencionales (acero y hormigón pretensado) para materializar estructuras de este tipo, es conocer el valor del producto puesto en obra. Los resultados obtenidos han permitido confirmar que se trata de un material que permite obtener soluciones equivalentes en peso a las de acero (no en volumen dada la diferencia de densidades), por lo que garantizando un coste de los elementos fabricados en HMAR y puestos en obra en el orden de precio del acero estructural, entre 2 y 2.5€/kg, convierte a las estructuras propuestas en HMAR en alternativas perfectamente competitivas.

Un aspecto fundamental para garantizar este resultado reside en un correcto trabajo en fase de diseño que permita optimizar el uso del HMAR, planteando tipologías estructurales y secciones que aprovechen al máximo las propiedades del material, puesto que se trata de un material compuesto por materias primas exclusivas, y por tanto con un coste de partida elevado.

La ejecución de esta pasarela ha permitido comprobar que, si bien se trata de un material caro, la influencia del precio de sus componentes tiene menor trascendencia que los costes derivados de la mano de obra necesaria para su fabricación y puesta en obra, así como la repercusión de los costes derivados de un proceso de prefabricación mucho más exigentes de lo habitual (moldes de calidad y estancos, ejecución por fases, tiempos de espera,...).

Queda claro por tanto que las claves para convertir el HMAR en un material competitivo, residen en generar diseños adaptados tanto al material como al proceso de prefabricación necesario para ejecutarlo.

Destacar también que toda la problemática detectada durante el proceso de fabricación de los distintos elementos ha sido resuelta satisfactoriamente, pero en su mayoría ha redundado en sobrecostes que en algunos casos será posible evitar en aplicaciones futuras pero que en otros requieren de un estudio individualizado con la finalidad de obtener un proceso de fabricación realmente eficiente, y por tanto una reducción y un control de los costes derivados de esta fase.

El propio proceso de ejecución ha permitido obtener también valiosos resultados en relación con la correlación entre los resultados obtenidos en laboratorio dentro de las diferentes líneas de investigación, y los obtenidos en una planta de prefabricados con los medios y requisitos propios de una obra real.

Se ha confirmado que el estado del conocimiento respecto al comportamiento del material se encuentra en una fase muy avanzada, obteniendo una respuesta de la

estructura real y de los modelos ejecutados en los ensayos y pruebas de carga que se correspondía a la perfección con los datos obtenidos en la modelización.

Se ha podido comprobar que el comportamiento del material en estado fresco puede verse alterado en gran medida por cualquier modificación en cuanto a medios de amasado, tiempos y orden de dosificación de materiales o cambios en la presentación o calidad de los materiales, por lo que resulta fundamental realizar ensayos previos con la dosificación y los materiales a emplear y los medios disponibles para su fabricación.

Se trata de un material cuyo comportamiento resistente esta intrínsecamente relacionado con la forma de puesta en obra y la geometría de los elementos, por lo que estos aspectos deben incorporarse a la hora de realizar los cálculos, definiendo los coeficientes de paso entre las propiedades del material determinadas mediante probetas y ensayos estandarizadas y las de ese mismo material puesto en obra en el elemento real (coeficientes k de las Recomendaciones del SETRA-AFGC).

Del mismo modo, será necesario incorporar en el diseño una planificación del hormigonado, de manera que la caracterización de las secciones se corresponda con el comportamiento de los elementos realmente ejecutados.

La caracterización del material deberá incorporar tanto los valores de resistencia y deformación máxima a compresión como a tracción, por lo que resulta necesario incorporar en el control de calidad ensayos que permitan verificar la totalidad de los datos introducidos en el cálculo, no resultando viable extrapolar los resultados obtenidos con la rotura de probetas a compresión, como en el hormigón convencional.

Las propiedades del material así definidas, permiten resolver estructuras mediante soluciones de gran esbeltez, lo que obliga a incorporar en el cálculo comprobaciones relativas a fenómenos relacionados habitualmente con las estructuras de acero (vibraciones, pandeo,...).

Queda patente por tanto que las expectativas suscitadas a nivel internacional por el HMAR como material del futuro se sostienen en una base firme, pero que es necesario continuar estudiando ciertas facetas relacionadas con la fabricación del material y la puesta en obra del mismo, con la finalidad de resolver cuestiones aun sin resolver, optimizar procesos y acotar los costes de cada fase, dando lugar a un proceso de evolución y mejora del HMAR, que difícilmente se dará en los materiales convencionales, lo que permitirá obtener con el material soluciones aun más competitivas.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Spasojevic, A. 2008. *Structural Implications of Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete in Bridge Design*. Thèse, École Polytechnique Fédérale De Lausanne.
- [2] R.N. ter Maten. 2011. *Ultra High Performance Concrete in Large Span Shell Structures*. Master thesis, Delft University of Technology.
- [3] López, J.A. 2012. *Adaptación del Modelo de Comportamiento del Ultra High Performance Concrete (UHPC) para el Estudio de la Respuesta Estructural y Análisis Numérico de una Celosía*. Trabajo Final de Máster, UPV
- [4] Camacho, E.; López, J.A.; Serna, P. 2012 *UHPRFC: De los componentes a la estructura*. 54º Congreso Brasileño del Hormigón IBRACON. 8-11 Octubre.
- [5] Spasojevic, A. 2006; *Possibilities of Innovation in the Design of Concrete Bridges*, Proceedings of the 6th Int. PhD Symposium in Civil Engineering, Zurich 2006, 8 p., Zurich, Switzerland, 8, 2006.n
- [6] SETRA-AFGC. 2002 *Ultra High Performance Fiber Reinforced Concretes. Interim Recommendations. (Updated version 2013)*
- [7] Walraven, J. 2012. *On the way to international design recommendations for Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete*. Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for high performance construction Materials. Kassel, March 7-9, 2012.
- [8] López, J.A.; Serna, P.; Camacho, E. 2012. *Structural Design and Preliminary Calculations of a UHPRFC Truss Footbridge*. HIPERMAT 2012. KASSEL, 7-9 MARCH
- [9] Schmidt M.; Ekkehard, F. 2005. *Ultra-High Performance Concrete: Reserch, Development and Application in Europe*.
- [10] Li V.C. 2004. *Strategies for High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites Development*. International Workshop on Advanced Fiber Reinforce Concrete at Bergamo. Sept. 24-25 2004.
- [11] ICOSA, Ingeniería civil SA, 2012; *Proyecto Modificado N°1 al de Acondicionamiento del Barranco de las Ovejas en su tramo final (pk 0+457 hasta desembocadura)*. Alicante.

- [12] Fehling, E., Schmidt, M., Bunje, K., Schreiber, W.; 2004; *Ultra High Performance Composite Bridge across the River Fulda in Kassel – Conceptual Design, Calculations and Invitation to Tender*. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, September 13-15, 2004.
- [13] Toutlemonde, F., Resplendino, J.; 2013 *Designing and Building with UHPFRC*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ USA. doi: 10.1002/9781118557839.fmatter
- [14] Toutlemonde F., Resplendino J., Sorelli L., Bouteille S., Brisard S.; *Innovative design of ultra high-performance fiber reinforced concrete ribbed slab: experimental validation and preliminary detailed analyses*, Seventh International Symposium on the utilization of High-Strength/High- Performance Concrete, ACI Special Publication SP-228, Vol. 2, pp. 1187-1205, USA, June, 2005.
- [15] Toutlemonde F., Légeron F., Brazillier D. , Rational structural design using HPC in some typical bridge structures, Proceedings 6th international symposium on utilization of high strength / high performance concrete, pp. 797-812, Leipzig, 2002.
- [16] Viet, N., Küchler, M., Henze, S. 2008. *Modulare truss construction made of ultra high performance concrete*. The 3rd ACF International Conference-ACF/VCA 2008
- [17] Tanaka, Y., Maekawa, K., Kameyama, Y., Ohtake, A., Musha, H., Watanabe, N. 2009. *Innovation and application of UFC bridges in Japan*. BFUP 2009/UHPFRC2009 Proceedings.
- [18] Ma, J., Orgass, M., Dehn, F., Schmidt, D., and N.V. Tue. 2004. *Comparative Investigations on Ultra-High Performance Concrete with and without Coarse Aggregates*. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, September 13-15, 2004.
- [19] Droll, K. 2004 *Influence of additions on ultra high performance concrete grain size optimisation*. Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, September 13-15, 2004.
- [20] Markovic, I. 2006. *High performance hybrid reinforced fibre concrete. Development and utilization*. PhD-Thesis, Delft university of Technology, January 2006
- [21] Ma, J., and H. Schneider. 2002. *Properties of Ultra-High-Performance Concrete*. Leipzig Annual Civil Engineering Report (LACER), No. 7: 25-32.

- [22] JSCE. *Guidelines for the Design and Construction of Ultra High Strength Fibre Reinforced Concrete (draft)*.
- [23] Hirschi, T., Wombacher, F. 2008. *Influence of different superplasticizers on UHPC*. Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, March 5-7, 2008.
- [24] Fidjestol, P., Thorsteinse, R.T., Svennevig, P. 2012. *Making UHPC with Local Materials. The Way Forward*. Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for high performance construction Materials. Kassel, March 7-9, 2012
- [25] USDT 2005. *High Performance Concrete Structural Designers' Guide*, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, March, 2005.
- [26] Thibaux T., Tanner J. A. 2002; *Constructions des premières ponts français en béton fibré à ultra haute performance*, Proceedings of the 1st fib congress - Concrete Structures in the 21st Century, pp. 139 - 144, Osaka, 2002.
- [27] Rossi P. 2000; *Ultra-high performance fibre reinforced concretes (UHPFRC): an overview*, BEFIB'2000, Proceedings of the Fifth International RILEM Symposium on Fibre-Reinforced Concretes (FRC), Ed. by P. Rossi and G.Chanvillard, pp 87-100, Lyon, France, September, 2000.
- [28] Resplendino J., Petitjean J. ,2003. *Ultra-High-Performance Concrete : First Recommendations and Examples of Application*, The fifth International Symposium on High Performance Computing, 18 p., Tokio-Odaiba, Japan, october, 2003
- [29] Resplendino J. 2004; *First recommendations for Ultra-High Performance Concretes and examples of applications*, Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete , pp. 79-89, Kassel, Germany, 2004.
- [30] Resplendino J., Bouteille S. 2006; *Construction de deux ponts routiers en béton fibré ultra performant (BFUP)*, Bulletin Ouvrages d'Art, SETRA - Service d'études techniques des routes et autoroutes, Vol. 53, pp. 2-11, France, November, 2006.
- [31] Racky P., 2004; *Cost-effectiveness and sustainability of UHPC*, Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, pp. 797-805, Kassel, Germany, 2004

- [32] Meda A, Rosati G. , 2003; Design and construction of a bridge in very high performance fiber-reinforced concrete, ASCE Journal of Bridge Engineering, Vol. 8, No.5, pp. 281-287, September-October, 2003.
- [33] JSCE , 2006; *Recommendations for Design and Construction of Ultra High Strength Concrete Structures*, Draft, Japan Society of Civil Engineers, September, 2006.
- [34] DAfStB, 2008; *Ultrahochfester Beton. Sachstandsbericht*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton; 2008, 126 S., Beuth ISBN 978-3-410-65045-4
- [35] GOWRIPALAN N., and GILBERT R.I., 2000; *Design Guidelines for Ductal® Prestressed Concrete Beams*, Design Guide, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales, Sydney, Australia, 2000.

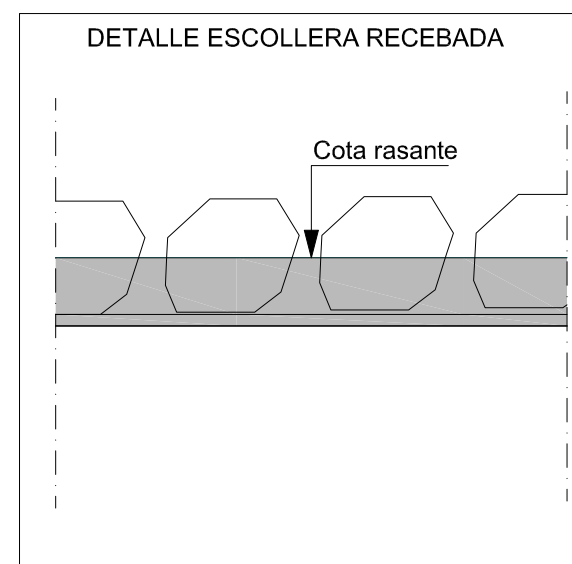
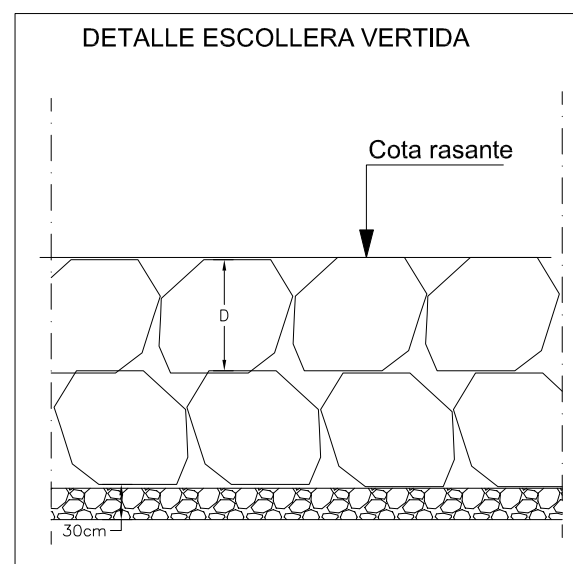
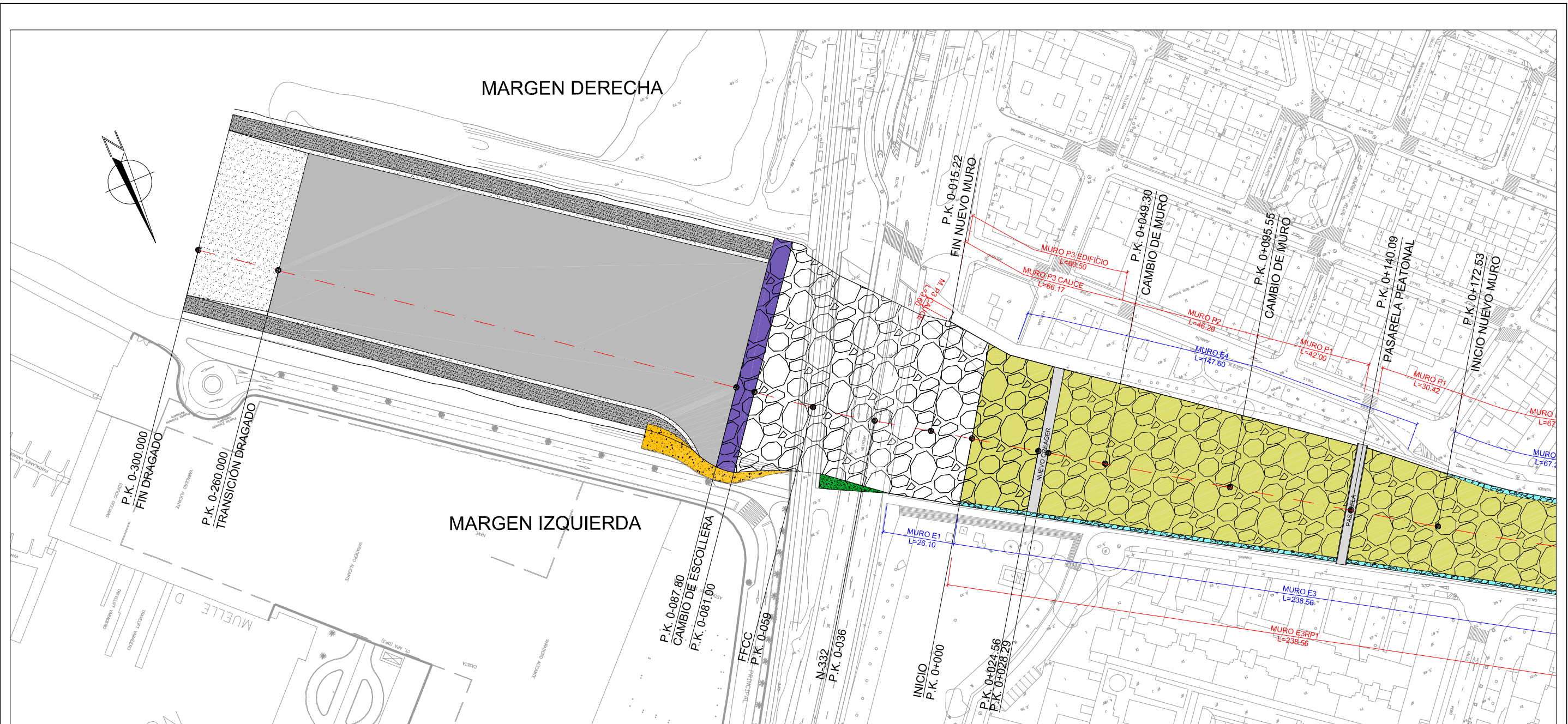
**ANEJO 1.- PLANOS DE DEFINICIÓN DE LA PASARELA
(PROYECTO MODIFICADO)**



