

**ADVERTIMENT.** La consulta d'aquesta tesi queda condicionada a l'acceptació de les següents condicions d'ús: La difusió d'aquesta tesi per mitjà del servei TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) ha estat autoritzada pels titulars dels drets de propietat intel·lectual únicament per a usos privats emmarcats en activitats d'investigació i docència. No s'autoritza la seva reproducció amb finalitats de lucre ni la seva difusió i posada a disposició des d'un lloc aliè al servei TDX. No s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant al resum de presentació de la tesi com als seus continguts. En la utilització o cita de parts de la tesi és obligat indicar el nom de la persona autora.

**ADVERTENCIA.** La consulta de esta tesis queda condicionada a la aceptación de las siguientes condiciones de uso: La difusión de esta tesis por medio del servicio TDR ([www.tesisenred.net](http://www.tesisenred.net)) ha sido autorizada por los titulares de los derechos de propiedad intelectual únicamente para usos privados enmarcados en actividades de investigación y docencia. No se autoriza su reproducción con finalidades de lucro ni su difusión y puesta a disposición desde un sitio ajeno al servicio TDR. No se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al resumen de presentación de la tesis como a sus contenidos. En la utilización o cita de partes de la tesis es obligado indicar el nombre de la persona autora.

**WARNING.** On having consulted this thesis you're accepting the following use conditions: Spreading this thesis by the TDX ([www.tesisenxarxa.net](http://www.tesisenxarxa.net)) service has been authorized by the titular of the intellectual property rights only for private uses placed in investigation and teaching activities. Reproduction with lucrative aims is not authorized neither its spreading and availability from a site foreign to the TDX service. Introducing its content in a window or frame foreign to the TDX service is not authorized (framing). This rights affect to the presentation summary of the thesis as well as to its contents. In the using or citation of parts of the thesis it's obliged to indicate the name of the author



DOCTORATS  
INDUSTRIALS

**Build** *air*  
Inflatable Structural Solutions

Tesis Doctoral:

**NUEVO CONCEPTO DE  
PUENTE DE VIGAS  
HINCHABLES LIGERO,  
MODULAR Y PORTÁTIL**

**Carles Estruch i Tena**

Directores de tesis (UPC):

**Dr. Eugenio Oñate**  
**Dr. Benjamín Suárez**

Responsable empresa (Buildair):

**Javier Marcipar**

Barcelona, Febrero 2016

## AGRADECIMIENTOS

Antes que nada me gustaría agradecer a todos aquellos que han hecho posible esta tesis doctoral.

En primer lugar, debo mi más profundo agradecimiento a mis tutores Eugenio Oñate, Benjamín Suárez y Javier Marcipar. Esta tesis no habría sido posible sin su ayuda y su dirección, así como sus valiosos comentarios y disponibilidad para poder resolver cualquier problema que pudiese aparecer durante su desarrollo. También debo agradecer las interesantes y útiles aportaciones de Pere-Andreu Ubach cada vez que nos veíamos, las cuales me han hecho pensar de una forma más profunda en determinados aspectos de la tesis. A todos ellos quiero agradecer igualmente la confianza depositada en mí para tirar adelante este proyecto tan peculiar y a la vez apasionante.

En segundo lugar, quiero agradecer a todos mis compañeros de Buildair su apoyo en las distintas fases de desarrollo de este proyecto de investigación tan peculiar y por ayudarme a poner solución a todos los impedimentos surgidos. Mención especial para José María por su más que dilatada experiencia en sistemas de motorización y sensores, Charly por esos renders y patronajes inigualables, Iñaki por su voz crítica y capacidad de ofrecer soluciones a todo tipo de problemas, Antonio por su gran capacidad organizativa, César por comprarme todo lo que he necesitado cuando ha hecho falta, Juan por esos grandes momentos a su lado discutiendo sobre todo tipo de dudas ingenieriles, y por supuesto a Fran y Miguel por esas largas horas en taller llevando a cabo infinidad de pruebas y fabricando prototipos. Tampoco quiero dejarme a Natalia, Judith y Dani después del duro trabajo realizado para poder tirar adelante las justificaciones de este proyecto de investigación tan interesante.

Por último, y no por ello menos importante, agradecer especialmente a Judith, mi futura mujer el próximo mes de mayo y madre de nuestro pequeño Nico, por apoyarme en todo momento y animarme a trabajar duro aún cuando las fuerzas no acompañaban, especialmente estos últimos meses decisivos en la consecución de los objetivos marcados tres años atrás. Agradecimiento especial a ella, así como a mis amigos, sobretodo por todos esos momentos que no tienen nada que ver con el doctorado, que me han permitido mantener la cabeza despejada y desconectar del trabajo para luego volver de nuevo con ganas y energía.

## PREÁMBULO

La presente tesis doctoral ha sido realizada dentro del Pla de Doctorats Industrials del Govern de la Generalitat de Catalunya (en colaboración con las universidades públicas y privadas), que tiene por objetivos contribuir a la competitividad e internacionalización del tejido industrial catalán, retener el talento y situar a los doctorandos y doctorandas en condiciones de desarrollar proyectos de I+D+i en una empresa.

La tesis es el resultado de un trabajo de investigación llevado a cabo entre los años 2013 y 2016 dentro de la empresa Buildair para desarrollar nuevas líneas estratégicas comerciales, en estrecha colaboración con el Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE) y la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports de Barcelona (UPC). Ésta se ha desarrollado principalmente dentro del marco del proyecto AIR-BRIDGE [1], el cual forma parte de la convocatoria PROVA'T de la agrupación CERCA (Centres de Recerca de Catalunya), que subvenciona proyectos de investigación con fondos europeos. Este proyecto ha sido desarrollado en todas sus fases por el presente doctorando, y el cual es reflejo directo de todo el trabajo realizado hasta la fecha.

Durante estos últimos 3 años he tenido la oportunidad de llevar a cabo un proyecto de investigación de principio a fin. Desde sus inicios, partiendo de unos pocos artículos técnicos sobre una tecnología conocida con el nombre de Tensairity, pasando por un análisis exhaustivo de todo tipo de alternativas existentes, seguido de una fase de diseño y cálculo de pequeños prototipos para probar y consolidar los conceptos básicos, para terminar diseñando y fabricando un prototipo a escala real de Puente de Vigas Hinchables Ligero, Modular y Portátil, el cual se ha testeado, validado y presentado en sociedad. Ésto me ha permitido desarrollar mis aptitudes, aprendiendo de las dificultades y creciendo cada día personal y profesionalmente como Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, investigando en la empresa Buildair.

## RESUMEN

En la presente tesis doctoral se propone desarrollar, construir y validar experimentalmente un nuevo Concepto de Puente de Vigas Hinchables Ligero, Modular y Portátil (PVH-LMP) para el transporte en superficie de vehículos, que utiliza como elemento básico estructural para aguantar las cargas vigas hinchadas con aire a baja presión fabricadas con tejidos compuestos de altas prestaciones.

A pesar de las características prometedoras del concepto, este tipo de vigas todavía no han llegado al mercado, y están limitadas a usos académicos y en grupos de investigación lejos del sector industrial productivo. Prototipos a escala de PVH-LMP, utilizando gran variedad de tejidos comerciales, han sido construidos por Buildair en los últimos años y usados para demostrar la viabilidad del concepto de dichas vigas.

Con el fin de alcanzar estos objetivos, el trabajo desarrollado en esta tesis se ha llevado a cabo en diversas fases:

En la primera fase (capítulo 2) se analiza el estado del arte en lo referente a estructuras hinchables, así como las alternativas utilizadas actualmente como puentes portátiles de despliegue rápido, comparadas con la propuesta actual.

En una segunda fase (capítulo 3) se estudia en profundidad el concepto estructural Tensairity a través de las referencias previas para poder adaptarlo al diseño del PVH-LMP. Asimismo se han estudiado las posibles normativas aplicables para esta tipología de estructuras.

A partir de las conclusiones obtenidas en las dos primeras fases, en la tercera fase (capítulo 4) se lleva a cabo un estudio y selección de alternativas de diseño, así como un cuidadoso estudio de los materiales, teniendo en cuenta todos los requisitos que se deben cumplir.

Con los requisitos claros, la cuarta fase (capítulo 5) se realizan algunos ensayos previos mediante pequeños prototipos a escala para validar experimentalmente los conceptos adquiridos en las fases anteriores, así como el software de cálculo a utilizar. Posteriormente se elabora un prediseño y cálculo de la estructura antes de obtener el diseño constructivo final con sus planos y demás elementos constructivos asociados. Como colofón del proceso se fabrica y valida experimentalmente un prototipo a escala real de una viga de PVH-LMP de 14 metros de longitud capaz de resistir el paso de vehículos de hasta 30 toneladas de peso. Tras los ensayos de esta primera

viga, gracias al conocimiento adquirido se ha procedido a la elaboración de un rediseño y fabricación de un segundo prototipo de viga de PVH-LMP, la cual ha sido también testeada. Por último se han estudiado aspectos de operatividad transportando y montando el prototipo de PVH-LMP en un evento real de demostración.

La quinta fase de esta tesis (capítulo 6) ha sido dedicada a analizar las perspectivas industriales de este tipo particular de puentes a través de un pequeño estudio de mercado, análisis coste-beneficio y estudio de viabilidad económica en comparación con las principales soluciones alternativas actuales.

En una última fase (capítulo 8) se ha revisado todo el trabajo hecho identificando los aspectos a mejorar con el fin de adaptar el prototipo de PVH-LMP para su futura comercialización y uso en situaciones prácticas reales.

# Índice

<b>1. Motivación y objetivos</b>	<b>1</b>
<b>2. Antecedentes y estado del arte</b>	<b>4</b>
2.1. Antecedentes relevantes . . . . .	4
2.2. Tecnología de estructuras hinchables . . . . .	5
2.3. Estudios sobre vigas hinchables . . . . .	6
2.4. Alternativas existentes de puentes actuales . . . . .	8
<b>3. Tecnología Tensairity. Normativa</b>	<b>10</b>
3.1. Tecnología Tensairity: ventajas introducidas . . . . .	10
3.2. Estudio y selección de normativas aplicables . . . . .	12
<b>4. Nuevo concepto de PVH-LMP</b>	<b>16</b>
4.1. Estudio y selección de alternativas de diseño . . . . .	16
4.1.1. Forma del tubo hinchable . . . . .	16
4.1.2. Sección transversal de la viga . . . . .	20
4.1.3. Tamaño de los elementos . . . . .	21
4.1.4. Otros requerimientos . . . . .	21
4.2. Selección de materiales . . . . .	21
4.2.1. Tejidos tubo hinchable . . . . .	23
4.2.2. Material FRP tablero . . . . .	23

4.2.3. Eslingas Dyneema . . . . .	25
4.2.4. Elementos metálicos . . . . .	25
4.3. Requerimientos del PVH-LMP . . . . .	27
<b>5. Validación de prototipos de PVH-LMP</b>	<b>28</b>
5.1. Ensayos previos . . . . .	28
5.2. Prediseño . . . . .	30
5.3. Cálculo . . . . .	33
5.3.1. Modelo físico . . . . .	33
5.3.2. Modelo analítico simplificado: estimación de esfuerzos en elementos . . . . .	37
5.3.3. Simulación numérica . . . . .	39
5.3.4. Efectos dinámicos . . . . .	41
5.4. Diseño constructivo . . . . .	41
5.5. Fabricación de un prototipo de viga . . . . .	43
5.5.1. Fabricación del tubo hinchable . . . . .	44
5.5.2. Fabricación del tablero de paneles y perfiles FRP . . . . .	49
5.5.3. Fabricación de elementos auxiliares para la unión de la eslinga con el tubo y el tablero . . . . .	52
5.5.4. Fabricación de apoyos de acero para los extremos de la viga . . . . .	53
5.5.5. Resultado final . . . . .	54
5.6. Ensayo del prototipo de viga . . . . .	56
5.7. Rediseño y fabricación de un prototipo de viga mejorado . . . . .	58
5.7.1. Cambio del elemento de tracción . . . . .	58
5.7.2. Modificación de la longitud del tubo . . . . .	59
5.7.3. Mejoras en los perfiles en U de los paneles FRP de la viga . . . . .	60
5.7.4. Fabricación de un prototipo de viga mejorado . . . . .	61



5.8. Ensayo del prototipo de viga mejorado . . . . .	62
5.8.1. Simulación numérica del prototipo de viga mejorado . . . . .	65
5.9. Operatividad del PVH-LMP . . . . .	67
5.9.1. Transporte . . . . .	67
5.9.2. Montaje . . . . .	69
5.10. Actividades de difusión y demostración . . . . .	75
<b>6. Perspectivas Industriales del PVH-LMP</b>	<b>80</b>
6.1. Estudio de mercado . . . . .	80
6.1.1. Estimación del volumen de la demanda . . . . .	80
6.1.2. Análisis de competencia . . . . .	81
6.1.3. Interés de potenciales compradores . . . . .	83
6.1.4. Canales de distribución . . . . .	83
6.2. Análisis coste-beneficio . . . . .	84
6.3. Viabilidad económica . . . . .	85
6.3.1. Mercado potencial . . . . .	85
6.3.2. Comparación de costes con soluciones análogas . . . . .	91
<b>7. Conclusiones</b>	<b>93</b>
7.1. Aportaciones de la tesis . . . . .	96
7.1.1. Aportaciones de carácter conceptual estructural . . . . .	96
7.1.2. Aportaciones de carácter industrial . . . . .	97
<b>8. Propuestas de desarrollo futuro</b>	<b>98</b>
8.1. Mejora de la estabilidad del puente frente a cargas estáticas y dinámicas . . . . .	99
8.1.1. Análisis de estabilidad en fase de montaje y bajo cargas de tráfico . . . . .	99
8.1.2. Análisis aero-elástico bajo cargas de viento . . . . .	99

8.2. Diseño del sistema de barandillas, elementos de apoyo sobre el terreno y cimentación . . . . .	100
8.2.1. Diseño del sistema de barandillas . . . . .	100
8.2.2. Diseño de la cimentación y apoyos . . . . .	100
8.3. Mejora del sistema de embalaje, transporte, despliegue y monitorización . . . . .	101
8.3.1. Sistemas de plegado y embalaje eficiente de los componentes del puente . . . . .	101
8.3.2. Sistemas de transporte eficiente de los componentes del puente . . . . .	101
8.3.3. Métodos para el despliegue y desmontaje rápidos . . . . .	101
8.3.4. Sistemas de monitorización . . . . .	102
8.4. Definición de las directrices de diseño, fabricación y operación	102
8.4.1. Directrices para el diseño, análisis y fabricación . . . . .	102
8.4.2. Directrices para el transporte, embalaje y operatividad	102
8.5. Escalabilidad de la solución a puentes de mayores luces . . . . .	103
<b>A. Ensayo de un prototipo de viga de PVH-LMP de 4 metros de longitud</b>	<b>109</b>
<b>B. Hojas Excel de cálculo analítico simplificado</b>	<b>119</b>
<b>C. Planos de diseño del PVH-LMP</b>	<b>124</b>
<b>D. Folleto Air-Bridge</b>	<b>129</b>
<b>E. Artículos y recortes de prensa</b>	<b>132</b>

# Capítulo 1

## Motivación y objetivos

Los cientos de millones de víctimas, los miles de millones de Euros que cuesta anualmente y las consecuencias en la vida humana que ocasionan los desastres naturales como terremotos e inundaciones, hace hoy más que nunca importante tomar medidas de prevención, acción estratégica y reconstrucción. Uno de los problemas más graves es la destrucción de vías de transporte que imposibilitan una evacuación de emergencia, el abastecimiento de recursos y la reconstrucción de las zonas destruidas, dejando grandes concentraciones de seres humanos incomunicados y sin ayuda.



Figura 1.1: Ejemplos de puentes destruidos debido a catástrofes naturales

La construcción de puentes es una tarea que normalmente puede llevar meses o incluso años, por eso en estos casos las alternativas de puentes temporales de despliegue rápido son indispensables. Sin embargo las limitaciones de peso, portabilidad e instalación continúan siendo un gran impedimento y generan grandes dificultades operativas.

Históricamente, los usuarios y proveedores principales de este tipo de soluciones han sido el ejército, los organismos internacionales responsables de la ayuda humanitaria en las catástrofes y las constructoras.

Precisamente éstas últimas, las constructoras, también pueden requerir puentes temporales como elemento auxiliar en obra, con lo que también puede haber grandes posibilidades operativas y comerciales en este sector. Por otro lado se puede pensar en utilizar este tipo de puentes como una aplicación con valor añadido para los nuevos materiales.

Con el objetivo de resolver los problemas operativos comentados anteriormente, se pretende desarrollar la tecnología neumática patentada con el nombre de Tensairity para la fabricación de un prototipo de "Puente de Vigas Hinchables Ligero, Modular y Portátil"(PVH-LMP). Una vez construido será el puente temporal más ligero, modular, transportable y fácil de montar disponible, con mucha mejor relación carga/peso en comparación con las alternativas de despliegue rápido existentes.



Figura 1.2: Simulación del Puente de Vigas Hinchables Ligero, Modular y Portátil

Los principales retos en el desarrollo del nuevo PVH-LMP son el uso de tejidos ultra-resistentes para el elemento hinchable, el uso de materiales polímeros o de otro tipo como alternativa a los cables en el elemento de tracción, el incremento de capacidad resistente en comparación con estructuras de acero convencionales, el uso de nuevos elementos de compresión en las vigas permitiendo su plegado después del deshinchado, asegurar la supresión del pandeo en el elemento de compresión mediante una mejora en el apoyo elástico aportado por el tubo hinchable, mejorar la extraordinaria ligereza y adaptabilidad permitiendo un rápido y simple montaje y desmontaje, así como un reducido volumen de almacenamiento y fácil transporte. Estas propiedades únicas harán del PVH-LMP un producto extremadamente atractivo para el transporte en superficie de vehículos, así como para muchas otras aplicaciones en ingeniería civil.

## Capítulo 2

# Antecedentes y estado del arte

### 2.1. Antecedentes relevantes

Más de la mitad de las superciudades a nivel mundial (aquellas con poblaciones entre los 2-15 millones de habitantes), están en grave riesgo de ser afectados por un terremoto de gran intensidad (7 grados o mayor) según advierte Eric Calais, Sismólogo del programa de desarrollo de las Naciones Unidas (UNDP) [2, 3]. Estas ciudades también se encuentran a merced de catástrofes sociales e incuantificables pérdidas económicas derivadas de los desastres naturales. En tan sólo 35 segundos, el terremoto a Haití de 2010 dejó pérdidas superiores al 100% del PIB y varios huracanes entre 2004 y 2008 habían costado ya más del 25% del mismo.

Según un estudio del Fondo Monetario Internacional (FMI), en los últimos años, las pérdidas económicas causadas por los desastres naturales han promediado 40.000 millones de dólares al año (estudio a 10 años que no considera los más de 100.000 millones de dólares de 1999 y la escalada de crecimiento anual de los últimos años [4]), lo que implica un crecimiento real de más de siete veces en relación a las pérdidas por estos fenómenos en los años sesenta (Freeman, Keen y Mani, 2003) [5].

Se estima que por cada 1\$ dedicado a la preparación de los distintos agentes involucrados en los desastres se pueden salvar entre 4\$ y 7\$ de pérdidas. En cualquier caso el dinero siempre es más efectivo si es empleado antes de los desastres [6].

Para una carretera y para la reparación de los puentes en la Carretera Nacional 7, solamente considerando el terremoto de Haití en 2010, se debe-

rían haber asignado cerca de 20.000.000\$ para el proyecto de reconstrucción de 4 puentes. Debemos tener en cuenta que este es el presupuesto que debería dedicar Haití, el país más pobre en el hemisferio occidental y una nación en la cual más del 80 % de la población vive en condiciones de pobreza (gana menos de 2\$ dólares al día) [7], cuyo PIB asciende a 6.900 millones de dólares.

En Estados Unidos (EEUU) y sin tomar en cuenta datos de desastres naturales, el número de puentes defectuosos u obsoletos es superior a 170.000, cerca de un 30 % de los puentes del país [8]. La reparación de puentes y el tiempo de planeación y ejecución de dichas reparaciones requieren alternativas para la comunicación y los puentes ultraligeros de acción rápida pueden ser la solución perfecta.

El número de personas damnificadas cada año por desastres naturales supera los 300 millones y se incrementa aceleradamente conforme la población mundial continúa moviéndose hacia las grandes ciudades. Según datos de la UNFPA (Fondo de Población de las Naciones Unidas) en 2008 la mitad de la población mundial 3.300 millones de personas ya vivían en comunidades urbanas, el número se espera que crezca a 5.000 millones para 2030 (un incremento superior al 50 % y que representa más del 80 % del total de la población mundial 2011). El efecto del número de personas que viven en comunidades urbanas y el crecimiento de la urbanización son de acuerdo a los expertos dos de los elementos de mayor riesgo en caso de desastres naturales.

En 2002 el Parlamento Sudafricano abordó un presupuesto superior a 3 millones de Euros para la adquisición de un stock temporal de puentes de emergencia de distintos tamaños para cubrir 14 de los más de 262 pasos destruidos por las inundaciones [9].

## 2.2. Tecnología de estructuras hinchables

Las estructuras hinchables han sido utilizadas por ingenieros y arquitectos desde hace varias décadas. Este tipo de estructuras ofrecen soluciones ligeras con una eficiencia estructural relativamente alta y proporcionan características que ningún otro tipo de estructura posee. El montaje y desmontaje de las estructuras hinchables es rápido gracias al sencillo proceso de inflado y desinflado, y su peso, las necesidades de transporte y el volumen de almacenamiento son mínimos.

Uno de los principales inconvenientes de las estructuras hinchables es su limitada capacidad de soportar carga. Cargas ciertamente significativas demandarían altas presiones de hinchado de la estructura, lo que conduce

a tensiones muy elevadas en la tela que sólo pueden ser resistidas por telas especiales y en consecuencia mucho más caras. En estos casos, debido al gran incremento en la presión de las estructuras, la estanqueidad, control de presión y seguridad se vuelven temas muy delicados para las aplicaciones prácticas.

Se han realizado diferentes esfuerzos para desarrollar estructuras hinchables formadas por ensamblaje de tubos de alta o baja presión para una variedad de aplicaciones terrestres. Las primeras aplicaciones de estructuras hinchables por parte de Buildair se desarrollaron en el marco del proyecto europeo INFLAST, coordinado por CIMNE y el proyecto SPILLREC, coordinado por Buldair (CIMNE fue socio en este proyecto). Este esfuerzo ha continuado en los últimos años: Marcipar et al. (2000, 2005) y Oñate et al. (2008), ayudando así a la penetración de las estructuras hinchables en el mercado. Sin embargo, el uso de estructuras hinchables de baja presión como vigas o componentes en puentes no ha sido explotada hasta ahora, debido principalmente a la necesidad de mejorar el rendimiento de los elementos hinchables de baja presión para ser capaces de sostener grandes cargas externas.

### 2.3. Estudios sobre vigas hinchables

En estas últimas décadas, se ha realizado un importante trabajo analítico y experimental en el campo de los materiales compuestos textiles y las estructuras hinchables. Los primeros tejidos se implementaron en aplicaciones arquitectónicas a finales de 1960 por Bird (1967), quien desarrolló membranas estructurales y estructuras hinchables con ellas, construyendo varias cúpulas neumáticas. Bulson (1973), Herzog (1976), Firt (1983) y Bernasconi y Reibaldi (1986) realizaron revisiones sobre aplicaciones de membranas en inflables. Sobek y Speth (1995) publicaron detalles de fabricación, así como detalles constructivos. Karwath et al. (2007) aplicaron ecuaciones constitutivas en materiales ortótropos y llevaron a cabo experimentos de tensión biaxial para extraer parámetros de rigidez en el plano de materiales tipo membrana sometidos a distintas cargas variables en el plano.