SITUACIÓN

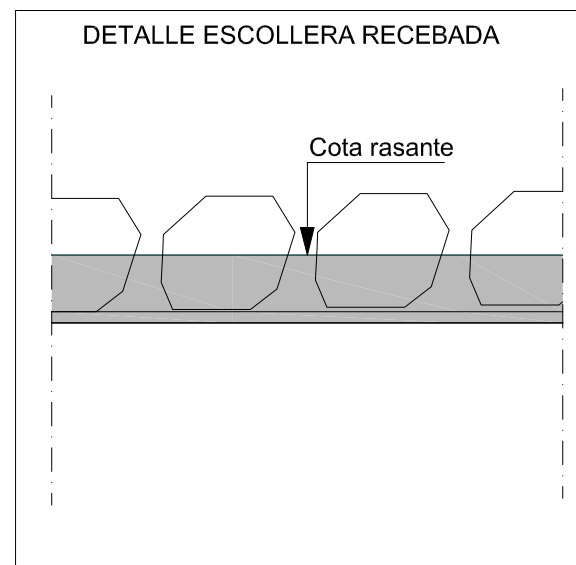
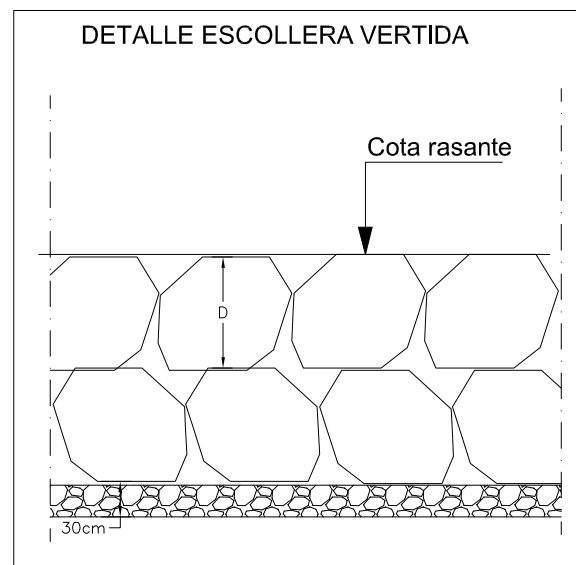
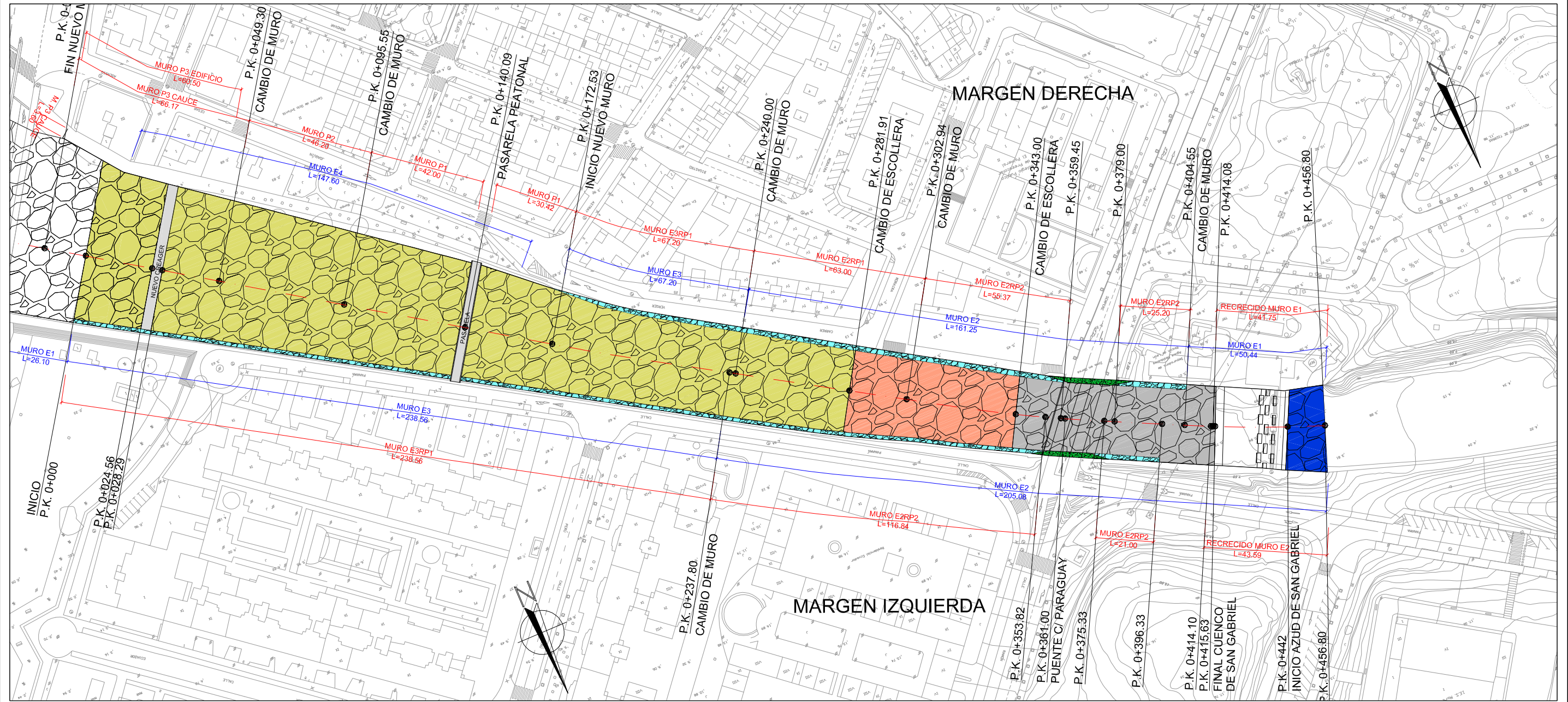


EMPLAZAMIENTO



LEYENDA

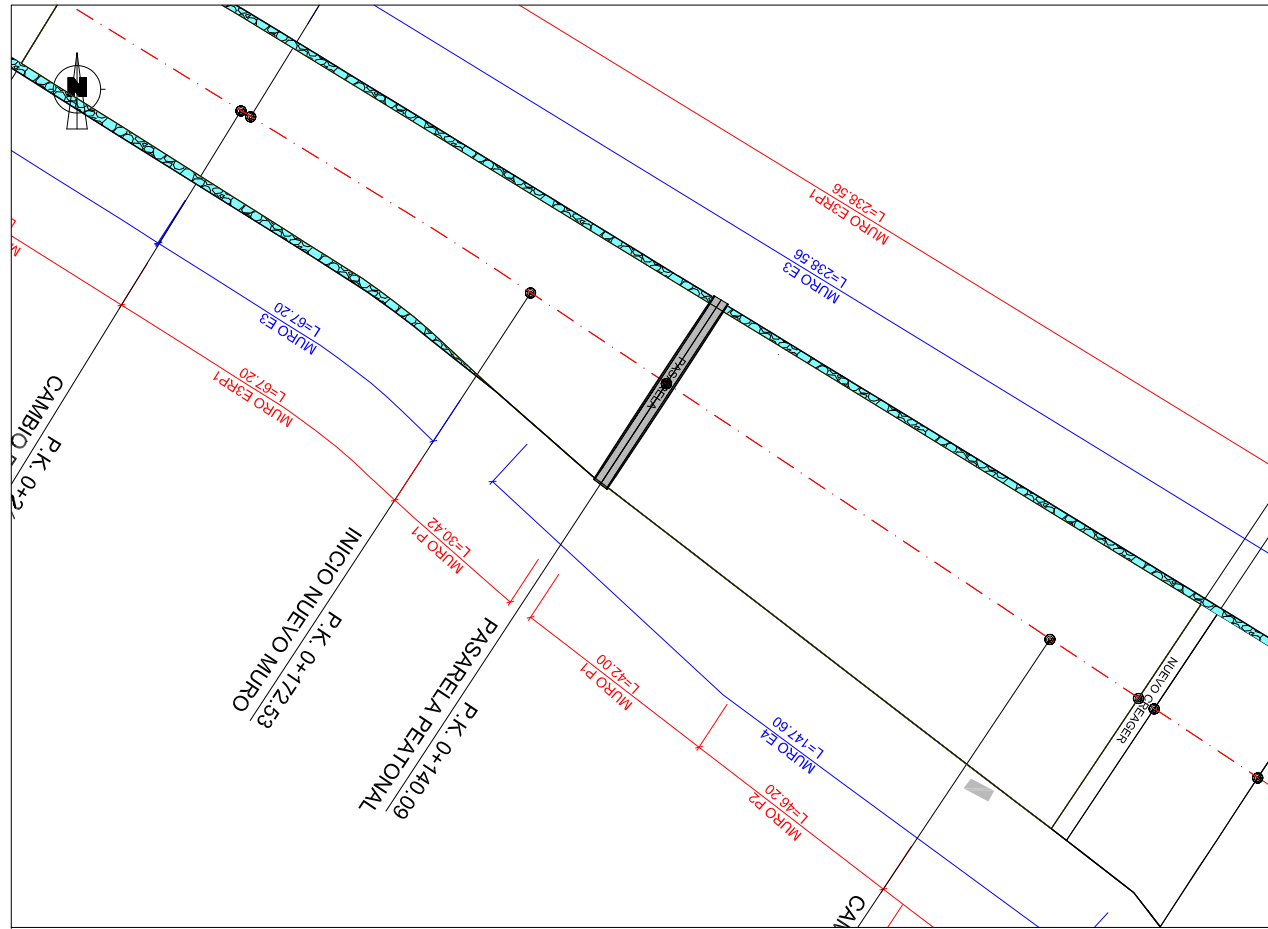
	Escollera recibada D=0.2 m
	Escollera recibada D=0.4 m
	Escollera recibada D=1.2 m
	Escollera recibada D=1.4 m
	Escollera recibada D=1.0 m
	Escollera existente
	Escollera vertida Dm=0.60 m
	Dragado cota -3.5
	Dragado cota -2.5
	Transiciones Dragado
	Muro espigón izquierdo
	Transición Hidráulica



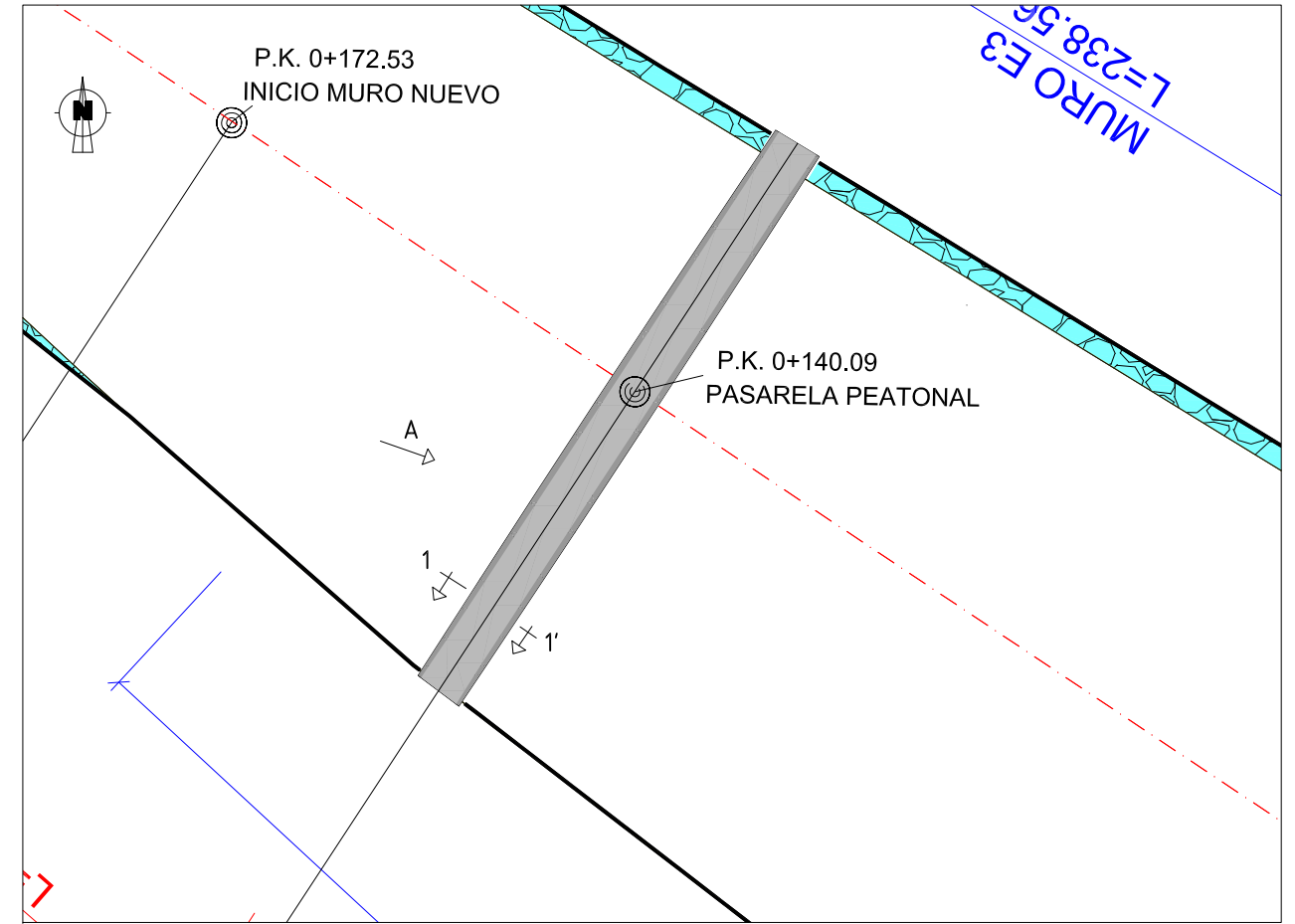
LEYENDA

	Escollera recibada D=0.2 m
	Escollera recibada D=0.4 m
	Escollera recibada D=1.2 m
	Escollera recibada D=1.4 m
	Escollera recibada D=1.0 m
	Escollera existente
	Escollera vertida Dm=0.60 m
	Dragado cota -3.5
	Dragado cota -2.5
	Transiciones Dragado
	Muro espigón izquierdo
	Transición Hidráulica

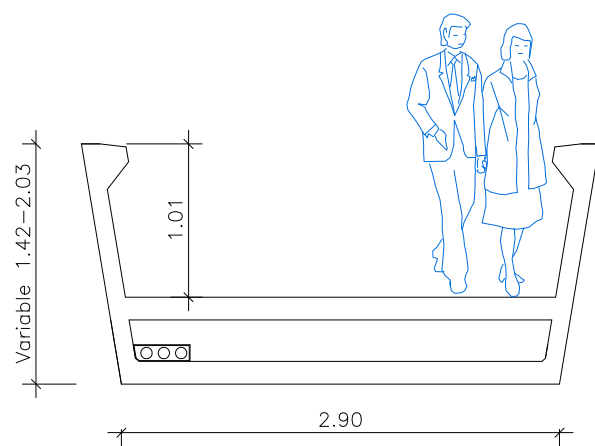
Situación Pasarela
1/1500



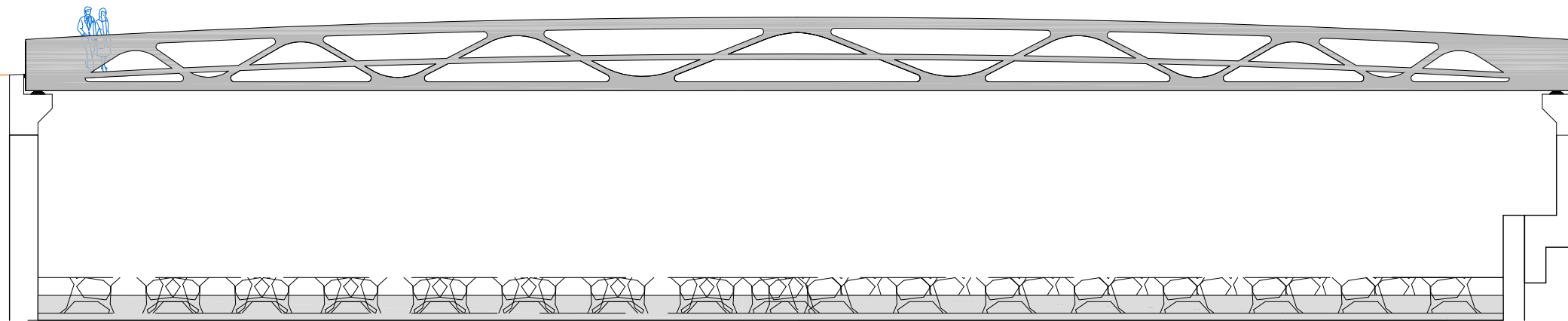
Planta
1/500

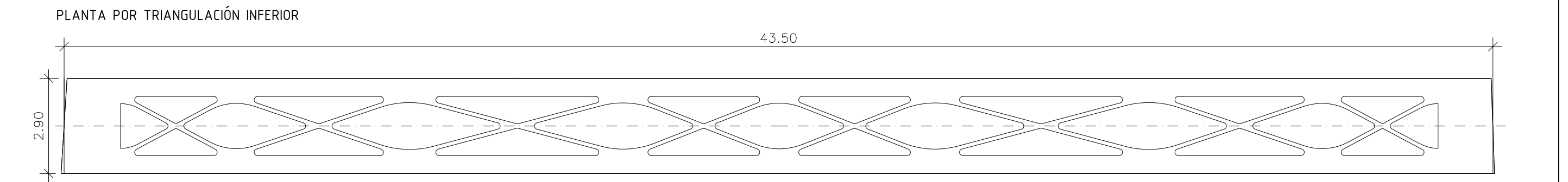
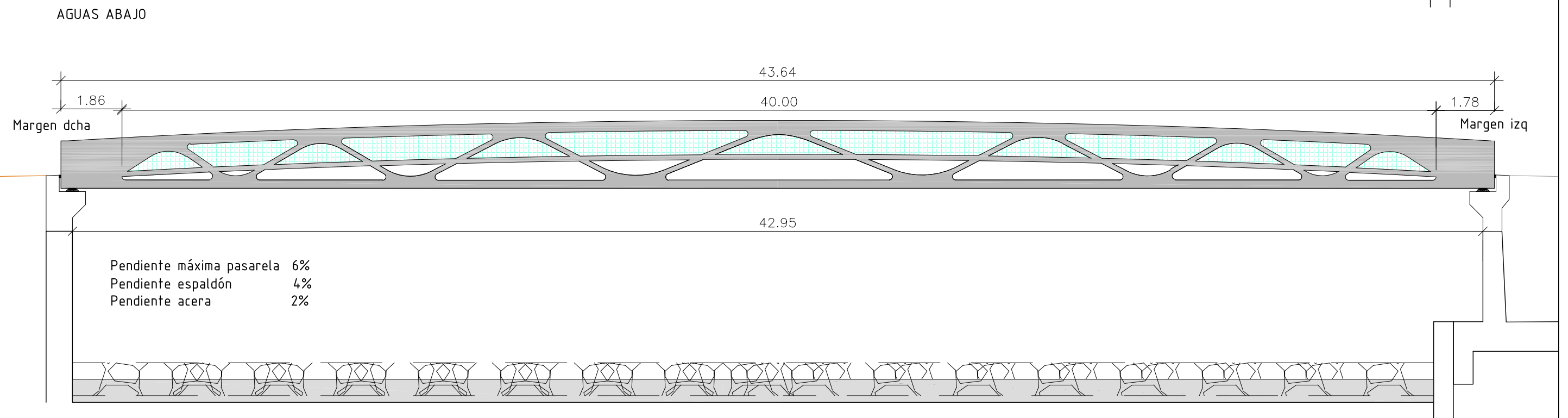
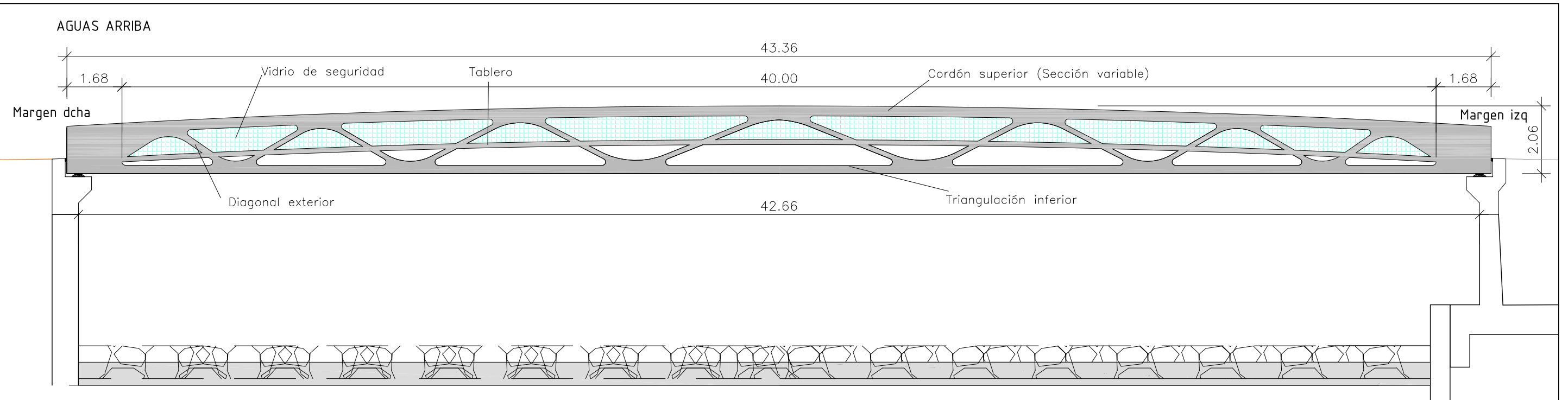


Sección 1-1'
1/50

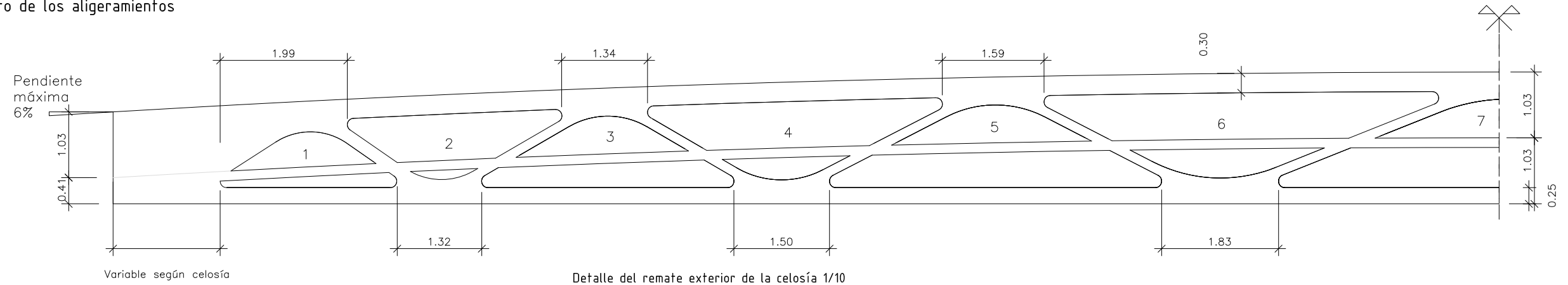


Vista A
1/160





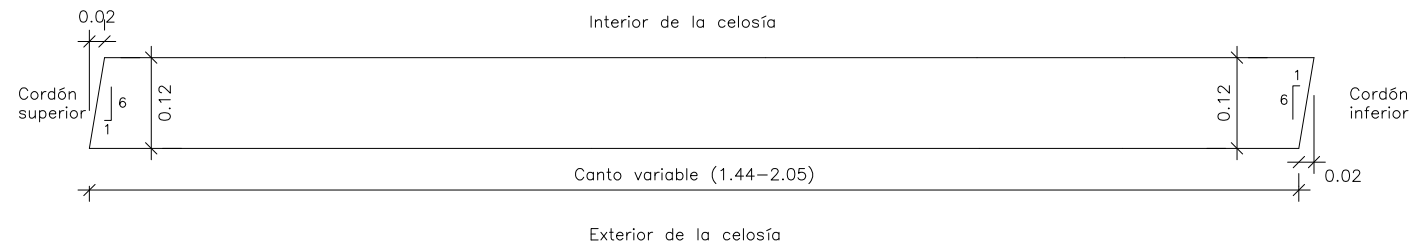
Posicionamiento de los aligeramientos
1/75



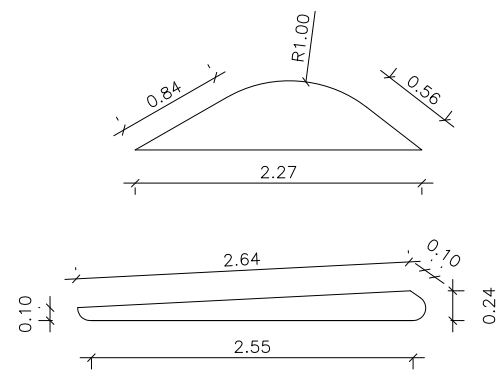
NOTA: El tablero y el cordón superior describen una parábola con una pendiente inicial del 6%, creciendo hasta centro luz con un incremento de altura de 62 cm y tangente horizontal

Geometría aligeramientos
1/60

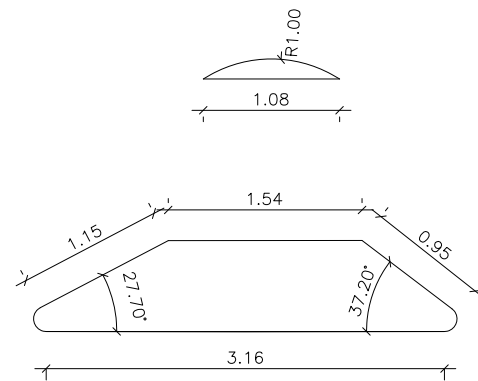
Detalle del remate exterior de la celosía 1/10