Específicamente en el ámbito de vigas hinchables, Topping (1963) y Douglas (1969) estudiaron la respuesta estática bajo cargas de flexión, mientras que el problema de la formación de arrugas fue estudiado inicialmente por Comer y Levy (1962), Webber (1982) y Main et al. (1994). Liu et al. (2001) desarrollaron un modelo modificado de material para estudiar la formación de arrugas en las estructuras de membrana y estudiaron vigas hinchables en voladizo sometidas a cargas puntuales y a torsión. Veldman et al. (2005) determinaron experimentalmente módulos de elasticidad en el plano y coe-



ficientes de Poisson de materiales textiles, y predijeron y midieron el efecto de la presión interna en relación a la deflexión de las vigas hinchables en voladizo.

Varios autores han desarrollado elementos finitos 2D para predecir la respuesta estática de estructuras hinchables: Oden y Sato (1967), Kyriakou et al. (1996), Bonet (2000). Wielgosz y Thomas (2002, 2003) desarrollaron una solución analítica para un elemento finito de viga hinchable tipo Timoshenko y predijeron deflexiones a lo largo de la longitud de la viga, así como las cargas para la formación de arrugas en las vigas hinchables a altas presiones internas sometidas a flexión en 3 puntos. Davids (2007) desarrolló un elemento finito de viga de Timoshenko teniendo en cuenta materiales textiles sometidos solamente a tracción. A nivel del material textil, Cavallaro et al. (2003) desarrollaron modelos de células unitarias teniendo en cuenta la fricción entre hilos entrecruzados de la tela y los utilizó para predecir en el plano las constantes elásticas de los tejidos utilizados en inflables como una función de la presión interna.

Otros investigadores también han estudiado experimentalmente el efecto del tipo de material, la presión de hinchado y la velocidad de carga en relación a la deflexión en el centro en las vigas sometidas a flexión en 4 puntos. Woo y Whitcomb (1993) predijeron tensiones en el plano y perpendiculares a éste en el contorno de fibra en placas de tejidos compuestos consistentes en fibras de carbono y matriz de resina. Jenkins y Korde (2006) publicaron el estado del arte en referencia a la respuesta dinámica de membranas. Diaby et al. (2004) y Plagianakos et al. (2009) estudiaron la respuesta estática de tubos hinchados con aire sometidos a cargas de compresión axiales y predijeron cargas de pandeo para diversos niveles de presión de aire interna y los compararon con resultados experimentales.

La respuesta estática de una viga hinchable de alta resistencia bajo cargas de flexión ha sido estudiada numéricamente y experimentalmente por Luchsinger et al. (2006, 2008, 2010). Específicamente estudiaron el efecto de la presión de aire interno en la deflexión y distribución de la fuerza axial a lo largo de la viga y compararon mediciones experimentales con una solución analítica y predicciones de elementos finitos.

La nueva tecnología de vigas hinchables de alta resistencia permite desarrollar una nueva generación de estructuras hinchables de baja presión para aplicaciones en nuevas áreas tales como el Nuevo Concepto de Puente de Vigas Hinchables Ligero, Modular y Portátil que se desarrolla en la presente tesis.

A pesar de la intensa labor de I+D mencionada anteriormente, están disponibles muy pocos resultados experimentales y numéricos para estructuras

con vigas y membranas hinchables. Las pruebas, que se estudian y realizan en el marco de esta tesis, proporcionan una estimación del potencial de uso de las estructuras hinchables como estructuras temporales.

## 2.4. Alternativas existentes de puentes actuales

A modo general, algunas de las alternativas existentes son: el puente Bailey, con limitaciones de peso, transporte e instalación; los puentes modulares que aunque mejoran en velocidad de montaje, no lo hacen en peso y cualificación del equipo de construcción; y otros puentes desplegables en forma de tijera que requieren de vehículos de gran peso y tamaño para transportarlos y extenderlos [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16].

La mayor parte de las alternativas de puentes temporales, entre los cuales el más común y utilizado es el Bailey, requieren el transporte de grandes cargas con numerosos componentes o módulos, llevados a la zona de desastre en vehículos pesados para posteriormente ser armados con maquinaria pesada y personal cualificado y finalmente instalados y posicionados con grúas pesadas o helicópteros.

Se puede descomponer el problema de la utilización del puente de emergencia en tres partes:

1. El transporte de los puentes temporales se vuelve doblemente grave cuando no hay alternativas cercanas de transporte terrestre y se tiene que realizar la aproximación por aire. Tanto aviones tácticos como helicópteros tienen grandes limitaciones respecto al peso que pueden transportar.
2. Una vez resuelto el problema del transporte aparecen las dificultades de montaje in-situ. Las alternativas actuales requieren personal con cualificación para poder montar el puente y gran cantidad de operarios y equipos especializados para llevar a cabo esta tarea.
3. Por si fuera poco, una vez vencidos los dos retos anteriores, queda pendiente la tarea de posicionamiento, para lo cual o se dispone de una grúa pesada (situación imposible si el transporte ya ha sido un problema) o se coloca por aire mediante helicópteros (situación compleja por el peso del puente, la disponibilidad de helicópteros de alta carga y las dificultades técnicas que esto supone).

En la figura 2.1 se presenta una comparativa entre los distintos tipos de puentes usados actualmente y sus características básicas, junto con una esti-



## Capítulo 3

# Tecnología Tensairity y marco normativo

### 3.1. Tecnología Tensairity: ventajas introducidas

Hoy en día, uno de los campos de investigación que se encuentra en auge es la aplicación de estructuras hinchables como solución a situaciones que demandarían estructuras temporales. En los últimos años las estructuras hinchables han evolucionado mucho, demostrando que pueden tener casi cualquier forma para cubrir grandes superficies con baja presión. El problema técnico, sin embargo, es que no existía solución para el caso de las vigas hinchables, membranas cilíndricas con aire a presión, debido a las serias limitaciones de carga que tienen.

La solución pasa por la tecnología Tensairity [17, 18, 19, 20, 21, 22, 23], la cual se basa en la combinación sinérgica entre cables, elementos de compresión, membranas y aire a baja presión (figura 3.1). En Tensairity, compresión y tracción están físicamente separados por una membrana de tejido hinchada a baja presión, el fin de la cual es, por un lado pretensar el elemento de tracción, y por el otro estabilizar el elemento de compresión frente al pandeo. Esto permite llevar al material hasta su límite plástico, tanto para tracción como para compresión, dando como resultado vigas que pueden ser varios órdenes de magnitud más ligeras que sus homólogas metálicas convencionales, manteniendo siempre su misma capacidad de carga. La propiedad más importante de Tensairity es que el aire a presión es independiente del espesor de la viga y de la luz de la estructura. Su estabilidad está determinada por la tensión en la tela, la cual es proporcional a la presión interior del tubo.

El nuevo concepto de viga inflable soluciona el problema de limitación

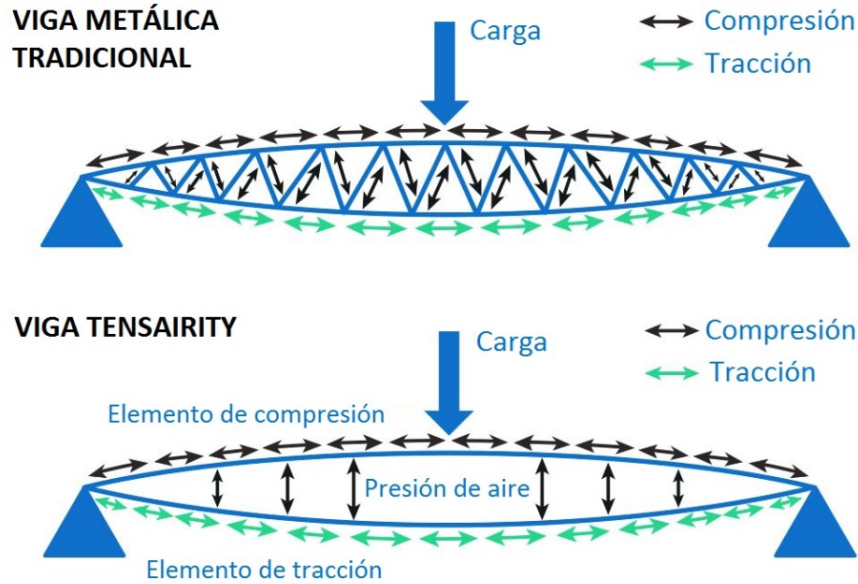


Figura 3.1: Esquema conceptual de la tecnología Tensairity  
(Tensairity = Tension + Air + Integrity)

de carga de las estructuras hinchables simples ya que la capacidad de carga de Tensairity es, en orden de magnitud, más elevada que en una viga de aire tradicional. Su capacidad de carga es tan alta que con una presión interior de 200 mbar es posible construir puentes temporales para soportar cargas de transportes pesados.

Las estructuras de Tensairity tienen multitud de propiedades interesantes. La mayor ventaja respecto las vigas convencionales de acero es su ligero peso, así como la posibilidad de un transporte y almacenaje compacto además de un montaje rápido y fácil.

Adicionalmente, este Puente de Vigas Hinchables Ligero, Modular y Portátil (PVH-LMP), es innovador en su adaptabilidad tanto para el uso de materiales ligeros muy baratos (madera, madera balsa, sándwiches de materiales compuestos, etc.) como de sofisticados y de reciente creación basados en fibra de vidrio, fibras y nanotubos de carbono.

Como resumen, los principales elementos diferenciadores que ofrecen este tipo de puentes son:

1. Tecnología hinchable, completamente innovadora para puentes de emer-

- gencia, resistentes y capaces de soportar el paso de vehículos pesados
2. Ultra-ligeros utilizando materiales reforzados de última generación
  3. Sistemas de ensamblaje mediante elementos simples, sin necesidad de especialización
  4. Sistemas de posicionamiento que no requieren medios sofisticados, ni helicópteros o grúas pesadas
  5. Tiempo de montaje cuantificable en horas, no días ni meses
  6. Volumen de logística y transporte reducido. El mismo volumen permite hacer un stock de decenas de puentes en el espacio que actualmente ocupa una sola de las alternativas

### 3.2. Estudio y selección de normativas aplicables

Debido al diseño no habitual de este tipo de estructuras hinchables temporales usadas como puentes para vehículos, se lleva a cabo un estudio de las distintas normativas que pueden ser de aplicación, con la intención de que el Puente de Vigas Hinchables Ligero, Modular y Portátil (PVH-LMP) pueda tener alcance internacional.

En primer lugar se analizan las normativas civiles vigentes para la construcción de puentes en España, la IAP-11 [24]; Europa, el Eurocódigo 1 - Parte 3 [25] y Estados Unidos, la AASHTO [26], así como varias normativas, acuerdos y manuales militares que puedan ser aplicables en nuestro caso de estudio y que se explican a continuación [27, 28, 29, 30, 31]. Posteriormente se estudian los trenes de cargas de diseño para cada una de ellas con el fin de obtener una referencia comparativa y seleccionar la que mejor se adapte a las necesidades del proyecto.

La construcción de puentes civiles está perfectamente definida en varios países mediante las normativas anteriormente citadas [24, 25, 26], aunque este diseño no se aplica en puentes permanentes. Es por eso que basar el diseño teniendo en cuenta referencias militares puede proporcionar una dimensión más directa dado el potencial de uso de esta tecnología para puentes hinchables de despliegue rápido en caso de emergencias. Las principales referencias a considerar en este aspecto son dos: "Trilateral Design Test Code for Military Bridging and Gap Crossing Equipment"[27] y "Military Nonstandard Fixed Bridging Field Manual"[28]. Éstos, a su vez, se basan en un sistema estandarizado de clasificación y señalización de vehículos y puentes acordado por los países de la OTAN, conocido como MLC (Military Load Classification), que se materializa en dos acuerdos de estandarización

(STANAG = Standardization Agreement): "Military Load Classification of Bridges, Ferries, Rafts and Vehicles (STANAG No. 2021)"[29] y "Military Load Classification Markings (STANAG No. 2010)"[30].