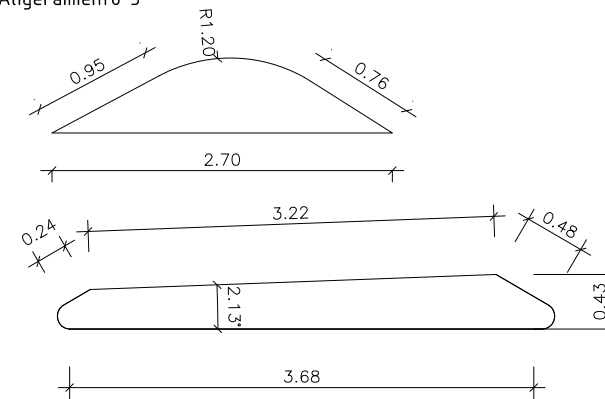
Aligeramiento 1



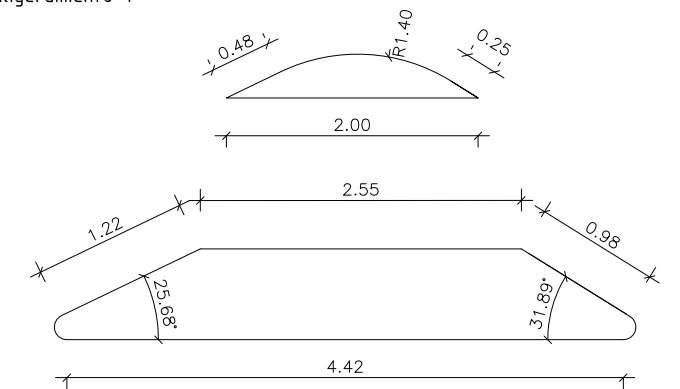
Aligeramiento 2



Aligeramiento 3

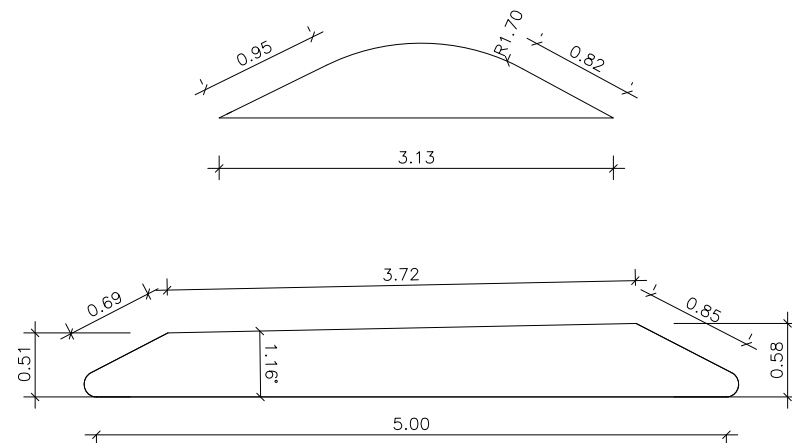


Aligeramiento 4

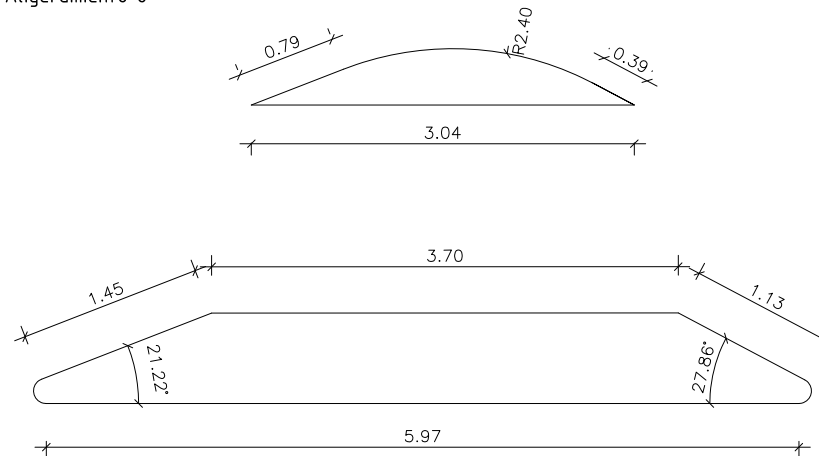


NOTA: Los radios de las circunferencias no acotadas son de 0.1 m

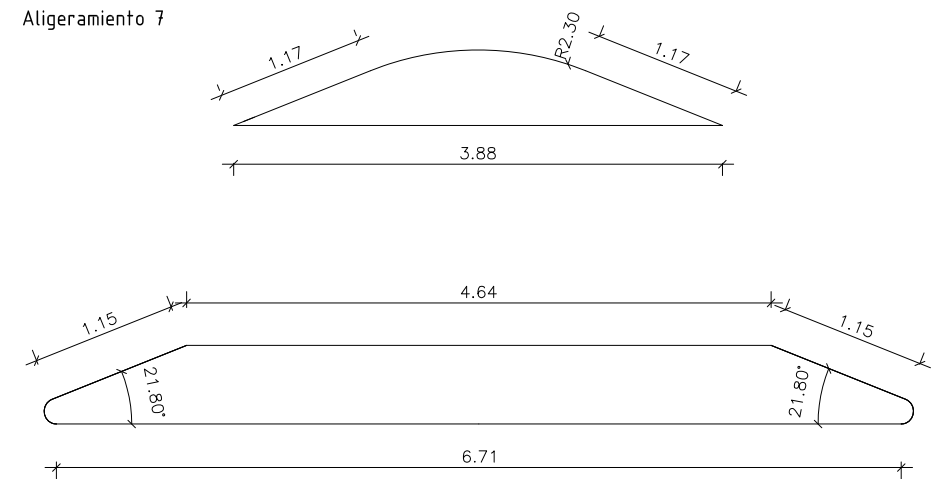
Aligeramiento 5



Aligeramiento 6

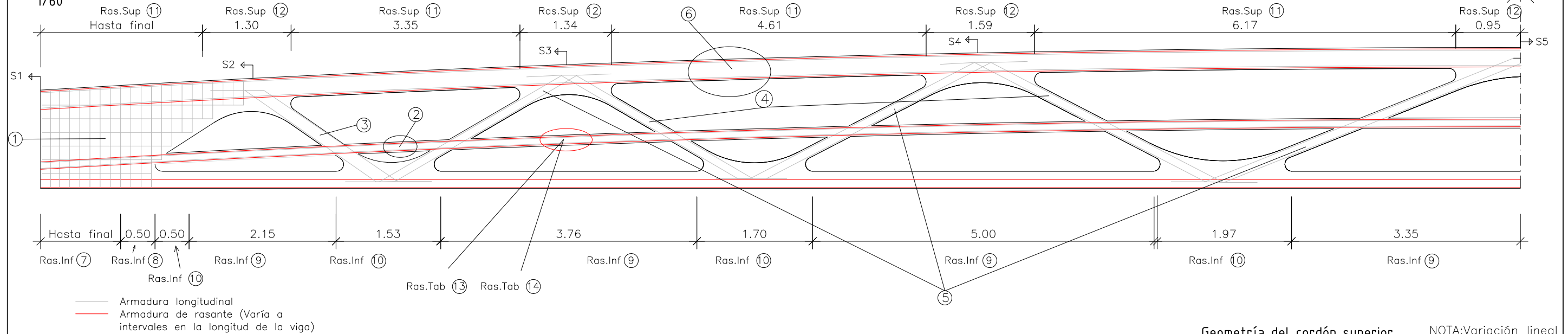


Aligeramiento 7



Esquema de armado de la celosía lateral

1/60



NOTA: El grupo ⑬ está localizado a lo largo de toda la viga longitudinal del tablero. El grupo ⑭ se encuentra en cada rigidizador transversal

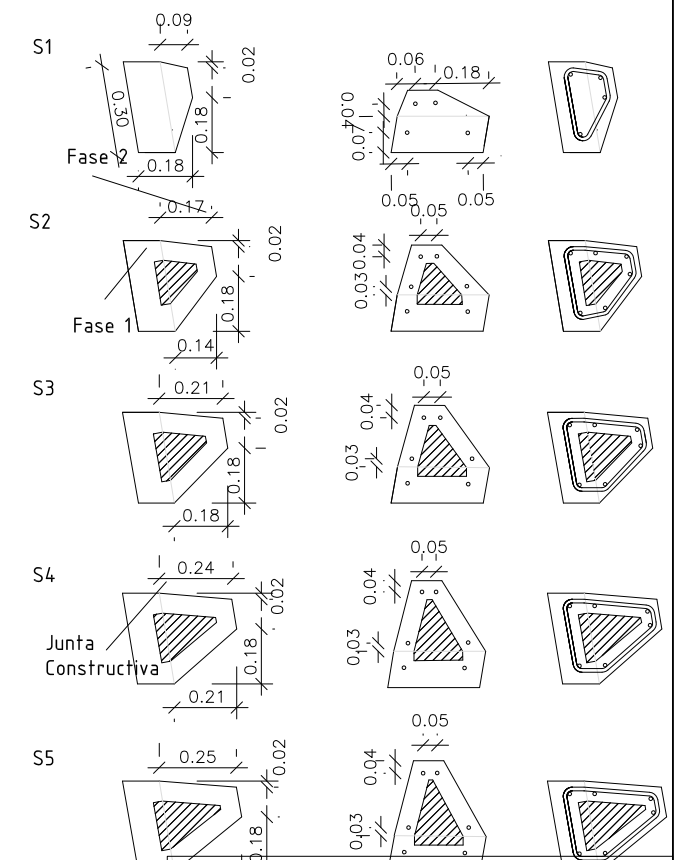
NOTA: El aligeramiento del cordón superior se dispondrá en las regiones "Ras.Sup ⑪". Su dimensión será el máximo que garantice un recubrimiento de 2 cm

Tipo	Rec. geométrico (mm)	Armado	Sección	L.anclaje (cm)	L.solape (cm)
①	20	2xmallas #10 #15X20		-	-
②	27	4#10		-	60
③	20	4#20		50	-
④	20	4#20		50	-
⑤	20	4#20		50	-
⑥	-	2#12		-	60

Tipo	Rec. geométrico (mm)	Armado	Sección, armado y geometría	NOTA
⑦	30	4c12/7.5		Radio de doblado: 18 mm *L1: En la zona de macizado **L2: en el resto de la viga
⑧	30	2c12/7.5		
⑨	30	2c12/30		
⑩	30	2c12/15		
⑪	20	2c12/15		Radio de doblado: 18 mm Variable a lo largo del cordón superior
⑫	20	2c12/30		
⑬	15	2c10/30		Radio de doblado: 18 mm Se muestra la unión con el tablero
⑭	15	4c10		Se dejan 50 cm para el anclaje y empalme de la armadura

Geometría del cordón superior 1/20

NOTA: Variación lineal del cordón entre secciones



0.22 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

PASARELA	HP-150/(AC-E3/AC-V2)/2/IIIa
- ESTRUCTURA PRIMARIA	HA-135/(AC-E3/AC-V2)/2/IIIa
- TABLERO	HA-30/B/20/IIIa
HORMIGÓN EN ESTRIBOS	HA-30/B/20/IIIa
ACERO PASIVO	B 500 SD
ACERO ACTIVO	Y1860S7 Ø15.2 mm

NIVEL DE CONTROL DE EJECUCIÓN

NIVEL DE CONTROL	
PASARELA	INTENSO
ESTRIBOS	INTENSO

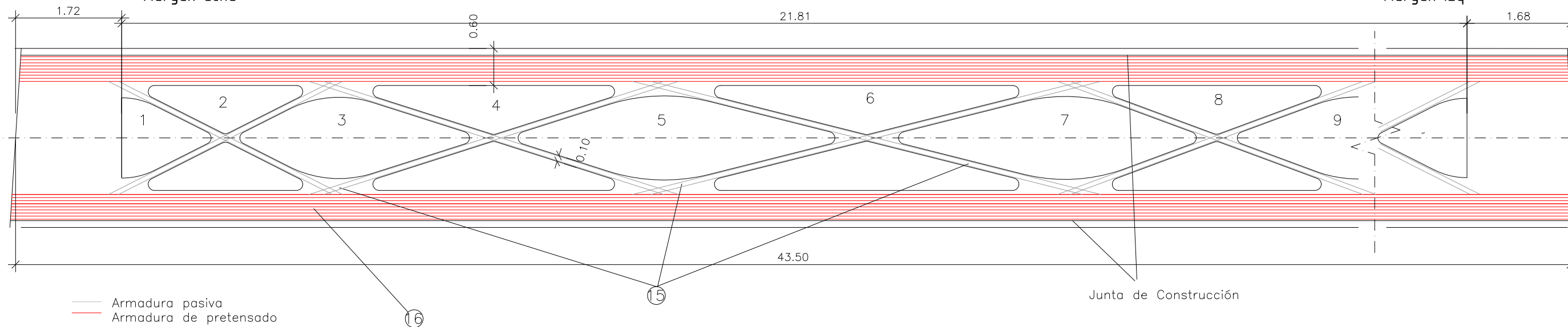
COEFICIENTES DE MAYORACION DE ACCIONES SEGÚN IAP 2011

Geometría y armado celosía inferior

1/70

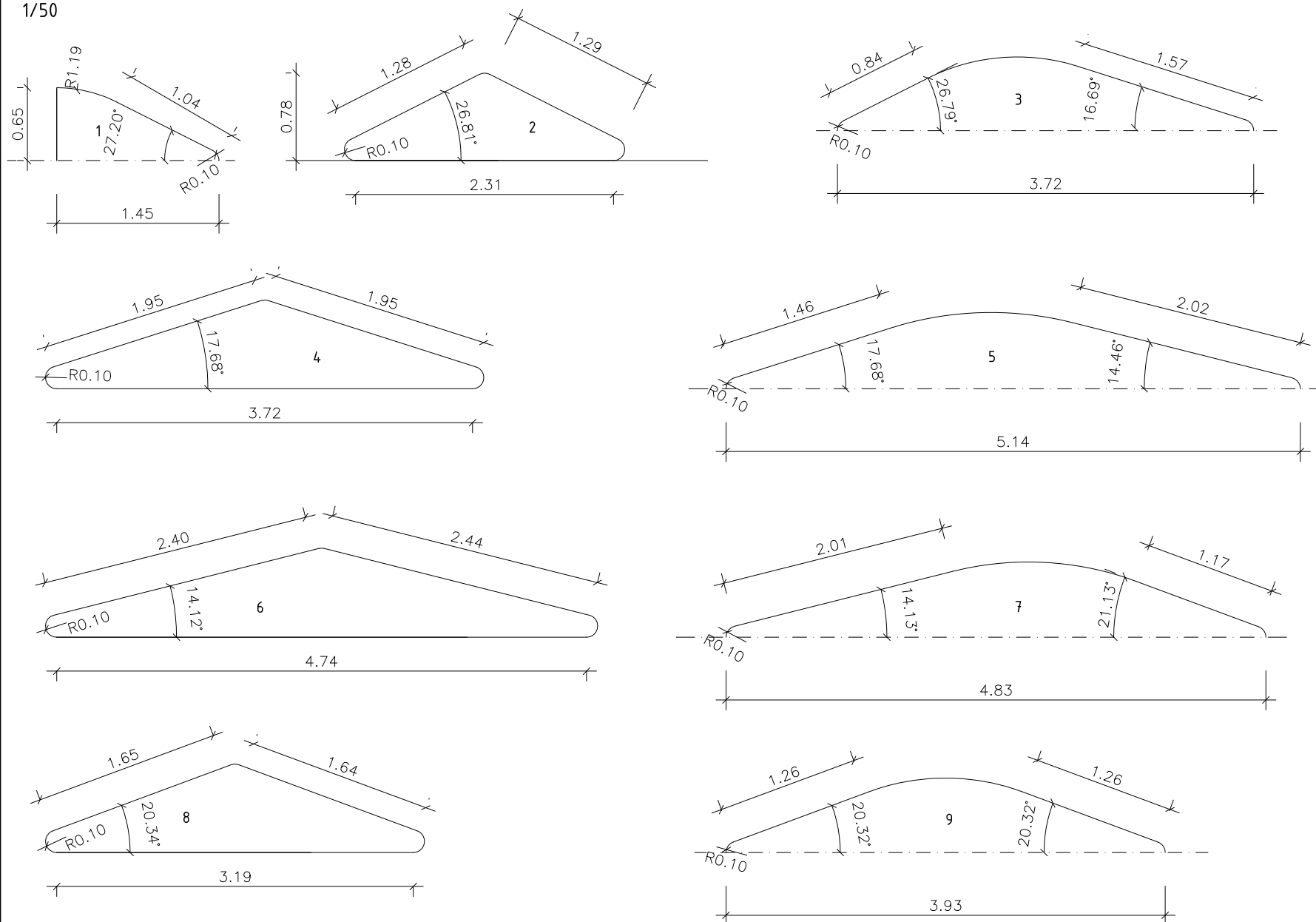
Margen dcha

Margen izq



Geometría de los aligeramientos

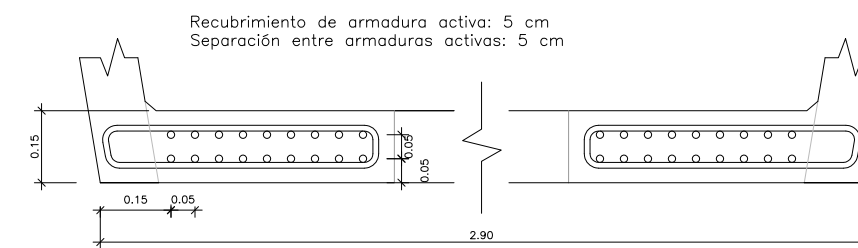
1/50



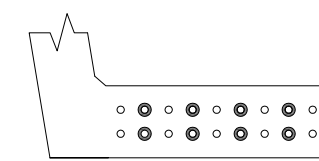
Armadura pasivo

Tipo	Rec. geométrico (mm)	Armado	Sección	L.anclaje (cm)	L.solape (cm)
15	20	4E10		25	-

Armadura activa



Envainado



Tipo	Envainado* (m)
○	Sin envainado
●	0.6

* Medidas a partir del eje longitudinal de la celosía inferior

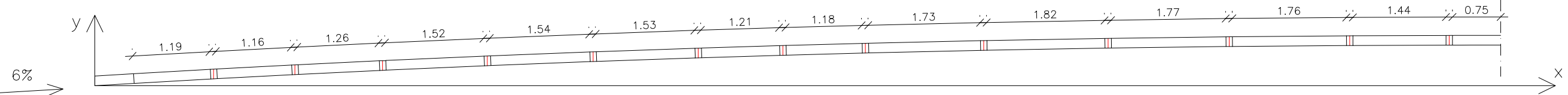
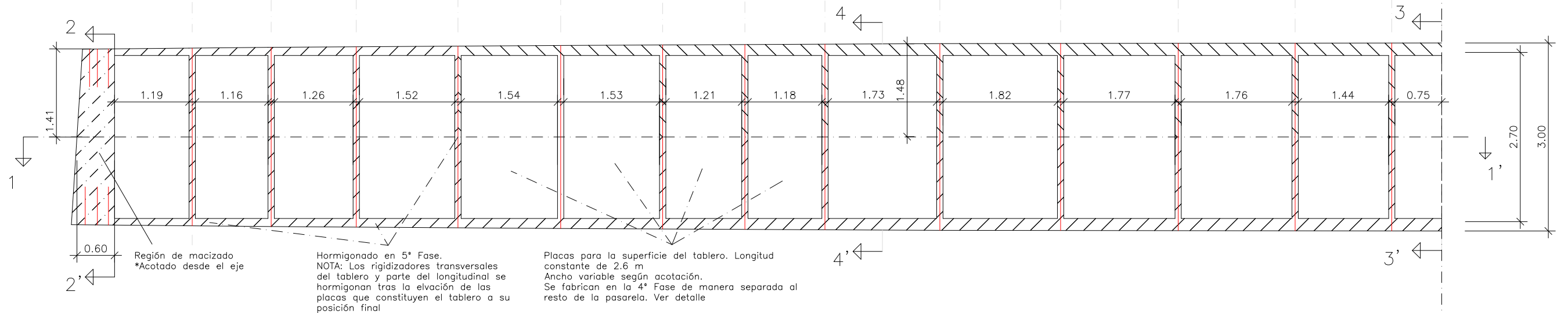
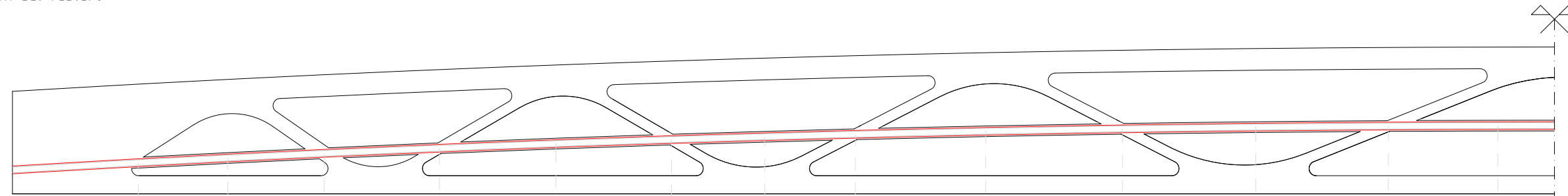
CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES

PASARELA
 - ESTRUCTURA PRIMARIA HP-150/(AC-E3/AC-V2)/2/IIIa
 - TABLERO HA-135/(AC-E3/AC-V2)/2/IIIa
 HORMIGON EN ESTRIBOS HA-30/B/20/IIIa
 ACERO PASIVO B 500 SD
 ACERO ACTIVO Y1860S7 Ø15.2 mm

NIVEL DE CONTROL DE EJECUCIÓN

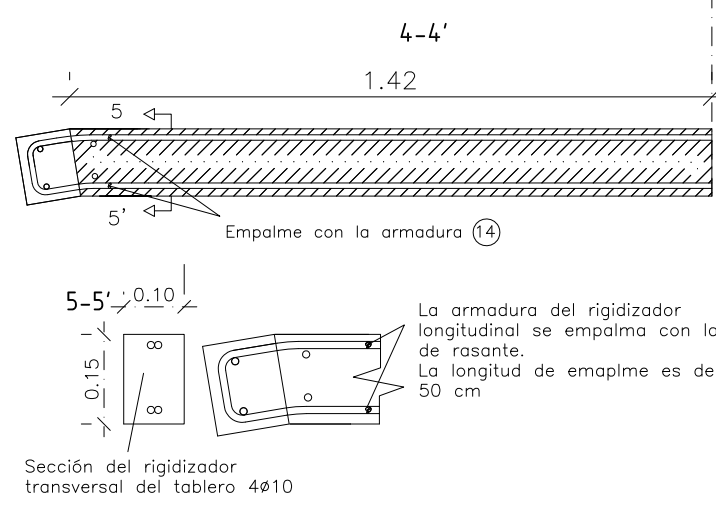
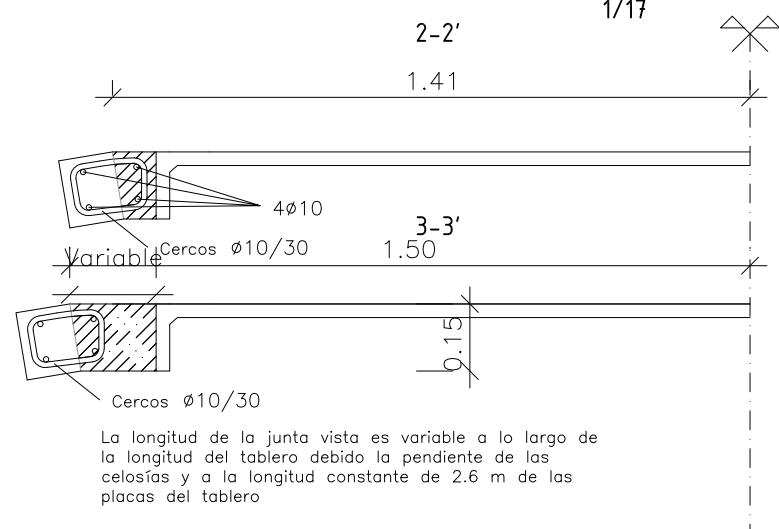
NIVEL DE CONTROL	
PASARELA	INTENSO
ESTRIBOS	INTENSO
COEFICIENTES DE MAYORACION DE ACCIONES	
SEGÓN IAP 2011	

Geometría y conexión del tablero
1/70

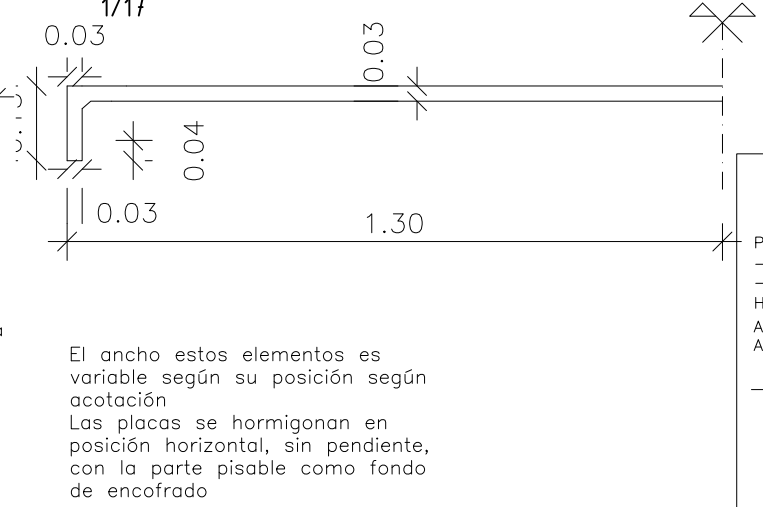


x (m)	0.00	0.60	1.84	3.10	4.45	6.07	7.71	9.34	10.64	11.92	13.75	15.68	17.55	19.41	20.96	21.75
y (m)	0.15	0.18	0.25	0.32	0.39	0.46	0.52	0.58	0.62	0.66	0.70	0.73	0.76	0.77	0.78	0.78

Secciones transversales del tablero
1/17



Placa prefabricada para el tablero
1/17



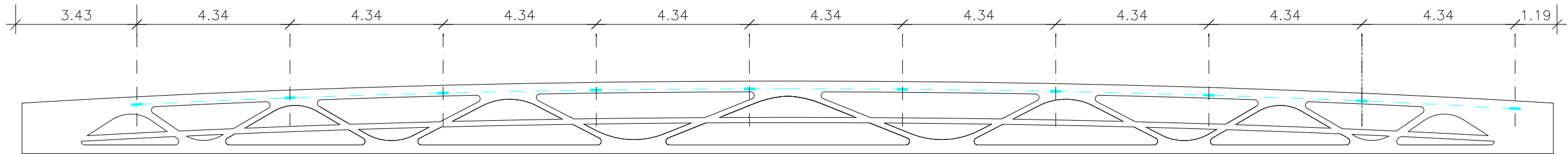
CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES

PASARELA	HP-150/(AC-E3/AC-V2)/2/IIIa
- ESTRUCTURA PRIMARIA	HA-135/(AC-E3/AC-V2)/2/IIIa
- TABLERO	HA-30/B/20/IIIa
HORMIGÓN EN ESTRIBOS	B 500 SD
ACERO PASIVO	Y1860S7 $\phi 15.2$ mm
ACERO ACTIVO	

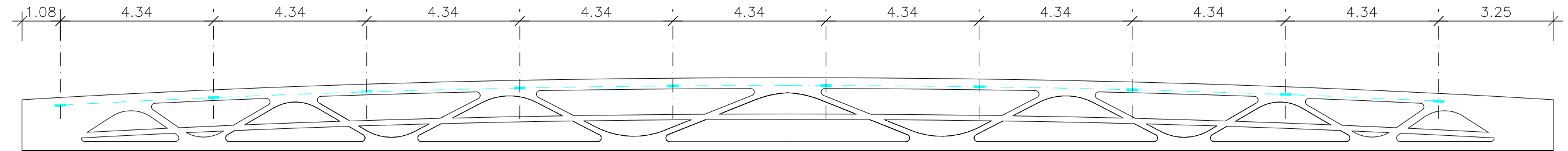
NIVEL DE CONTROL DE EJECUCIÓN

NIVEL DE CONTROL	
PASARELA	INTENSO
ESTRIBOS	INTENSO
COEFICIENTES DE MAYORACION DE ACCIONES	
SEGÚN IAP 2011	

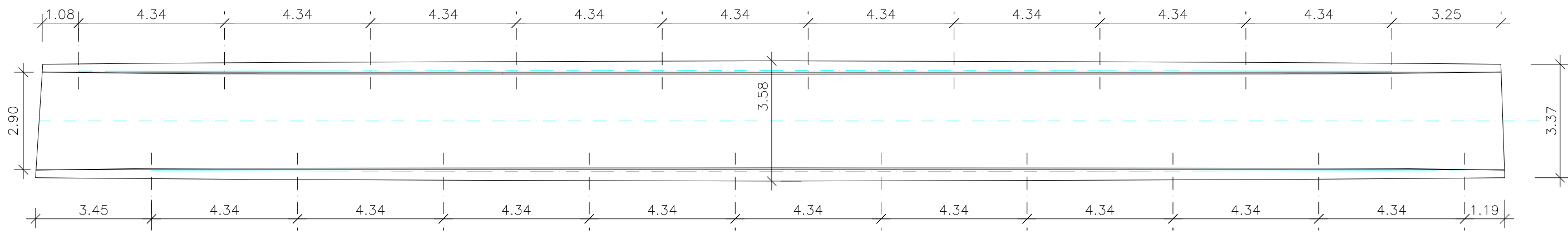
Disposición de luminarias
Alzado derecho. 1/125



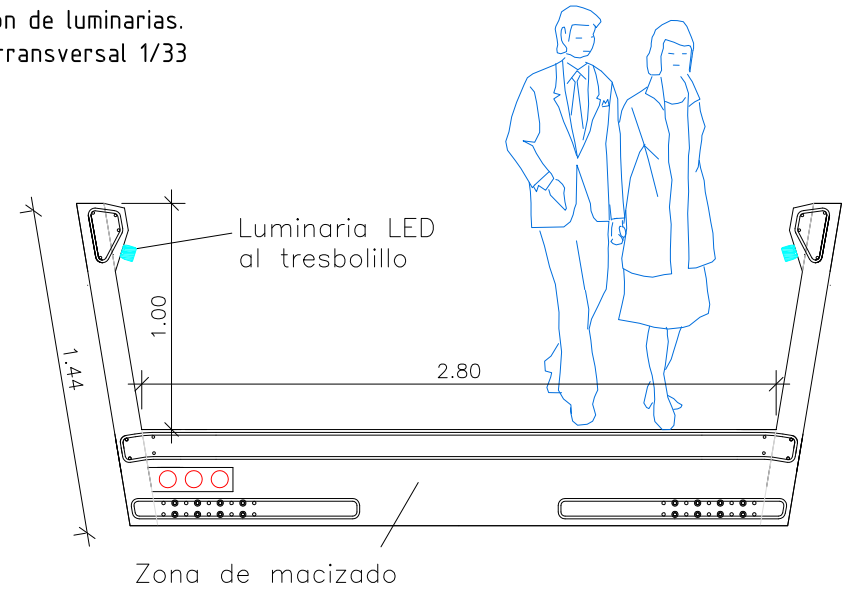
Alzado izquierdo. 1/125



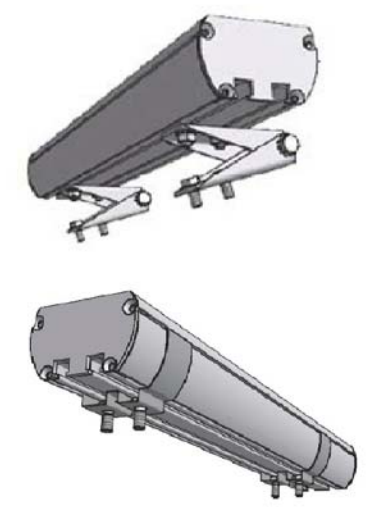
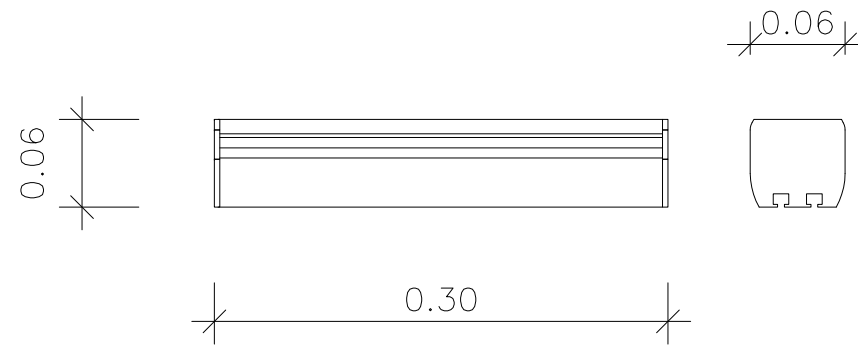
Planta. 1/125