En estos dos últimos documentos, como ya se ha comentado, la idea básica es establecer un sistema estándar de valoración de cargas de los distintos vehículos y puentes militares, de forma que las distintas fuerzas armadas de los países de la OTAN usen un criterio común en sus operaciones. En el segundo caso [30] se indica un sistema de señalización de la carga de los vehículos y la que pueden soportar los puentes, mientras que en el primero [29] se establece una clasificación denominada MLC. Se presentan 32 tipos de vehículos teóricos (16 con orugas y 16 con neumáticos), catalogados entre MLC 4 y MLC 150, donde estos valores indican el peso del vehículo de orugas en toneladas cortas. A su vez se prevé la opción de distintos modos de cruce (normal, caution and risk crossing), donde se pueden requerir condiciones menos estrictas o no cumplir algunas: velocidad máxima (5km/h), excentricidad, anchura, condiciones geométricas, sólo cruce de un vehículo a la vez, obligación de conducir justo por el centro del carril guiado por algún responsable, prohibición de frenar y/o acelerar y/o cambiar marchas, etc., aunque siempre debe haber una señalización especial para estos casos. En estas referencias a los puentes militares se remarca que los factores de seguridad suelen ser bajos y los límites de peso minimizan el sobrediseño, con lo cual aparte de las cargas de los vehículos hace falta considerar las cargas secundarias, así como el hecho que todas estas cargas dependen del tipo de puente o su uso, así como los códigos de cada país.

Entrando más en detalle en las normativas militares básicas a seguir, el "Trilateral Design Test Code"[27] es un código acordado entre Alemania, Reino Unido y Estados Unidos, también de consulta para el "Quadripartite ABCA (American, British, Canadian, Australian and New Zealand Armies' Program)", que está centrado en puentes 100 % desplegados, los cuales se identifican como puentes estándar dentro del ámbito militar estadounidense. Se especifica claramente que **el equipamiento diseñado y testeado en cualquier país de acuerdo con este código será adecuado para aceptación internacional**, así como que este código anula cualquier otro estándar nacional relacionado con los puentes militares. Se adjunta información, aunque no completa, sobre el uso de materiales compuestos con fibras, así como la posibilidad de diseño de estructuras inusuales bajo responsabilidad del ingeniero. En el código no se especifica ningún tren de cargas tipo en particular, sino varios trenes de cargas según la clasificación MLC comentada anteriormente. Por todas estas razones este código se considera apropiado para este proyecto.

En cuanto a la otra referencia militar "Military Nonstandard Fixed Bridging Field Manual"[28], cabe destacar que es un manual de campo usado por

el ejército estadounidense que cubre el análisis y diseño de puentes fijos no estándar. El término "no estándar" define sistemas que no son completamente desplegables, es decir, todo el puente o porciones del mismo son construidas in-situ. El manual trata con los métodos para construir puentes de uso militar temporales (3 a 5 años) según la clasificación MLC propuesta por la OTAN. Es por estos motivos que este manual puede ser una guía para el diseño propuesto en este proyecto, ya que ciertas partes del puente serán completadas in-situ.

En cuanto a las cargas de diseño se han estudiado los vehículos tipo para cada una de las normativas anteriores [24, 25, 26, 27, 28], las cuales se comentan a continuación:

- La IAP-11 [24], así como el Eurocódigo [25], establecen un vehículo de diseño con 2 ejes separados 1,20 m y varios pesos por eje (100, 200 y 300 KN), una separación entre ruedas del mismo eje de 2,00 m y una huella de neumático de 0,40 m x 0,40 m. Además hay que añadir una carga uniforme a lo largo de toda la longitud del puente de valor 9,0 KN/m<sup>2</sup> para el caso de 300 KN por eje y 2,5 KN/m<sup>2</sup> para los otros dos.
- La AASHTO [26] establece un camión de diseño con 3 ejes, el delantero con un peso de 35 KN y los otros dos con 145 KN, los dos primeros separados 4,30 m, mientras que para los dos últimos se considerará la situación más desfavorable dentro de un rango de longitudes de entre 4,30 m y 9,00 m; la separación entre ruedas es de 1,80 m y la huella es de 0,51 m x 0,25 m. Esta normativa también define un tándem de diseño similar al de las normativas anteriores, con 2 ejes separados 1,20 m y una carga por eje de 110 KN, con las ruedas separadas 1,80 m y una huella de 0,51 m x 0,25 m. Asimismo hay que añadir una carga repartida de 9,3 KN/m a lo largo de la viga, aplicada en un ancho de 3 m (3,1 KN/m<sup>2</sup>). Para el diseño del puente se debe elegir la situación más desfavorable entre el camión o el tándem de diseño, agregando en ambos casos la contribución de la carga repartida.
- Las normativas militares [27, 28] toman como referencia la clasificación de cargas MLC, con lo cual no hay un vehículo de referencia en particular, sino un rango de posibles vehículos tipo a elegir. Para cada uno de ellos se define un vehículo de orugas con sus dimensiones y formas de aplicación de la carga, así como un vehículo de neumáticos, con sus cargas por eje y características geométricas y de los neumáticos.

La idea del PVH-LMP es establecer unos requerimientos de carga que abarquen en la medida de lo posible todas estas normativas de forma que



sea aceptado internacionalmente. Dado el potencial de mercado en el caso militar estadounidense, así como las características especiales de este tipo de puentes y su carácter internacional, se decide tomar como **referencia** los requerimientos de diseño de la **normativa militar "Trilateral Design Test Code"**, la cual toma como referencia la clasificación de vehículos MLC. Concretamente se establecerá como **vehículo de diseño el MLC 30**, puesto que es el más similar al vehículo tipo de la AASHTO. En la figura 3.2 se muestran las características de este vehículo.

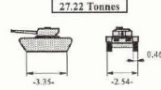
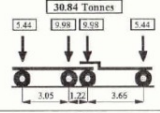



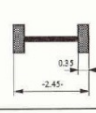
MLC	Tracked Vehicles	Wheeled Vehicles				
		Axle Load [Tonnes] and Spacing [m]	Maximum Single Axle Load	Tyre Load and nominal Ground Contact Width [m]	Axle Load and nominal Ground Contact Length [m]	Axle Wheel Spacing and nominal Ground Contact Width [m] (1)
30	 <p>27.22 Tonnes</p>	 <p>30.84 Tonnes</p>	 <p>13.15 Tonnes</p>	 <p>6.57 Tonnes</p> <p>0.35</p>	 <p>13.15 Tonnes</p> <p>0.70</p>	 <p>0.35</p> <p>-2.45</p>

Figura 3.2: Características del vehículo MLC 30

## Capítulo 4

# Nuevo concepto de Puente de Vigas Hinchables Ligero, Modular y Portátil (PVH-LMP)

### 4.1. Estudio y selección de alternativas de diseño

El puente a fabricar debe tener una luz de 14 metros y, tomando como referencia la comparativa de alternativas de puentes existentes, un ancho de unos 4 metros. Como primera aproximación, un equilibrio entre criterios estéticos y de eficiencia estructural para puentes soportados por cables en su parte inferior aconseja excentricidades máximas del orden de  $1/10$  de la luz [32], con lo cual se adoptará un diámetro de tubo que proporcione una altura alrededor de 1,40 metros en el centro de la viga.

#### 4.1.1. Forma del tubo hinchable

La teoría básica de Tensairity [17] consiste en una viga cilíndrica hinchable, una riostra (elemento de compresión) fuertemente conectada con la membrana a lo largo de la viga y como mínimo un par de cables (elemento de tracción) en espiral alrededor de la viga acoplados firmemente con el elemento de compresión en sus extremos (figura 4.1(a)). Posteriormente se han llevado a cabo estudios [18, 19] de vigas con otras formas como se muestra en la figura 4.1.

Este modelo de viga Tensairity presentado con el elemento a compre-

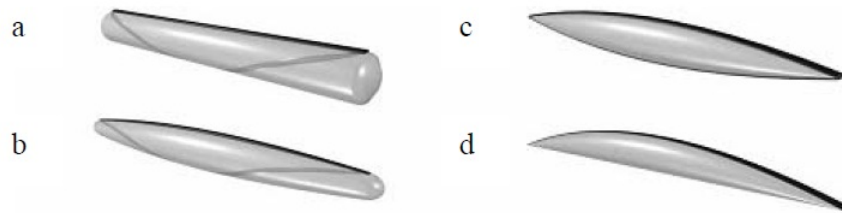


Figura 4.1: Formas viga Tensairity: (a) Cilindro, (b) Cigarro, (c) Huso textil simétrico, (d) Huso textil asimétrico

sión, el cable en forma helicoidal, y la tela con baja presión es un modelo simple pero no el más eficiente. El aspecto más importante es la influencia no deseada del cable sobre el elemento a compresión en la región de soporte. Además, la carga que actúa sobre el primer cuarto de la viga causa grandes deflexiones ya que en ese lugar el cable no contrarresta lo suficiente. Para vencer este problema se pueden añadir más cables a la estructura tal como muestra la figura 4.2(a). De todas formas, todavía se pueden hacer mejoras.

La mejor forma posible para aguantar la carga en estructuras de grandes luces utilizando sólo la compresión es el arco, de esta forma se puede adaptar la forma de la membrana hinchable a la nueva forma del cable. La forma resultante es la figura 4.2(b).

Según la teoría se sabe que cuanto más grande sea el radio de curvatura del cable, más largo debe ser éste y más contacto habrá con la fuerza. Teóricamente, la mejor curva posible es, por lo tanto, una línea recta. Degenerando los extremos del tubo en puntos, el cable en espiral se reduce a una línea curva (figura 4.2(c)), mientras que si estiramos el cable se obtiene la forma asimétrica de la figura 4.2(d).

Según estudios numéricos llevados a cabo [18], las formas de uso textil poseen mayor rigidez y su deflexión es hasta 6 veces menor que con la forma cilíndrica inicial. Es por esta razón que se decide adoptar la forma de huso textil como parámetro de diseño de las vigas del puente.

En este punto surgen varias opciones de diseño de la viga, por un lado está la idoneidad de curvar más o menos los elementos de compresión y de tracción, es decir, considerar el elemento de compresión curvado y el de tracción recto (figura 4.2(d)) o el caso opuesto con el elemento de compresión recto y el de tracción curvado. Otra opción es adoptar un caso intermedio como el de la figura 4.2(c). A continuación se discuten los pros y contras de las dos opciones extremas discutidas.

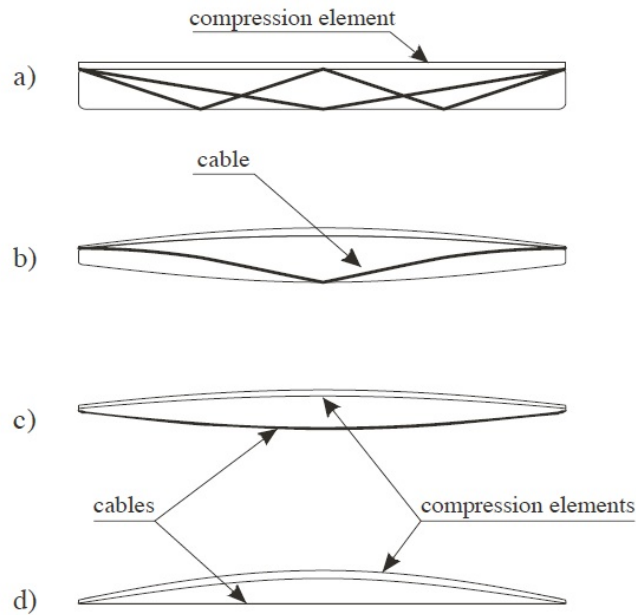


Figura 4.2: Evolución formas viga Tensairity: (a) Cilindro con refuerzo de cables, (b) Cigarro, (c) Huso textil simétrico, (d) Huso textil asimétrico

### Opción 1: Elemento de compresión curvado y elemento de tracción recto

#### ■ VENTAJAS:

- El elemento de tracción recto queda paralelo justo a la altura del suelo y el tubo hinchable queda por encima de éste. Este hecho permite que no se requiera elevar el puente del suelo con rampas de acceso importantes.
- El elemento de tracción en forma de arco le confiere la forma óptima para resistir mejor los esfuerzos de flexión.