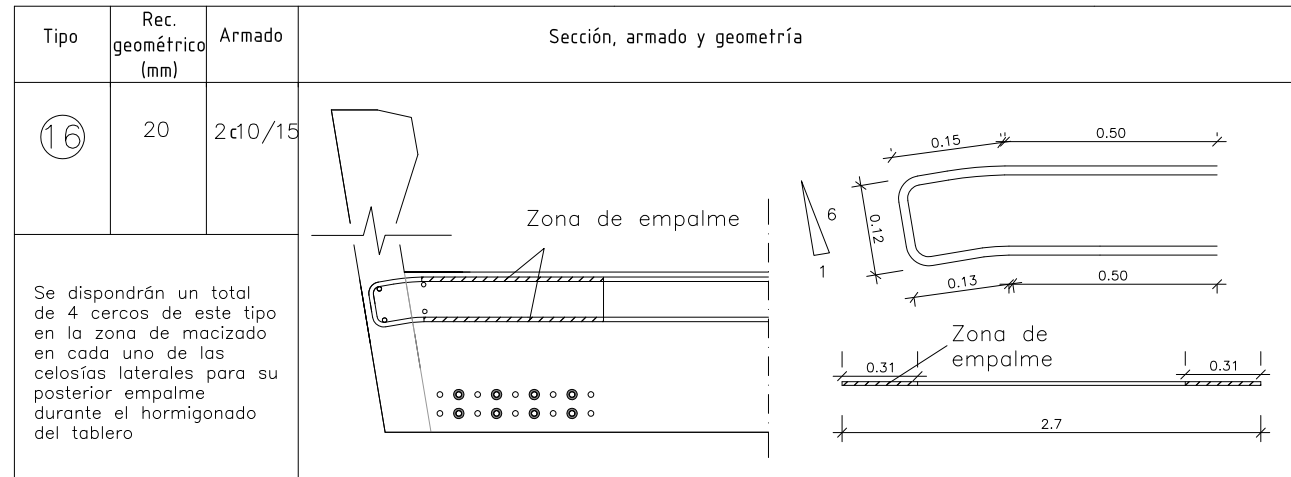
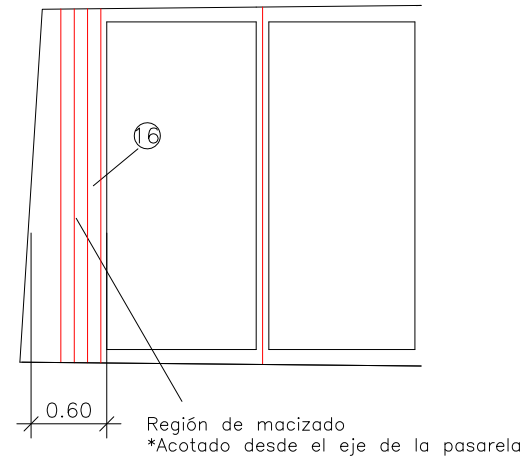
Disposición de luminarias.
Sección transversal 1/33



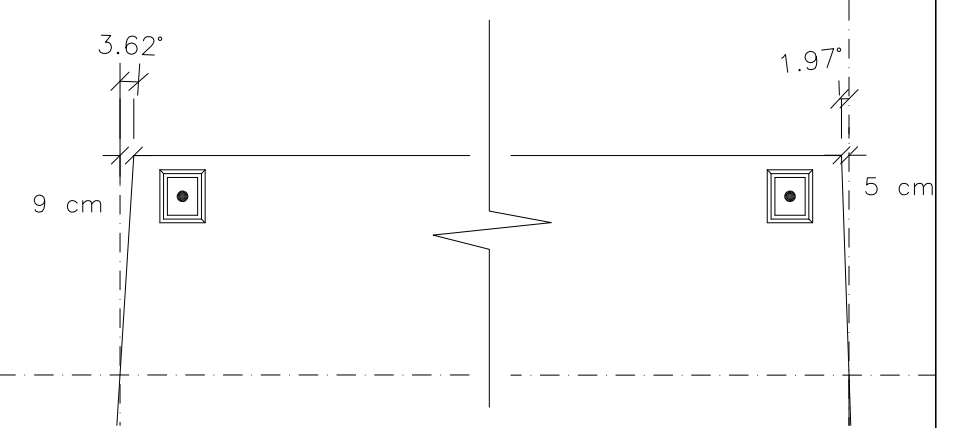
Luminaria 10 LED 220 V
1/5



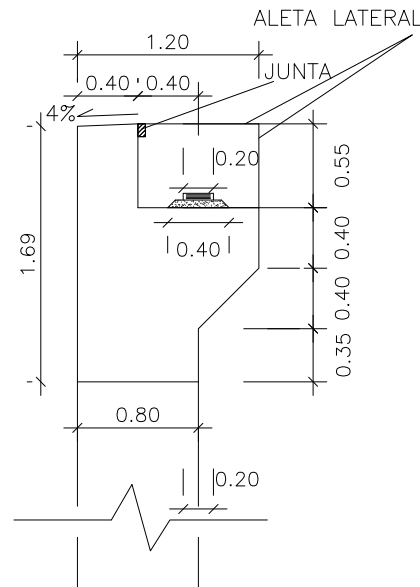
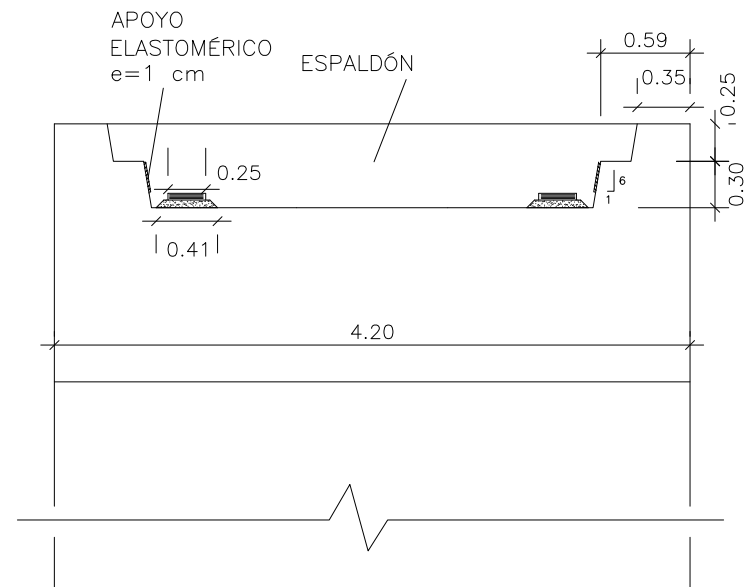
Armado y macizado en zona de apoyo de la pasarela
1/60



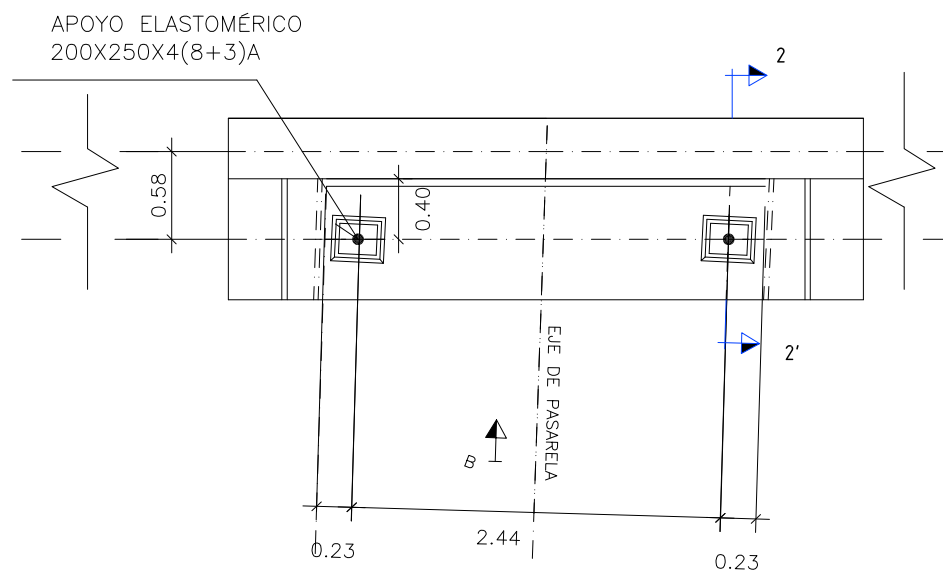
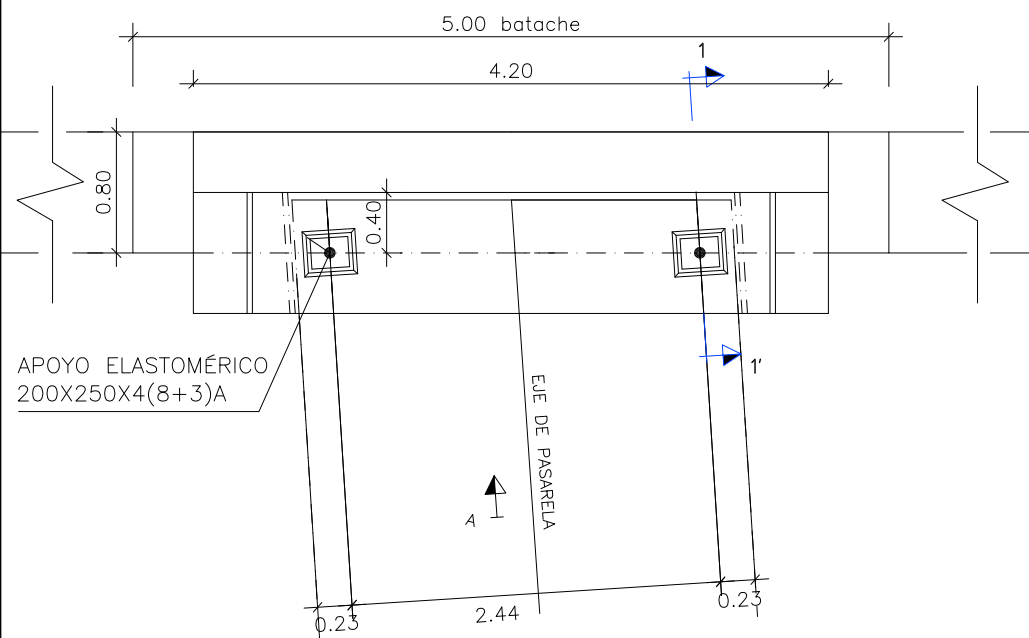
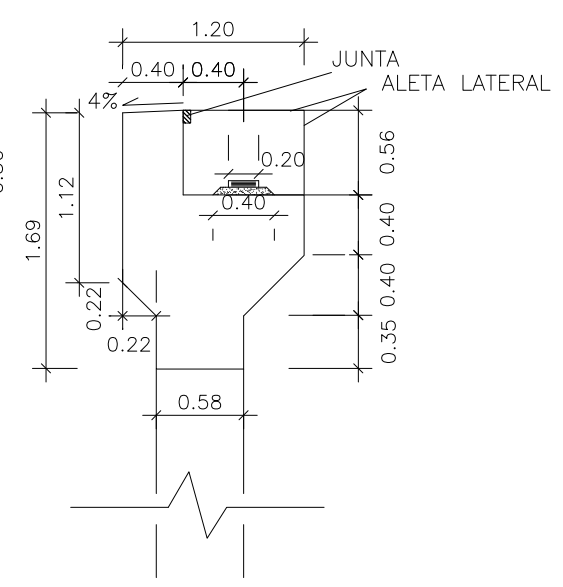
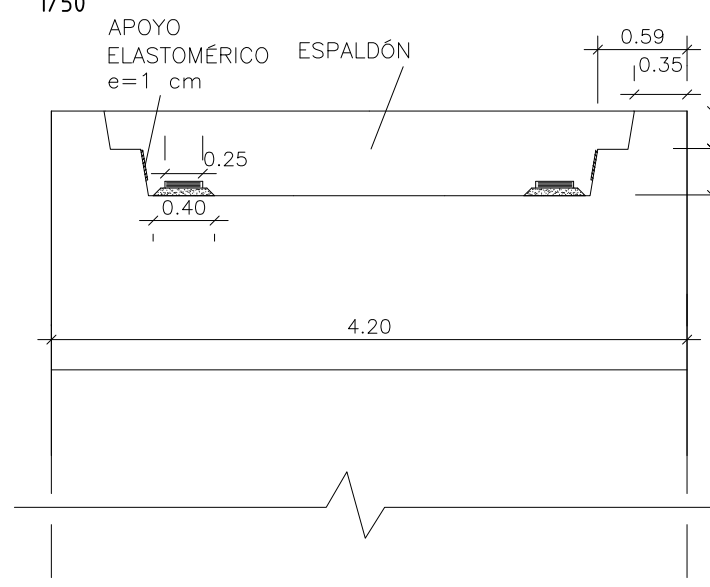
ESVIAJE MARGEN DERECHA
1/50



Geometría estribo margen derecha
1/50



Geometría estribo margen izquierda
1/50



CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

PASARELA	HP-150/(AC-E3/AC-V2)/2/IIIa
- ESTRUCTURA PRIMARIA	HA-135/(AC-E3/AC-V2)/2/IIIa
- TABLERO	HA-30/B/20/IIIa
HORMIGÓN EN ESTRIBOS	B 500 SD
ACERO PASIVO	Y1860S7
ACERO ACTIVO	Ø15.2 mm

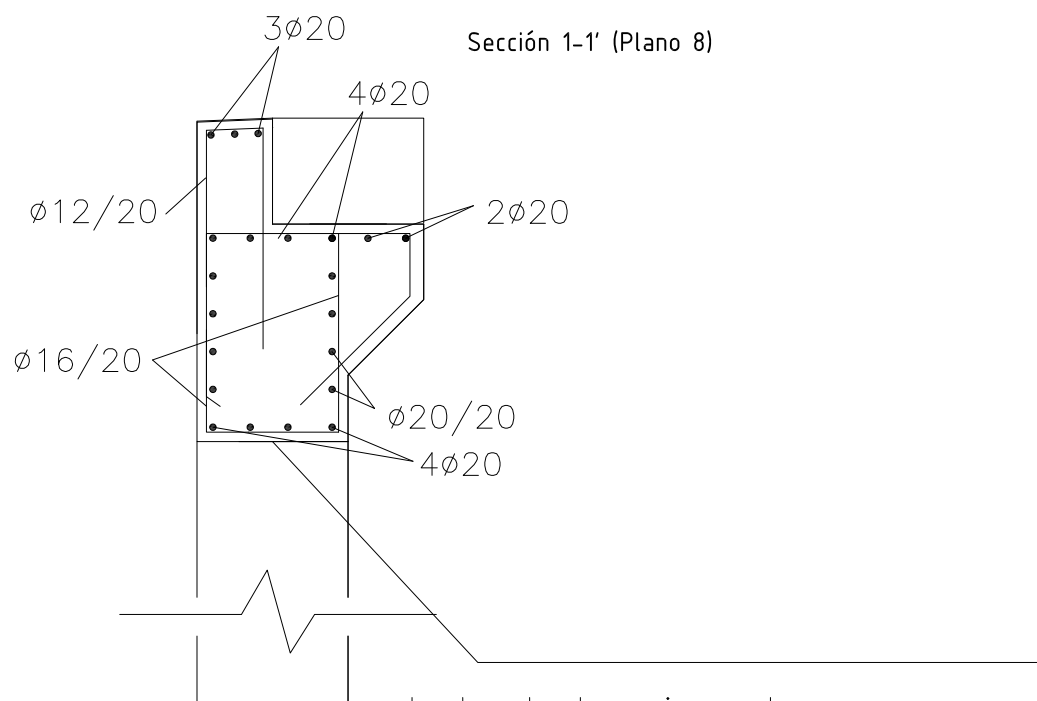
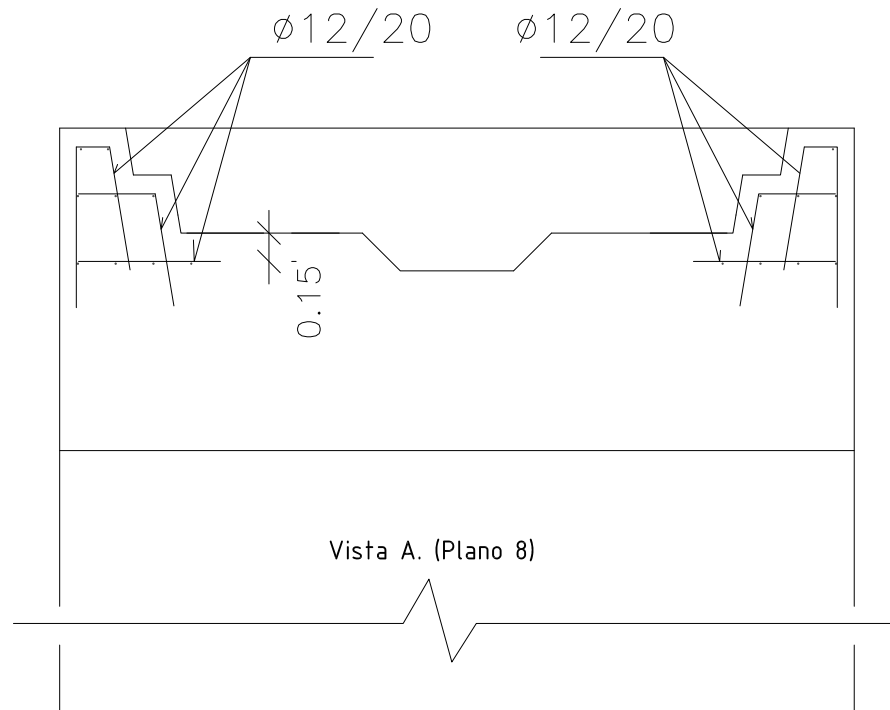
NIVEL DE CONTROL DE EJECUCIÓN

NIVEL DE CONTROL	
PASARELA	INTENSO
ESTRIBOS	INTENSO

COEFICIENTES DE MAYORACION DE ACCIONES

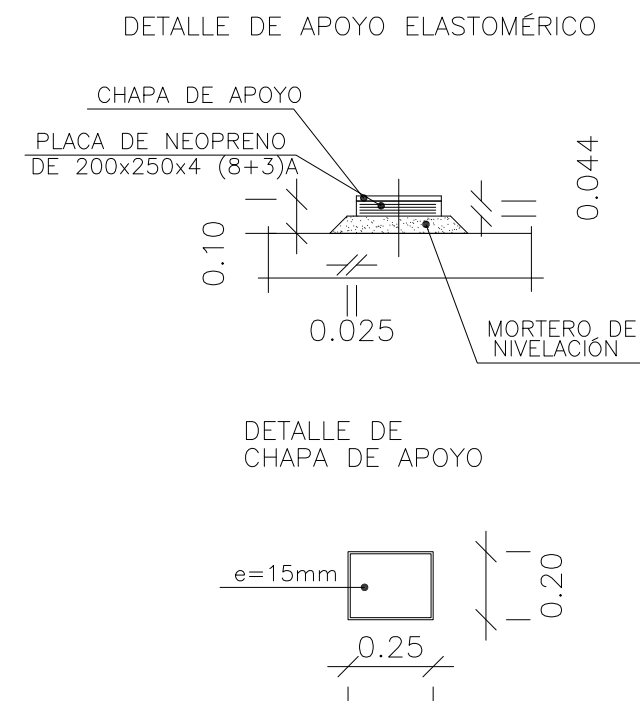
SEGÚN IAP 2011

Apoyo margen derecha. ARMADO
1/40

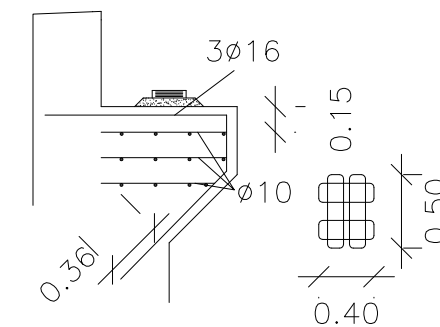


Junta de hormigonado,
rugosa, limpia y humedecida
antes de hormigonar la viga

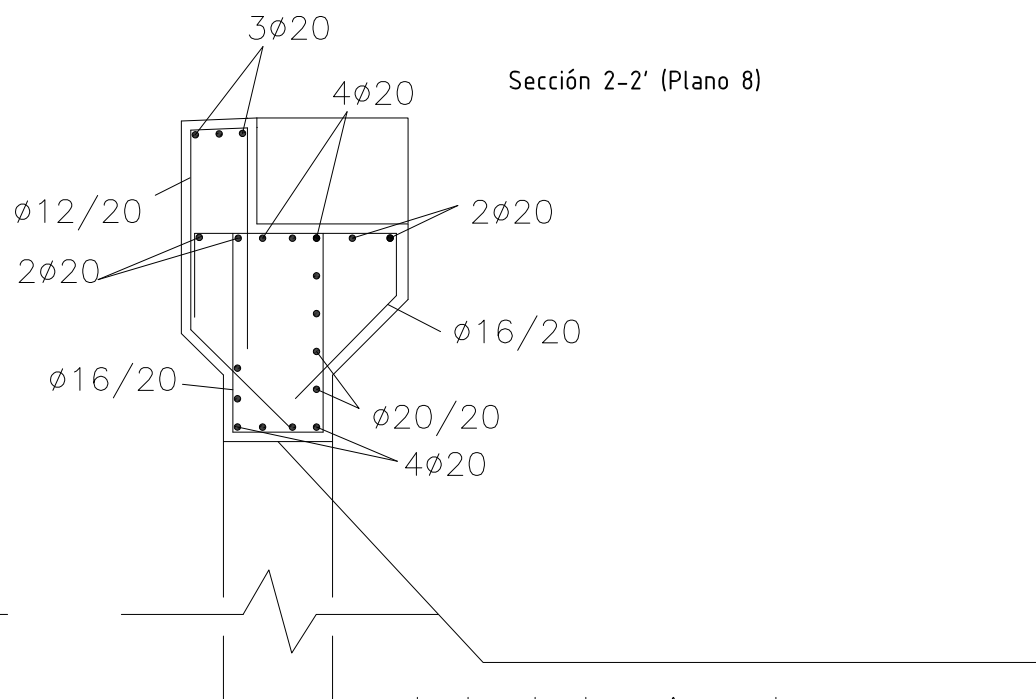
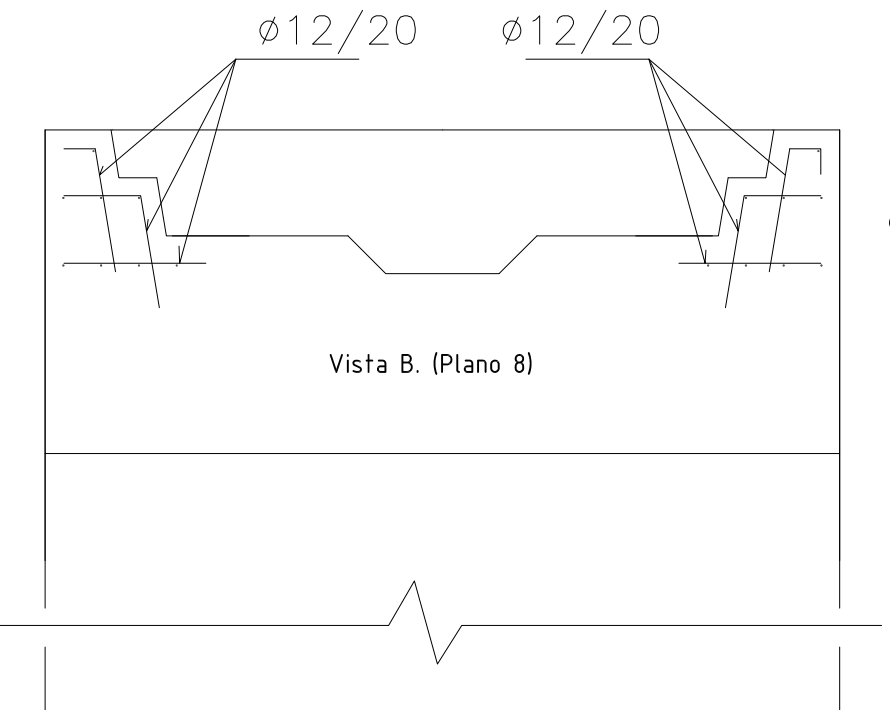
Detalles neoprenos
Sin escala



REFUERZO BAJO APOYOS



Apoyo margen izquierda. ARMADO
1/40



Junta de hormigonado,
rugosa, limpia y humedecida
antes de hormigonar la viga

CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

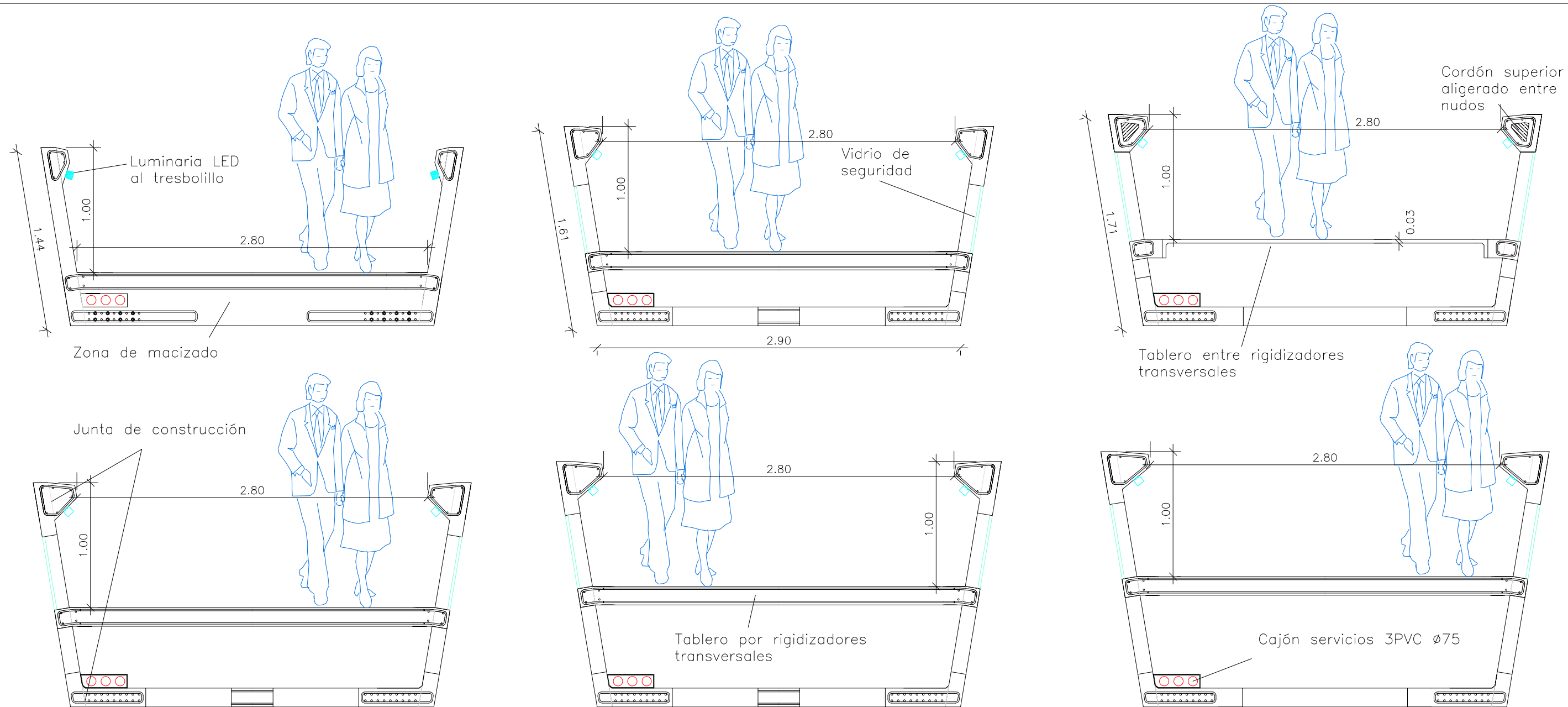
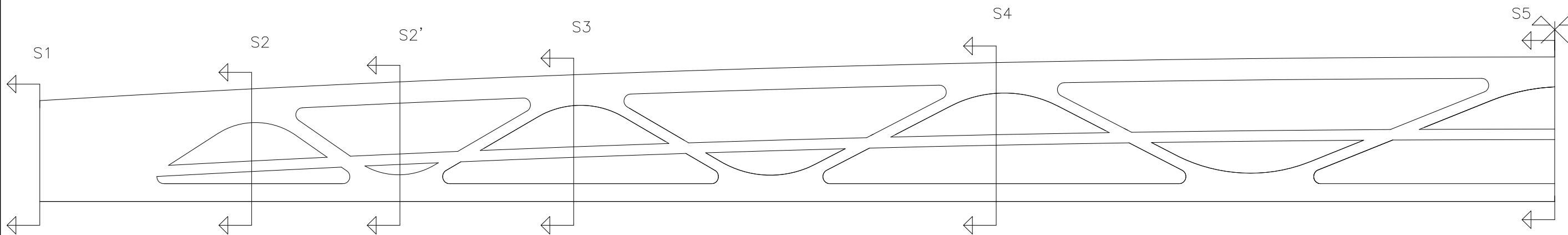
PASARELA	
- ESTRUCTURA PRIMARIA	HP-150/(AC-E3/AC-V2)/2/IIIa
- TABLERO	HA-135/(AC-E3/AC-V2)/2/IIIa
HORMIGON EN ESTRIBOS	HA-30/B/20/IIIa
ACERO PASIVO	B 500 SD
ACERO ACTIVO	Y1860S7 $\phi 15.2$ mm