#### ■ INCONVENIENTES:

- El elemento de tracción recto se corresponde con el eje de sustentación de la viga, el cual queda por debajo del centro de gravedad de ésta, provocando problemas de inestabilidad por vuelco. Este problema se minimiza en gran medida si se considera el puente entero con las vigas conectadas entre sí rigidizando el conjunto.
- Para que el elemento de tracción trabaje debe tener cierta curvatura. Cuanto más recto sea este elemento más tensión tiene que

soportar y mayor será la componente horizontal que se transmite a los apoyos. Es en este punto de unión entre elemento de tracción y compresión precisamente donde se concentrarán los esfuerzos, punto que de por sí ya es muy crítico.

- El elemento de compresión, al ser curvo, provoca mayores problemas de construcción que si fuese recto. En este caso las piezas que conforman el tablero de compresión deben ser piezas curvas (complejas de construir) o bien diseñar un tablero con tramos rectos unidos entre sí formando ángulos (con la enorme dificultad de unión del conjunto).

### **Opción 2: Elemento de compresión recto y elemento de tracción curvado**

#### ■ VENTAJAS:

- El elemento de compresión marca el eje de suspensión de la viga, el cual está por encima del centro de gravedad de ésta, proporcionándole un equilibrio estable.
- El elemento de tracción al tener cierta curvatura adopta una forma más natural a la hora de resistir las cargas del puente.
- El elemento de compresión recto facilita mucho la fabricación y posterior unión de estas piezas en el montaje del puente.

#### ■ INCONVENIENTES:

- Dado que el tubo hinchable queda por debajo del eje de sustentación del puente, esto obliga a diseñar y fabricar un sistema para elevar el puente a cierta altura de forma que el tubo no toque el suelo. Asimismo hay que contar con unas rampas de acceso importantes.
- El elemento de compresión recto perjudica a la resistencia a flexión del puente, ya que la forma óptima se ha visto que debe ser un arco.

Dado que no está claro cuál de las opciones es mejor, se propone estudiarlas todas y sacar conclusiones más adelante.

Mientras, por otro lado está la duda sobre cómo debe ser esta curvatura. Las dos principales opciones son: arcos de circunferencia o parábolas. Por una parte, la ley de momentos flectores tiene forma parabólica, con lo cual la parábola puede absorber perfectamente estos esfuerzos sin malbaratamiento de material. Por otra parte, dado que se pretende construir un

puente modular, el arco de circunferencia ofrece la posibilidad de diseñar las piezas del puente de forma que sean todas iguales, facilitando el proceso de fabricación de éstas y montaje posterior del puente. Considerando las medidas establecidas para el puente (luz 14 m y altura del tubo en el centro 1,4 m), en la figura 4.3 se puede observar que la diferencia entre estas dos formas es prácticamente inexistente, ya que en el centro del puente se obtiene una desviación máxima de 14 mm. Es por esto que, dado que los requerimientos constructivos son el punto más complejo, se decide usar el arco de circunferencia en el diseño del tubo hinchable y los elementos de tracción/compresión.

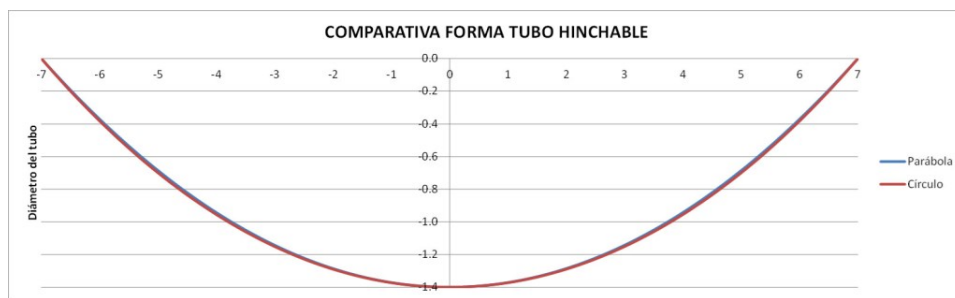


Figura 4.3: Comparativa forma tubo hinchable

#### 4.1.2. Sección transversal de la viga

Anteriormente se ha adoptado una altura de tubo de alrededor de 1,40 m en el centro de la viga. Dado que el tubo va en contacto con la capa de compresión, no tiene una forma circular perfecta, con lo cual es necesario definir una sección transversal tipo.

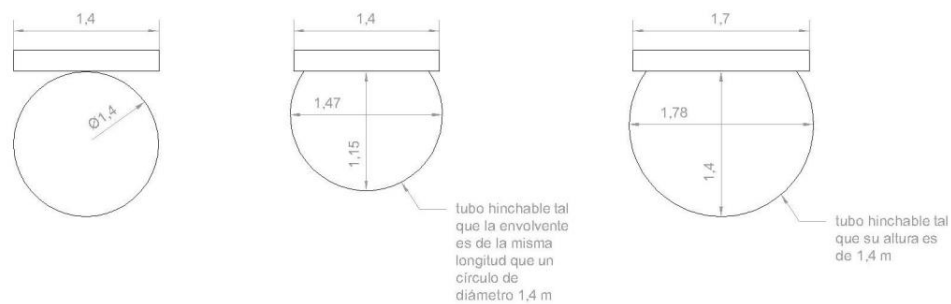


Figura 4.4: Definición de la sección transversal central de la viga

En la figura 4.4 se observa un estudio de la forma que adopta un tubo circular perfecto de 1,40 m de diámetro aplastado sobre una plataforma de

1,40 m de anchura. Se puede observar que su altura es de 1,15 m, lo cual no interesa ya que se requerirá mucha mayor presión de hinchado. En su lugar se decide escalar el tubo para que la altura en el punto medio sea de 1,40 m, obteniendo en este caso una plataforma necesaria de 1,70 m de anchura aproximadamente.

#### 4.1.3. Tamaño de los elementos

El objetivo del puente es que sea modular y que su tamaño una vez desmontado sea tal que permita su transporte en los contenedores de avión estándar más pequeños. Según datos proporcionados por Airbus [33], el tamaño de estos pallets es de 88" x 54" (medidas en pulgadas), lo que viene a ser 2,235 m x 1,372 m, mientras que las medidas útiles son 84" x 50" (2,134 m x 1,270 m). La altura de los elementos transportados depende del avión, así que tomando como referencia uno de los más pequeños de Airbus (figura 4.5), ésta se considerará de 1,80 m, que descontando la altura del contenedor proporciona una altura útil de aproximadamente 1,70 m. Así pues, la pieza de mayor tamaño, que previsiblemente será la capa de compresión de cada una de las vigas, debe ser menor que estas medidas. Dado que una viga mide 14 m, se propone dividirla en 7 partes de 2,00 metros de largo y 1,70 m de ancho. De esta forma los elementos se pueden apilar en vertical dentro del contenedor hasta llegar a completar el ancho que queda libre de 1,270 m.

#### 4.1.4. Otros requerimientos

Adicionalmente a lo expuesto anteriormente otro requisito importante para el puente, sobretodo por temas de seguridad, es que sea auto-resistente a su peso propio sin necesidad de presión de hinchado en el tubo.

### 4.2. Selección de materiales

La principal ventaja de esta estructura es su peso reducido, que puede hacerla muy competitiva frente a otros sistemas más convencionales. Por esta razón se ha planteado la posibilidad de emplear paneles de polímeros reforzados con fibra de vidrio (FRP) para el tablero y eslingas textiles de altas prestaciones para el elemento traccionado. Ambos materiales presentan una elevada relación entre resistencia y peso. Para el elemento hinchable se ha optado por membranas textiles recubiertas de PVC.

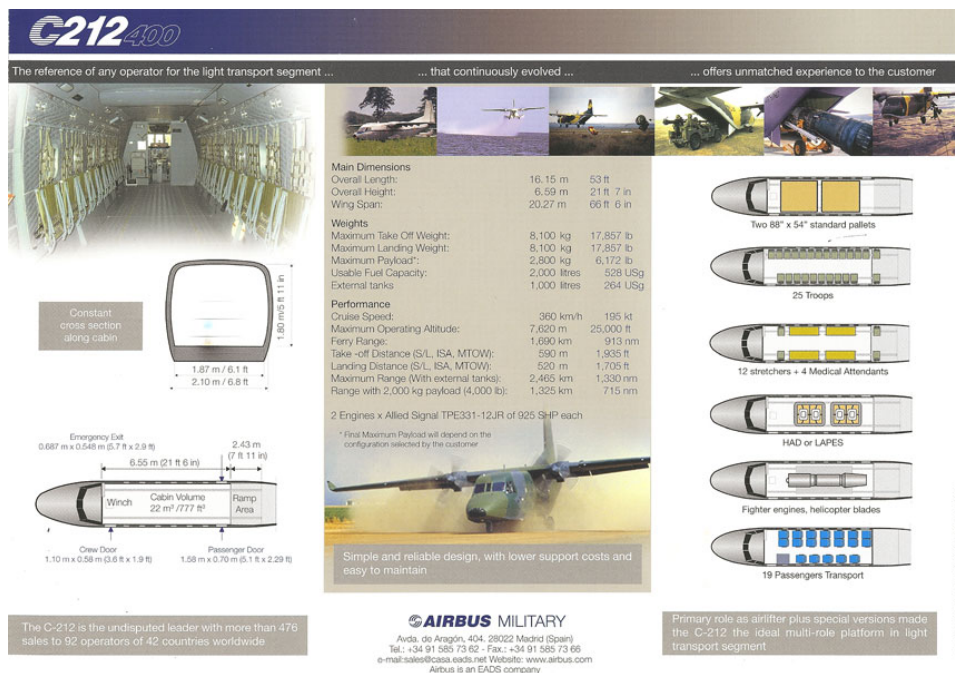


Figura 4.5: Cabina de transporte de un Airbus C-212 con los pallets estándar

- **Tubo hinchable:** compuesto por 2 capas de material textil recubierto de PVC. La cámara interior es estanca, con un espesor de 0,65 mm, mientras que la exterior confiere la resistencia, con un espesor de 1,05 mm. Una tercera capa de este mismo material exterior se usará para fijar el tubo al tablero de la viga (figura 4.6a).
- **Elemento de compresión y tablero del puente:** los elementos de FRP se obtienen a partir de un proceso de pultrusión, es decir de extrusión y tracción de una mezcla de fibras y resinas. Se trata de un material con un comportamiento elástico lineal hasta la rotura, marcadamente ortótropo. Los valores de rigidez y resistencia son mayores en la dirección de las fibras (dirección de pultrusión), decayendo drásticamente en las direcciones ortogonales a ésta. La relación entre resistencia y peso es muy elevada, al menos en la dirección de pultrusión. Para la construcción del prototipo se ha optado por el uso de paneles y perfiles cuyo peso es del orden de 52 kg/m<sup>2</sup> (figura 4.6b).
- **Elemento de tracción:** se han adoptado eslingas de tejido de Dyneema, caracterizadas por una muy elevada resistencia a tracción y una elongación muy reducida (figura 4.6c).



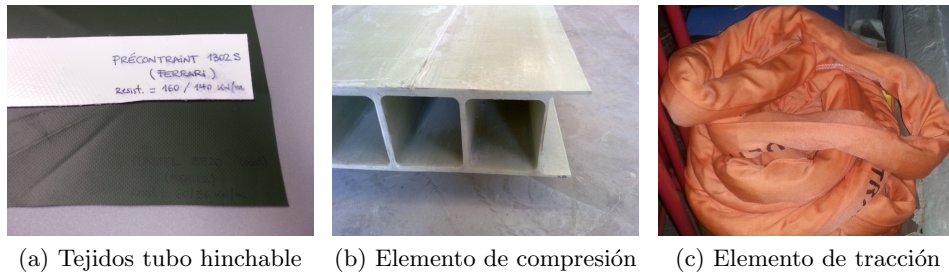


Figura 4.6: Materiales seleccionados para el PVH-LMP

Una vez definidos los materiales a usar en cada parte del puente, a continuación se especifican las características que deben cumplir, acorde con las normativas particulares en cada caso [34, 35, 36, 37, 38, 39, 40].

#### 4.2.1. Tejidos tubo hinchable

En la figura 4.7 se muestran las fichas técnicas de los tejidos para la cámara interior (Plastel 8820, Mehler) y la funda exterior (Précontraint 1302s, Ferrari).

#### 4.2.2. Material FRP tablero

Las características de los polímeros fibroreforzados empleados en el tablero son las especificadas en la EN 13706 [37] y se resumen en el cuadro de la figura 4.8.

Está previsto el empleo de productos fabricados y comercializados por la empresa española Fibrotec, S.A. Se trata de perfiles en U y de paneles pultrusionados denominados Fibrotec 160.

Los perfiles presentan una altura de 180 mm, un ancho de alas de 60 mm y un espesor de 8 mm. Los paneles tienen un ancho de 300 mm y un canto de 160 mm, con tres nervios longitudinales. Cada panel se puede acoplar a los adyacentes mediante encolado de las alas machihembradas para obtener el ancho deseado.

**MEHLER**  
TEX•NOLOGIES

Hoja Características Técnicas no.: **1509.2**  
**Producto** PIASTEL® boat  
**Artículo no.:** 8820 6340

Clase de recubrimiento y acabado	
Clase de recubrimiento	PVC
Comportamiento a la llama	ISO 3793 velocidad de la flama -100 mm/min.
Peso total	790 g/m <sup>2</sup> EN ISO 2286-2
Resistencia a rasgadura catártica	3000 / 2800 N/50 mm DIN EN ISO 14151/1
Resistencia a rasgadura catártica	300 / 300 N DIN 53083
Adherencia	30 N/cm LB 3.56-1
Resistencia al frío	-30 °C DIN 53081
Resistencia al calor	+70 °C LB 3.19
Soldable a la luz	+6 N/m <sup>2</sup> DIN EN ISO 105.802
Resistencia al pando	sin roturas: 150000 x @ DIN 53310 A
<b>tejido base</b>	
Materia	PES DIN ISO 2075
Hilo	1100 dtex DIN ISO 2050
Tejido	L 1/1

Los datos técnicos son valores aproximados, obtenidos a base de valores medios. Por razones técnicas puede haber ligeras variaciones durante la fabricación. Estos indicadores corresponden a los procedimientos técnicos actuales y dan información sobre nuestros productos, sin vinculación jurídica. Estos datos son válidos para producción de nueva fabricación.

GM.07.13.08.00 V.L.B. 04.03.2011  
 EA007-0598 Fecha

**PRECONSTRAINT**  
1002S-1400S-1202S-1502S-1602S

www.ferrari-architecture.com

Technical properties	Préconstraint®1002 S back PVDF	Préconstraint®1202 S back PVDF	Préconstraint®1302 S back PVDF	Préconstraint®1502 S back PVDF	Standards
Yarn	1100 Dtex PES HT	1100 /1670 Dtex PES HT	1100/2200 Dtex PES HT	1670/2200 Dtex PES HT	
Weight	1050 g/m2 / 31 oz/sqyd	1050 g/m2 (1250 g/m2) / 31 oz/sqyd	1350 g/m2 / 40 oz/sqyd	1500 g/m2 / 44 oz/sqyd	EN ISO 2286-2
Width	180 cm	180 cm	180 cm	180 cm	(-1mm (+1mm))
Tensile strength (warp/weft)	420/400 daN/5 cm	500/500 daN/5 cm	600/700 daN/5 cm	1000/800 daN/5 cm	EN ISO 1421
Tear resistance (warp/weft)	55/50 daN	80/85 daN	120/110 daN	160/140 daN	DIN 53 363
Adhesion	12 daN/5 cm	12 daN/5 cm	13 daN/5 cm	15 daN/5 cm	EN ISO 2411
Flame retardancy	M2/NF P 92-507 -B1/DIN 4102-1 BS7837 -M2/UNE 23 727 SITAC/ETASIS 650082 VKF 5.2/EN 198998 Test 2/NFPA 701 • ASTM E 84 Class C/ ASTM E 108	B1/DIN 4102-1 • BS 7837 CSFM T 19 • SITAC/SIS 650082 VKF 5.2/EN 198998 Test 2/NFPA 701	B1/DIN 4102-1 • BS 7837 CSFM T 19 • SITAC/SIS 650082 SINTEF SIS 650082 VKF 5.3/SN 198998 Test 2/NFPA 701 • CSFM T 19	B1/DIN 4102-1 • BS 7837 SITAC/SINTEF /ETASIS 650082 Test 2/NFPA 701 • CSFM T 19	

Surface treatment: Fluotop®T2 (High concentration PVDF)  
 Reverse side treatment: Weldable PVDF (for better resistance to pollution on the reverse side of the fabric)  
 PVDF Back treatment utilizes the excellent anti-aging quality of fluoropolymers without modifying fabric production procedures which enables superior finishes for all types of projects from any angle.

(a) Tejido Mehler para cámara interior

(b) Tejido Ferrari para funda exterior

Figura 4.7: Fichas técnicas de los tejidos seleccionados para el tubo hinchable

Propiedad característica			
Propiedad	Unidad	Método de ensayo	Valores mínimos
Módulo elástico	GPa	Annex D, EN 13706-2:2002	23
Módulo elástico a tracción en dirección longitudinal	GPa	EN ISO 527-4	23
Módulo elástico a tracción en dirección transversal	GPa	EN ISO 527-4	7
Resistencia a tracción en dirección longitudinal	MPa	EN ISO 527-4	240
Resistencia a tracción en dirección transversal	MPa	EN ISO 527-4	50
Resistencia a aplastamiento en dirección longitudinal	MPa	Anexo D, EN 13706-2:2002	150
Resistencia a aplastamiento en dirección transversal	MPa	Anexo E, EN 13706-2:2002	70
Resistencia a flexión en dirección longitudinal	MPa	EN ISO 14125	240
Resistencia a flexión en dirección transversal	MPa	EN ISO 14125	100
Resistencia a cortante en dirección longitudinal	MPa	EN ISO 14130	25

Figura 4.8: Características del tablero de FRP

### 4.2.3. Eslingas Dyneema

El elemento de tracción se realizará mediante eslingas de material Dyneema. Este material tiene las propiedades indicadas en la tabla de la figura 4.9.

### 4.2.4. Elementos metálicos

Como elementos metálicos se prevé la utilización de tornillos, chapas y barras roscadas, cuyas características mecánicas se indican en los cuadros de la figura 4.10.

Tipo de Fibra	Resistencia tracción			Módulo elástico			Deformación a rotura %
	N/tex	g/den	GPa	N/tex	g/den	GPa	
Dyneema SK78 Dyneema SK75	3.4 – 4.0	38 – 45	3.3 – 3.9	112 – 137	1267 – 1552	109 – 132	3 – 4
Dyneema SK65 Dyneema SK62 Dyneema SK60	2.5 – 3.4	28 – 38	2.4 – 3.3	67 – 102	759 – 1158	65 – 100	
Dyneema SK25	2.2	25	2.2	54	608	52	

Propiedades mecánicas		
Free breaking length	378	Km
Axial tensile strength	3.6	GPa
Axial tensile modulus	116	GPa
Axial compressive strength	0.1	GPa
Axial compressive modulus	116	GPa
Transverse tensile strength	0.03	GPa
Transverse modulus	3	GPa
Transverse compressive strength	0.1	GPa
Elongation at break	3 – 4	%
Work to break	45 – 70	MJ/m <sup>2</sup>
Creep at 30°C, 300MPa (Dyneema SK75)	0.02	%/day
Creep at 30°C, 300MPa (Dyneema SK78)	0.006	%/day

Variación de propiedades según temperatura:

Relative to 23°C	-60°C	+23°C	+60°C	+100°C
Tensile strength	110%	100%	80%	55%
Tensile modulus	110%	100%	85%	60%
Elongation at break	90%	100%	100%	105%

Figura 4.9: Propiedades de la eslinga de Dyneema

Tornillos

Limite elástico mínimo $f_{yb}$ y resistencia a tracción $f_{ub}$ de los tornillos (N/mm <sup>2</sup> )							
Tipo de tornillo	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
$f_{yb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	240	320	300	400	480	640	900
$F_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> )	400	400	500	500	600	800	1000

Según EC-3

Limite elástico mínimo $f_{yb}$ y resistencia a tracción $f_{ub}$ de los tornillos (N/mm <sup>2</sup> )					
Tipo de tornillo	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
$f_{yb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	240	300	480	640	900
$F_{ub}$ (N/mm <sup>2</sup> )	400	500	600	800	1000

Según EAE

Perfiles y chapas laminados en caliente

Limite elástico mínimo y resistencia a tracción (N/mm <sup>2</sup> )				
Tipo	Espesor nominal (t)			
	t ≤ 40		t > 40	
	$f_y$	$f_u$	$f_y$	$f_u$
S 235	235	360 < $f_u$ < 510	215	360 < $f_u$ < 510
S 275	275	430 < $f_u$ < 580	255	410 < $f_u$ < 560
S 355	355	490 < $f_u$ < 680	335	470 < $f_u$ < 630

Según EAE

Barras de acero corrugado para armadura pasiva

Tipo de acero	Acero soldable		Acero soldable con características especiales de ductilidad	
	B 400 S	B 500 S	B 400 SD	B 500 SD
Designación				
Limite elástico, $f_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	≥ 400	≥ 500	≥ 400	≥ 500
Carga unitaria de rotura, $f_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	≥ 440	≥ 550	≥ 480	≥ 575
Alargamiento de rotura, $\epsilon_{u,5}$ (%)	≥ 14	≥ 12	≥ 20	≥ 16
Alargamiento total bajo carga máxima, $\epsilon_{max}$ (%)	≥ 400	≥ 5	≥ 7,5	≥ 7,5
	≥ 400	≥ 7,5	≥ 10	≥ 10
Relación $f_s/f_y$	≥ 1,05	≥ 1,05	1,20 ≤ $f_s/f_y$ ≤ 1,35	1,15 ≤ $f_s/f_y$ ≤ 1,35
Relación $f_{y,real}/f_{y,nominal}$	-	-	≤ 1,20	≤ 1,20

Figura 4.10: Características mecánicas de los elementos metálicos

### 4.3. Requerimientos del PVH-LMP

A modo de resumen a continuación se presenta de forma esquemática los requerimientos que debe cumplir el Puente de Vigas Hinchables Ligeros, Modular y Portátil (PVH-LMP), ya sea por normativa o por unas líneas de diseño predefinidas:

- El cálculo y diseño del puente debe regirse por la normativa militar "Trilateral Design Test Code"[27], considerando el vehículo de diseño MLC 30.
- Luz del puente de 14 m y ancho mínimo libre para la circulación de 3,35 m.
- Tamaño máximo de las piezas del puente determinado por las dimensiones útiles de un contenedor estándar de Airbus de 88" x 54", que son 2,134 m x 1,270 m x 1,70 m.
- Puente auto-resistente a su propio peso en caso de una pérdida de presión de hinchado de los tubos o de su deshinchado total.
- Puente ultraligero, con un volumen de logística y transporte reducido al máximo.
- Sistema de ensamblaje mediante elementos simples, sin necesidad de especialización.
- Sistema de posicionamiento que no requiera helicóptero o grúas pesadas.
- Tiempo de montaje cuantificable en horas.

## Capítulo 5

# Diseño, cálculo, fabricación y validación experimental de prototipos de PVH-LMP

### 5.1. Ensayos previos

En un estudio previo al diseño, cálculo y fabricación de un prototipo de viga de PVH-LMP a tamaño real, se ha realizado la fabricación de un prototipo a escala. Este prototipo de viga tiene 4 metros de longitud y está formado por un tubo hinchable de 0,5 metros de diámetro en la sección central (con forma de cigarro más estrecho en las puntas), por un tablero de madera de espesor 12 mm como elemento de compresión y cintas de carga de 35 mm de anchura como elementos de tracción y sostenimiento del tubo contra el tablero (figuras 5.1 y 5.2).