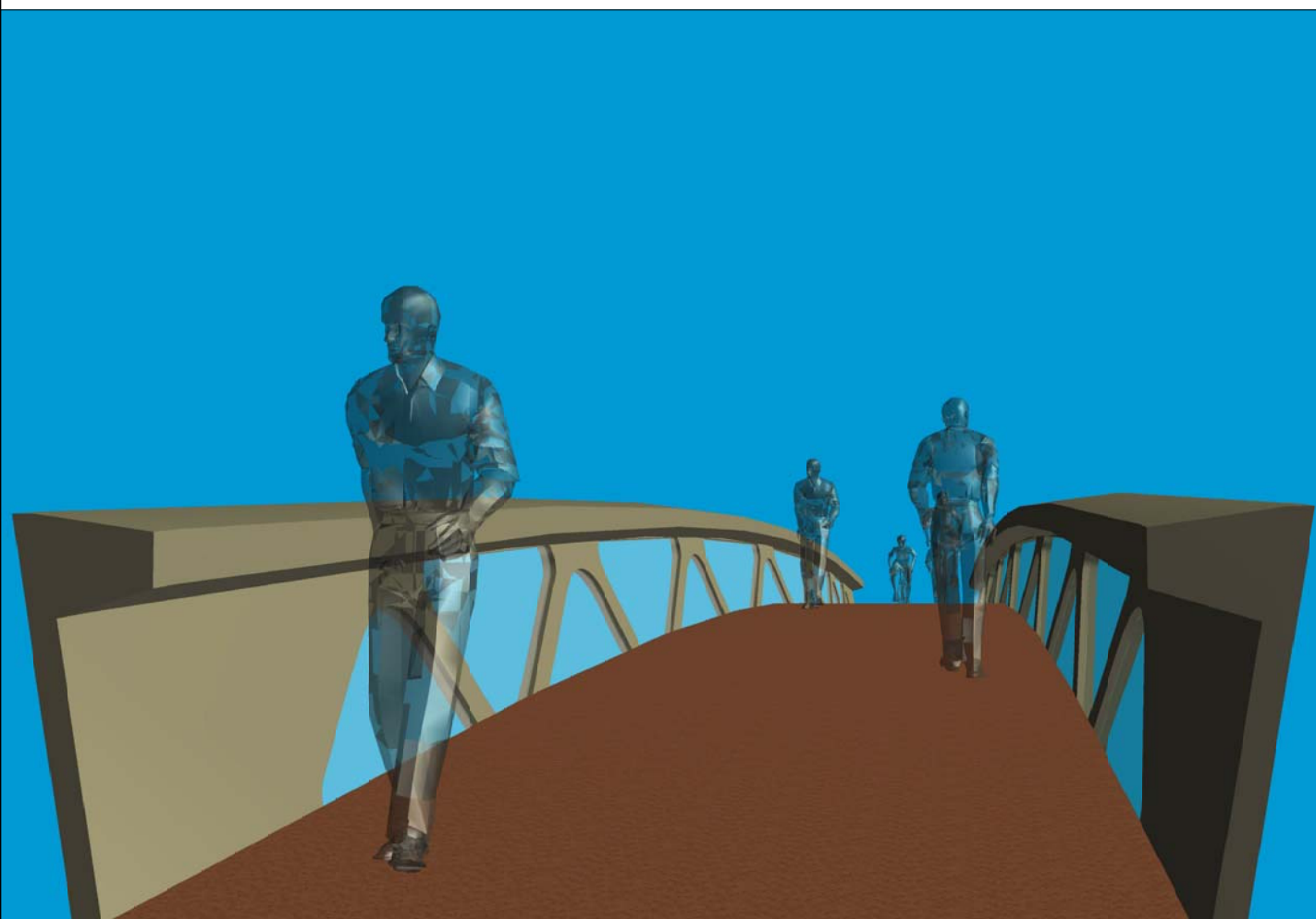
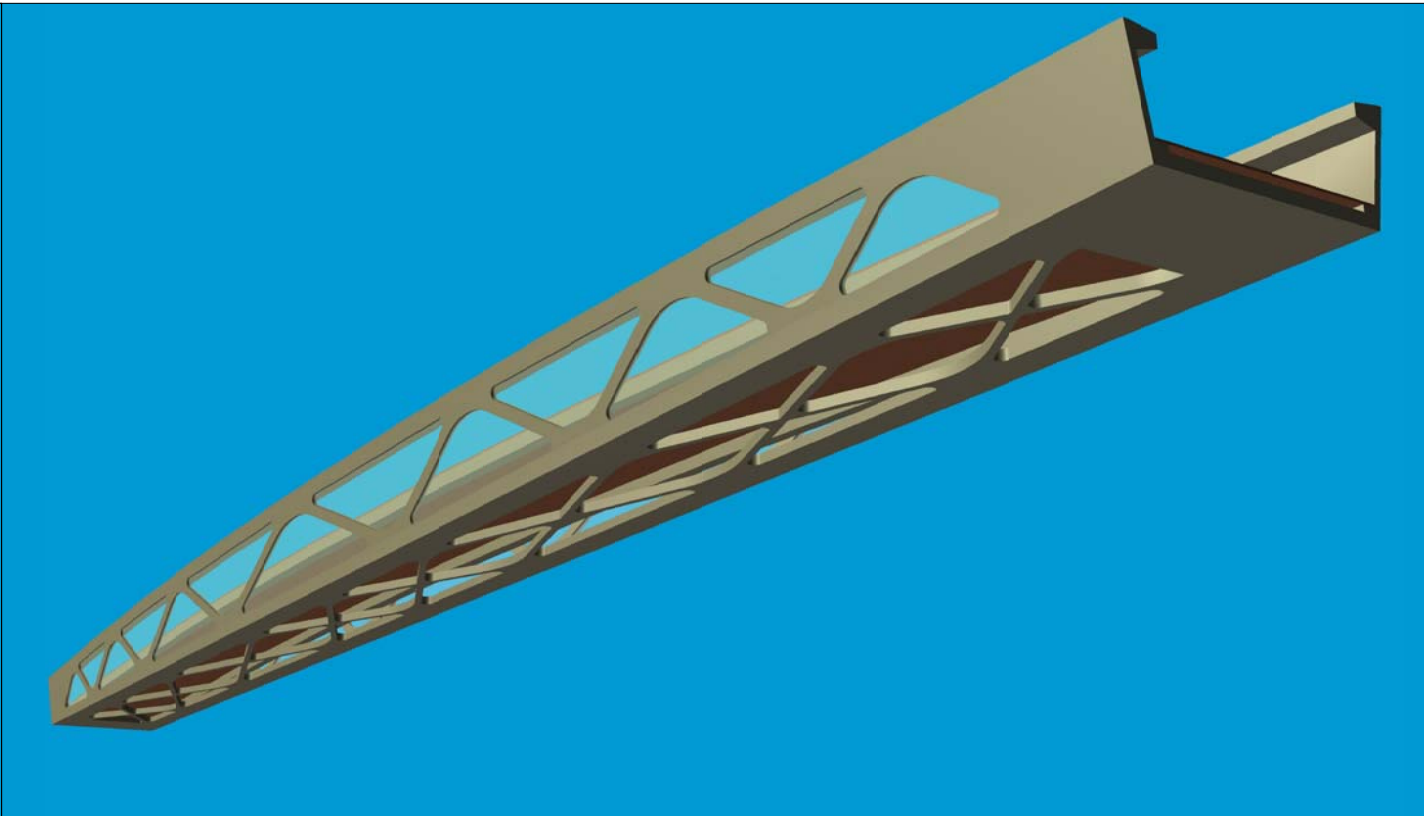
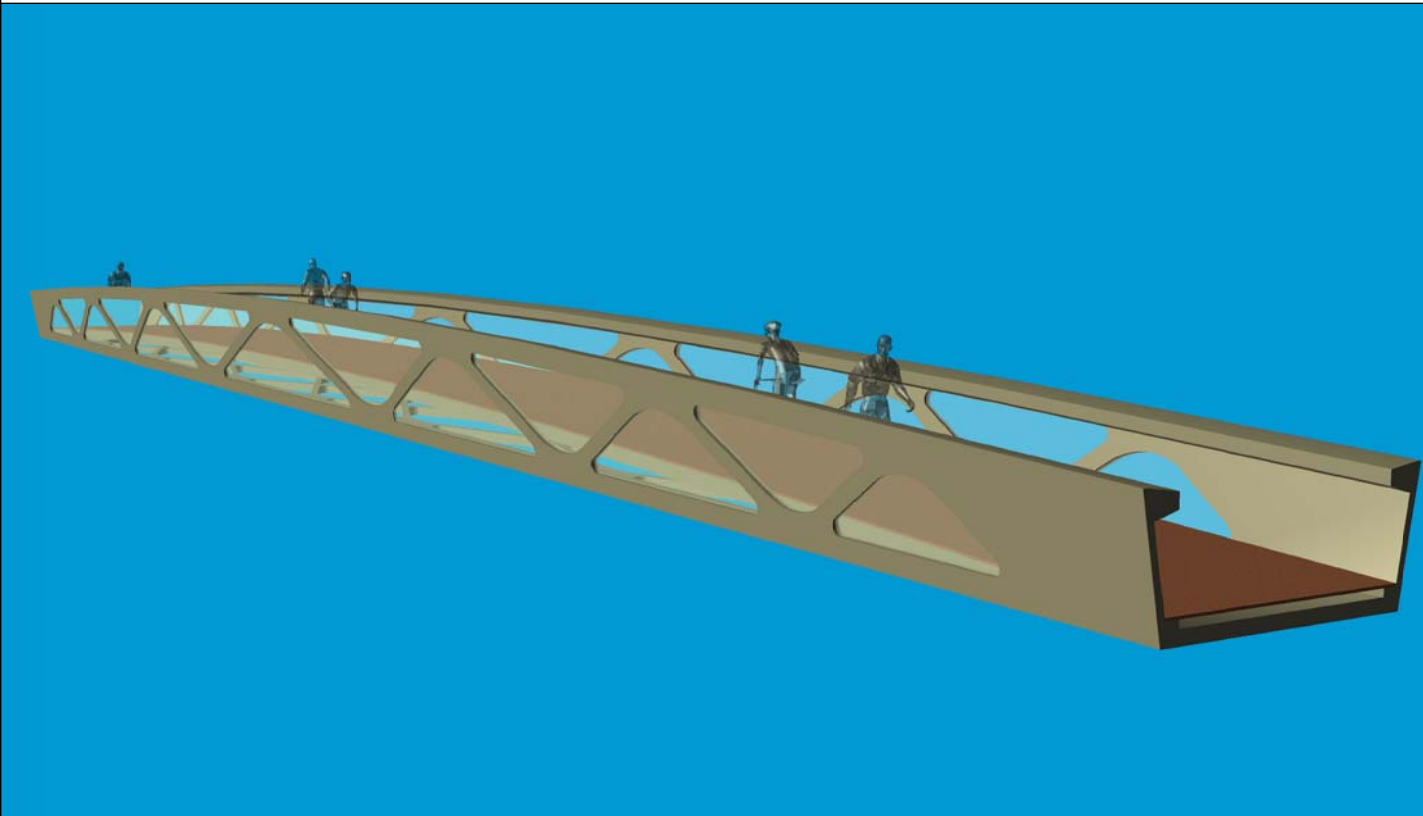
NIVEL DE CONTROL DE EJECUCIÓN

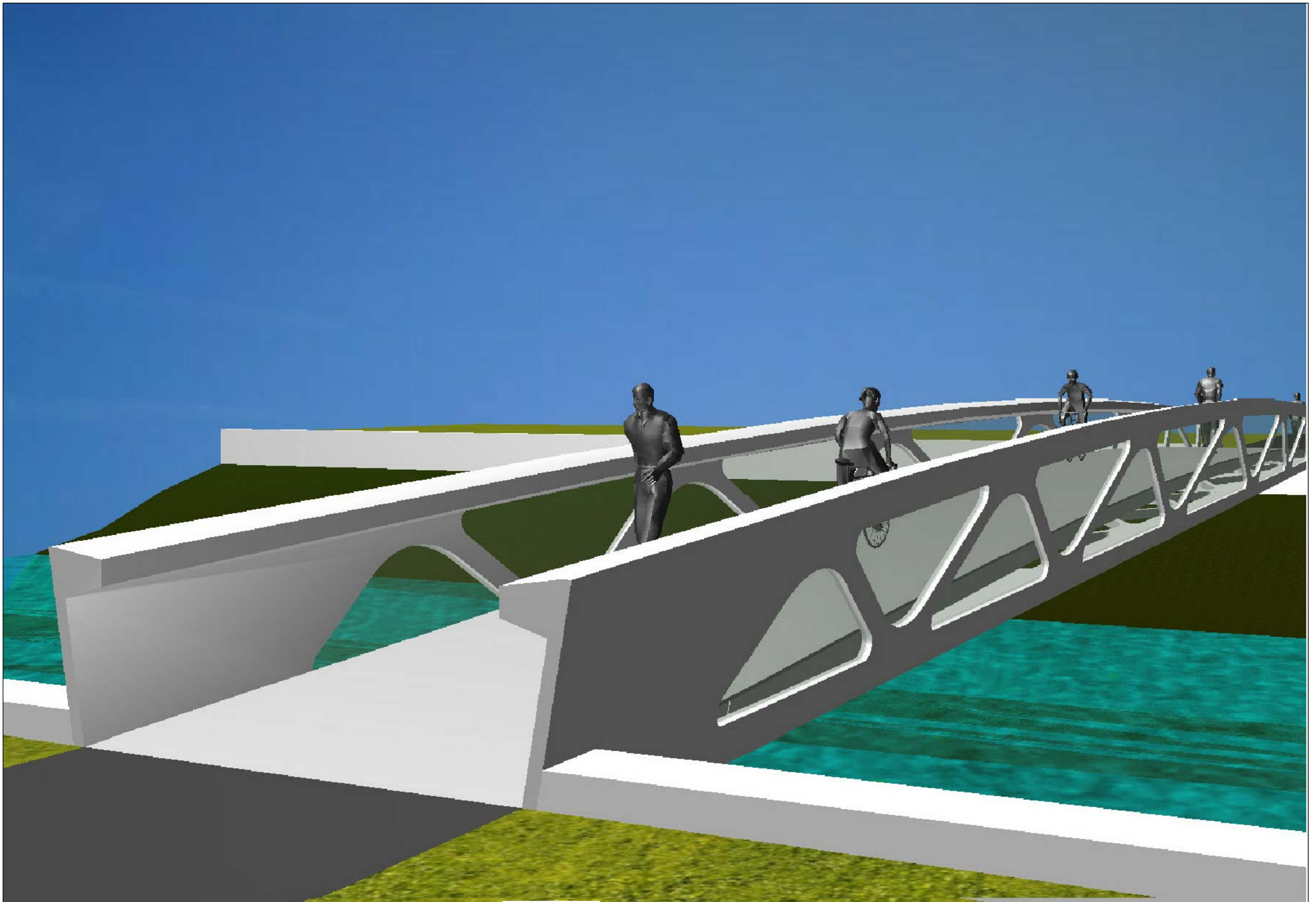
NIVEL DE CONTROL	
PASARELA	INTENSO
ESTRIBOS	INTENSO

COEFICIENTES DE MAYORACION DE ACCIONES

SEGÚN IAP 2011







		<p>PIP PLAN ESPECIAL DE APOYO A LA INVERSIÓN PRODUCTIVA EN MUNICIPIOS DE LA COMUNITAT VALENCIANA</p>	<p>EL DIRECTOR DE LAS OBRAS: PEDRO BALLESTEROS BLAISE-OMBRECHT</p>	<p>CONFORME EL CONTRATISTA: JOSÉ JAVIER VIDAL ALBALADEJO</p>	<p>ESCALA ORIGINAL A-3 sin escala</p>	<p>TÍTULO DEL PROYECTO MODIFICADO Nº 1 AL DE ACONDICIONAMIENTO DEL BARRANCO DE LAS OVEJAS EN SU TRAMO FINAL (PK 0+457 HASTA DESEMBOCADURA). ALICANTE</p>	<p>NUM. 9 12 de 12</p>	<p>TÍTULO DE PLANO PASARELA VISTAS</p>	<p>FECHA JULIO 2012 REF.</p>
--	--	---	---	---	---	--	---	--	--