Este prototipo ha sido fabricado con dos objetivos claramente definidos. Por un lado validar el concepto de la tecnología Tensairity en forma de un prototipo físico real, y por el otro realizar un ensayo de carga en laboratorio para validar los resultados obtenidos en la simulación numérica mediante el cálculo con Stampack.

Stampack es un programa de elementos finitos resultado de un continuo trabajo de investigación llevado a cabo por varios investigadores del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE) en Barcelona. El programa se basa en el método de elementos finitos explícito y se usa para la simulación numérica de procesos de estampación de chapa. La versión actual sólo permite el uso de materiales isótropos en los modelos. A pesar de ser un programa pensado para problemas de estampación de chapa, me-

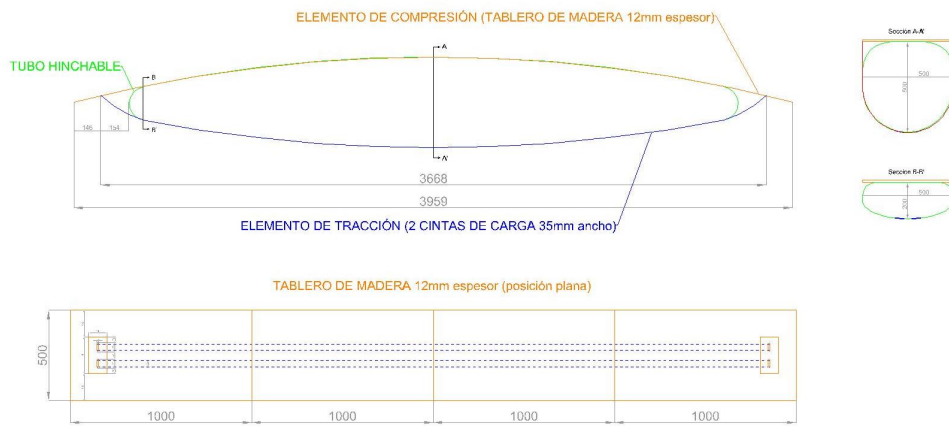


Figura 5.1: Planos de diseño del prototipo



Figura 5.2: Prueba de concepto del prototipo

diante algunas modificaciones significativas se pueden realizar simulaciones con materiales tipo membrana, presentes en las estructuras hinchables.

El prototipo ha sido ensayado en el laboratorio de la UPC-LITEM en Terrassa (Barcelona) (figura 5.3), y los detalles de resultados se presentan en el apéndice A. Como resumen, el prototipo se ha ensayado controlando, entre otros, los desplazamientos en el centro de la viga, con una presión de hinchado de 220 mbar. La carga máxima alcanzada han sido 2,15 KN y la deformación máxima obtenida 115,9 mm.

Comparando los resultados del ensayo con la simulación, según las mismas condiciones de carga, se puede apreciar que el software reproduce muy bien la realidad (figura 5.4), con lo cual queda validado para el cálculo del puente completo a tamaño real.

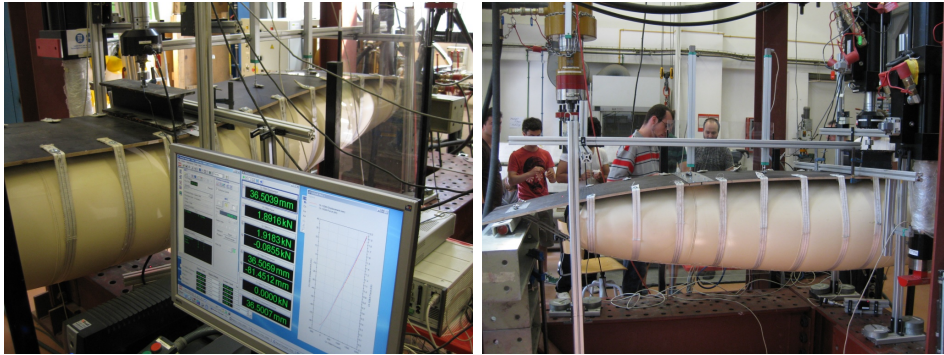


Figura 5.3: Ensayo de carga del prototipo en laboratorio

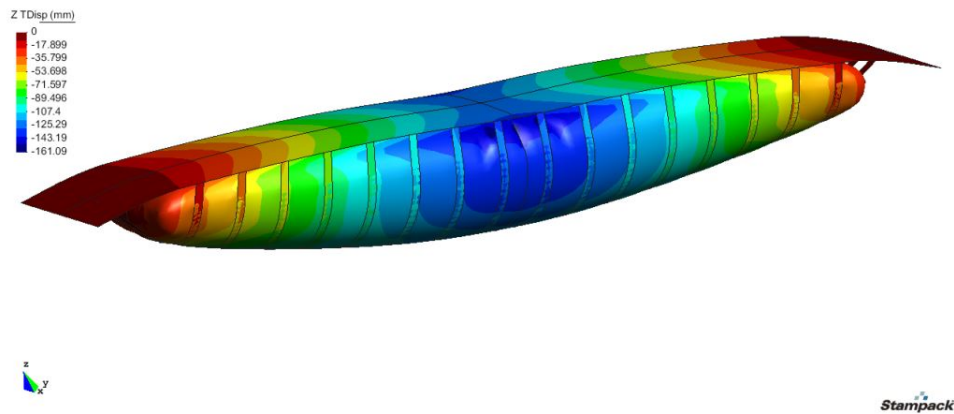


Figura 5.4: Desplazamientos verticales en el ensayo numérico del prototipo

En la figura 5.5 se representa el desplazamiento vertical de varios puntos del prototipo, acorde con las medidas tomadas en el ensayo de laboratorio, y su comparación. La medida de deflexión en el centro del tablero según la simulación es de 112,5 mm, mientras que en el ensayo de laboratorio era de 115,9 mm (sólo 3,4 mm de diferencia).

## 5.2. Prediseño

Los estudios preliminares se han centrado en encontrar un diseño que pudiese combinar la facilidad de montaje con un adecuado comportamiento estructural frente a las acciones aplicadas. Para ello se han estudiado diversas posibilidades, analizando sus pros y contras, las cuales se comentan a continuación.



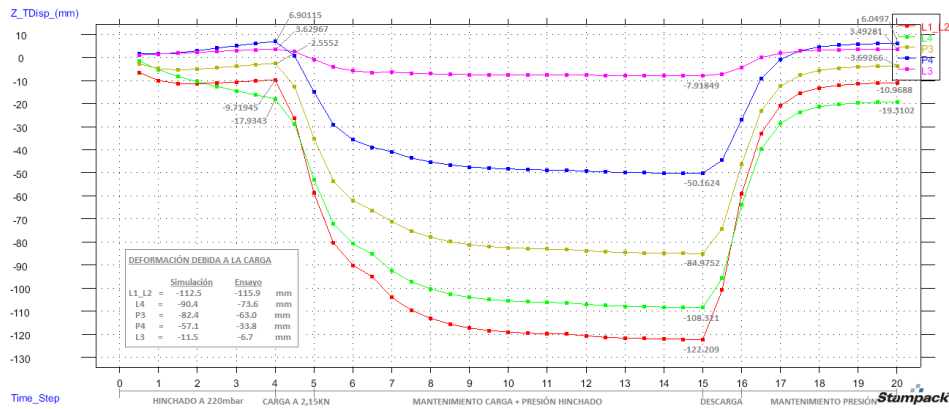


Figura 5.5: Comparativa de desplazamientos verticales entre el ensayo numérico y real del prototipo

Una primera propuesta preveía la construcción de dos vigas independientes de aproximadamente 1,70 m de ancho cada una para alcanzar un ancho mínimo de 3,40 m, superior al mínimo de 3,35 m previsto para puentes de clase MLC 30. En este caso cada eje longitudinal del vehículo afecta a una de las dos vigas. Esta misma configuración de dos vigas se ha mantenido hasta la solución que, en este momento, se considera como la más idónea.

Inicialmente cada viga estaba formada por un tubo hinchable en forma de huso, con una altura máxima en el centro de aproximadamente 1,40 m. En este caso el tablero sería curvo, adecuándose a la forma de la cara superior del hinchable. Esto garantizaba un buen comportamiento estructural pero dificultaba enormemente la puesta en obra de los elementos del tablero que deberían adoptar una configuración poligonal. Los paneles de dos metros de longitud estaban formados por elementos de menores dimensiones pegados entre ellos en correspondencia con las alas inferiores y superiores y con las almas verticales. Dos perfiles en U, también pegados al paquete de elementos del tablero en sus bordes longitudinales, completan la configuración de cada panel.

Se ha pasado así a estudiar una nueva solución con el elemento neumático de características similares al anterior pero con su cara superior horizontal. Esta solución permite mantener plano el tablero, simplificando su montaje. El criterio de formación de los paneles se ha mantenido idéntico al caso anterior, sin embargo se han barajado distintas alternativas de conexión, en función de la dirección de los nervios. Por ejemplo, en el caso de éstos colocados en dirección longitudinal, se había comentado el empleo de un pretensado longitudinal con los cables discurriendo entre los aligeramientos para garantizar una adecuada conexión longitudinal entre paneles.

También se ha estudiado el caso de colocación de los nervios (y de los aligeramientos) en sentido transversal. La transmisión de esfuerzos longitudinales se realiza únicamente a través de los perfiles situados en los bordes de los paneles. En este caso la transmisión de los esfuerzos del hinchado del tubo provoca flexión y cortante en los nervios y alas de los paneles del tablero, sin producir esfuerzos en dirección longitudinal ya que estos vienen resistidos por la membrana unida al tablero. Deben por tanto dimensionarse las uniones entre membrana y perfiles sin que ello provoque esfuerzos en dirección longitudinal en estos últimos. Sin embargo, las acciones exteriores de tráfico producen axiles, flectores y cortantes sobre los perfiles. En la zona de las juntas entre perfiles se concentran una serie de esfuerzos muy elevados que deben transmitirse mediante tornillos entre perfiles adyacentes. Esta solución es absolutamente inviable si se emplean perfiles en FRP ya que se trata de un material ortótropo con una diferencia muy importante entre la resistencia en dirección paralela a las fibras respecto a la en dirección perpendicular a las mismas. Además las normas de aplicación penalizan fuertemente las uniones atornilladas en elementos de FRP con lo cual los nodos de conexión entre paneles resultan de dimensiones totalmente inaceptables.

Por todas estas razones, en la versión final desarrollada se ha vuelto al planteamiento de paneles de tableros con nervios longitudinales. En este caso no se prevén perfiles longitudinales sino transversales en correspondencia con los extremos de cada panel.

En resumen, el PVH-LMP está compuesto por 2 vigas hinchables de 14 m de longitud y 1,70 m de anchura. El tubo hinchable tiene forma de huso textil, con una longitud de 11,20 m y una sección transversal en el centro de 1,40 m de altura y 1,70 m de ancho. La anchura del tubo se mantiene a lo largo de la longitud de la viga y la cara superior en contacto con el elemento de compresión se mantiene plana con ancho horizontal constante, de 1300 mm aproximadamente. El peso estimado del puente completo es de unas 5 tn y la capacidad de carga alrededor de 30 tn. Su volumen empaquetado será de unos 12 m<sup>3</sup>.

A partir de este diseño se ha procedido a la realización de un modelo simplificado para obtener una estimación de esfuerzos en los elementos (capítulos 5.3.1 y 5.3.2). Posteriormente se ha realizado un modelo más detallado para calcular mediante elementos finitos los esfuerzos y deformaciones en toda la estructura (capítulo 5.3.3).

## 5.3. Cálculo

### 5.3.1. Modelo físico

En este apartado se ha tomado como referencia la bibliografía básica de Tensairity [17] adaptándola a las necesidades y requerimientos del prototipo de PVH-LMP. De esta forma se ha obtenido una formulación básica de partida para el diseño y cálculo de éste.

El funcionamiento de una viga Tensairity se puede describir mediante una mezcla de teoría de vigas, membranas y cables. El concepto inicial de esta tecnología [17] fue pensado para una viga cilíndrica envuelta por unos cables en espiral, si bien en posteriores estudios [18, 19] se analizaron otras formas. La forma elegida para este proyecto es la de huso textil, con lo cual los cables en espiral degeneran en líneas curvas trazadas por la parte inferior del tubo (figuras 5.6 (c) y (d)). Con este condicionante de partida se desarrolla a continuación el modelo físico teórico para este tipo de vigas Tensairity.

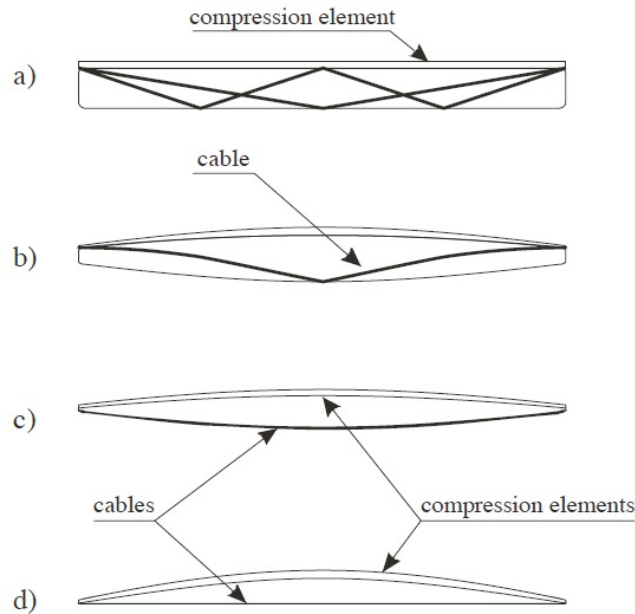


Figura 5.6: Evolución formas viga Tensairity: (a) Cilindro con refuerzo de cables, (b) Cigarro, (c) Huso textil simétrico, (d) Huso textil asimétrico

**Geometría teórica**

Consideremos una viga Tensairity de longitud  $L$  con forma de huso textil que en el centro tiene un diámetro  $2R_0$  sometida a unas determinadas cargas en su parte superior, sobre el elemento de compresión (figura 5.7). El perfil longitudinal del tubo lo suponemos con forma circular de radio  $r$  para facilitar los cálculos. Otra opción sería suponerlo parabólico acorde con la ley de momentos flectores, pero en nuestro caso ambas opciones son muy parecidas tal y como se ha mostrado en el capítulo 4.1.1. El radio  $r$  se relaciona de forma sencilla con  $L$  y  $R_0$ :

$$r^2 = \left(\frac{L}{2}\right)^2 + (r - 2R_0)^2 \Rightarrow \boxed{r = \frac{L^2}{16R_0} + R_0} \quad (5.1)$$

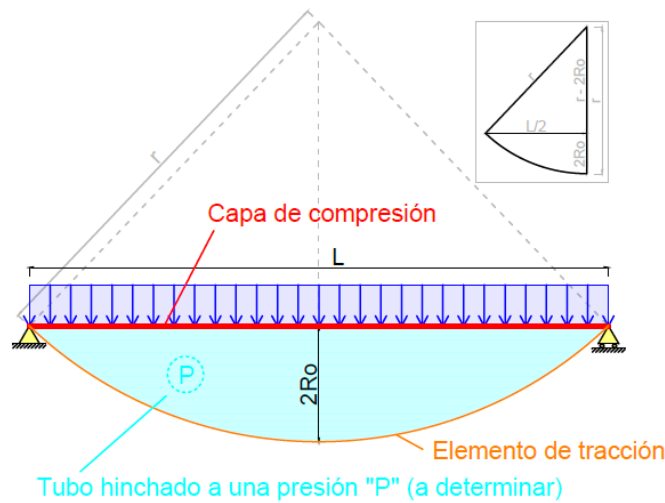


Figura 5.7: Viga Tensairity simplemente apoyada sometida a la acción de cargas externas

**Fuerzas en el cable (elemento de tracción)**

Por una parte el cable tiene que absorber el momento flector máximo que tendremos en el centro de la viga (figura 5.8). La tensión será:

$$M_{fmax} = T \cdot 2R_0 \Rightarrow \boxed{T = \frac{M_{fmax}}{2R_0}} \quad (5.2)$$

Por otra parte el cable interactúa con la membrana, soportando una fuerza normal  $f$ , que según la teoría de cables produce una tensión:

$$T = f \cdot r \tag{5.3}$$

donde  $r$  es el radio de curvatura.

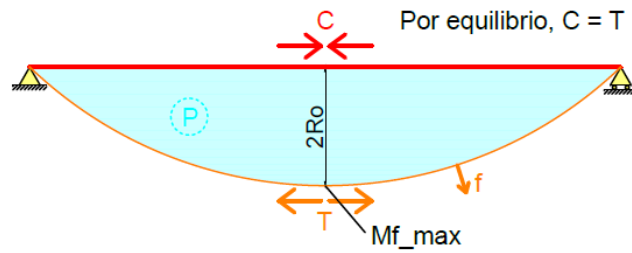


Figura 5.8: Esfuerzos sobre una viga Tensairity simplemente apoyada

Suponiendo un esquema similar al propuesto en [17] tenemos que el cable deforma el tubo hinchable según se muestra en la figura 5.9. La tensión circunferencial máxima en la tela se produce en el centro de la viga, y viene dada por:

$$n = p \cdot R_0 \tag{5.4}$$

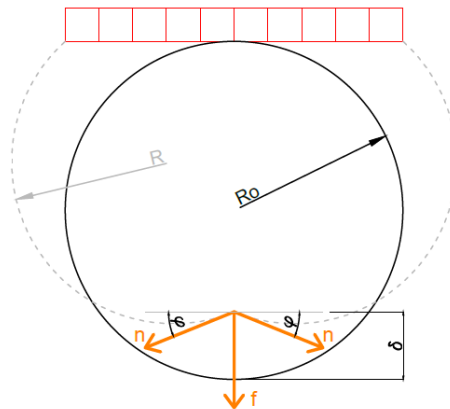


Figura 5.9: Deformación del tubo debido a la interacción con los elementos de tracción y compresión

Asumiendo que el esquema obtenido es similar al que se propone en [17] tenemos que:

$$f = 2n \cdot \sin\varphi \quad \Rightarrow_{\text{si } \frac{\delta}{R_0} \leq 0,2} \quad \boxed{f_{max} = \frac{1}{2}pR_0} \quad (5.5)$$

donde la condición  $\frac{\delta}{R_0} \leq 0,2$  significa que asumimos que el cable no penetra en el tubo más de un 20% del radio inicial de diseño.

Considerando las ecuaciones 5.1, 5.3 y 5.5 obtenemos la tensión en el cable debido al contacto con la tela hinchada a una presión  $p$ :

$$\boxed{T = \frac{1}{2}pR_0 \left( \frac{L^2}{16R_0} + R_0 \right)} \quad (5.6)$$

Igualando las ecuaciones 5.2 y 5.6 obtendremos la presión necesaria a la que hay que hinchar el tubo para sostener unas determinadas cargas que produzcan un momento flector máximo ( $M_{fmax}$ ) en el centro de la viga:

$$\boxed{p = \frac{M_{fmax}}{R_0^2 \left( \frac{L^2}{16R_0} + R_0 \right)}} \quad (5.7)$$

### **Esfuerzos en el tablero (elemento de compresión)**

Según la figura 5.8, por equilibrio de fuerzas se obtiene que el valor de la compresión es el mismo que el de la tracción, con lo cual a partir de la ecuación 5.6 se deduce:

$$\boxed{C = \frac{1}{2}pR_0 \left( \frac{L^2}{16R_0} + R_0 \right)} \quad (5.8)$$

### **Efectos locales de la presión**

Si consideramos una viga Tensairity donde la capa de compresión está compuesta por varios tableros, la carga de una rueda de un vehículo se repartirá sobre el tubo hinchable en una superficie igual a la del tablero (figura 5.10). En nuestro caso, los tableros están unidos entre sí para formar un conjunto rígido y disminuir estos efectos locales, con lo cual la carga

será absorbida parcialmente por el resto de los tableros contiguos a través de sus uniones. Es por ello que si consideramos que la carga de una rueda es absorbida únicamente por uno de estos tableros estaremos del lado de la seguridad. En este sentido, si cada tablero tiene longitud  $l$  y ancho  $h$ , el apoyo de una rueda con una carga  $Q$  produce una presión local:

$$p_{local} = \frac{Q}{l \cdot h} \quad (5.9)$$

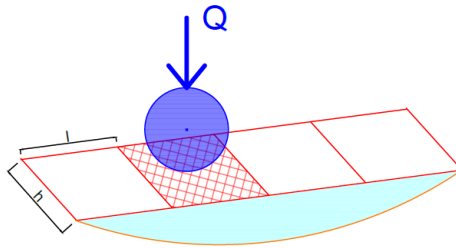


Figura 5.10: Elemento de compresión de una viga Tensairity formada por varios tableros

### Presión de hinchado

En conclusión, la presión a la que se debe hinchar el tubo para sostener unas determinadas cargas será el valor máximo obtenido en las ecuaciones 5.7 y 5.9, que consideran efectos globales y locales respectivamente.

$$p = \max \left\{ \frac{M_{fmax}}{R_0^2 \left( \frac{L^2}{16R_0} + R_0 \right)}, \frac{Q}{l \cdot h} \right\} \quad (5.10)$$

### 5.3.2. Modelo analítico simplificado: estimación de esfuerzos en elementos

A partir del modelo físico descrito en el apartado 5.3.1 se ha elaborado un procedimiento práctico mediante un archivo de Excel a partir del cual, introduciendo unos pocos parámetros básicos, se obtiene una primera estimación de los esfuerzos que deberá soportar la viga del PVH-LMP. Estos parámetros introducidos son los siguientes:

- *Luz*: longitud total de la viga, no del tubo hinchado.
- *Radio  $R_0$* : radio del tubo en el centro de la viga, medido verticalmente (la medida horizontal del tubo suele ser mayor, pero lo que interesa es su altura, puesto que determina la distancia de separación entre elemento de tracción y de compresión).
- *Ancho placas*: anchura del elemento de compresión, la cual determina la distancia máxima transversal que puede apoyarse sobre el tubo para repartir la carga.
- *Largo placas*: longitud de cada una de las piezas que componen el elemento de compresión de la viga, la cual determina la longitud máxima sobre el tubo en la que puede repartirse una carga que esté sobre una pieza en particular.
- *Peso total viga*: peso propio estimado de una viga (valor poco importante comparado con el peso de los vehículos de diseño del puente).
- *Coficiente de seguridad*: coeficiente de mayoración de las cargas para poder obtener un prediseño adecuado de la viga.

Otro dato importante que hay que agregar es el tren de cargas de diseño del puente. Para ello se ha recurrido a la normativa militar "Trilateral Design Test Code"[27] y los vehículos de diseño MLC. Los datos de estos vehículos son introducidos en otra pestaña aparte, donde se definen las cargas por eje, distancia entre ejes, carga por rueda para el caso de vehículos de neumáticos y de orugas. A partir de estos datos se obtienen los momentos flectores y cargas por rueda máximos, y son enviados a la pestaña inicial.

A partir de estos datos de entrada se obtienen varios resultados, de los cuales los más importantes son:

- *Presión de hinchado de la viga*: presión a la cual se debe hinchar el tubo para contrarrestar los efectos globales y locales de cargas.
- *Tensión en la membrana*: tensión circunferencial que tiene que poder soportar el tubo hinchable.
- *Tracción en el cable*: esfuerzo máximo de tracción a la que está sometido el cable u otro elemento de tracción de la viga.
- *Compresión en el tablero*: esfuerzo máximo de compresión que debe aguantar el elemento de compresión de la viga.



- *Carga vertical sobre el cable y el tablero:* carga por unidad de longitud que ejerce el tubo sobre el cable por un lado, y sobre el tablero por el otro.

Como experiencia práctica de referencia se ha diseñado un puente de 14 metros de largo formado por 2 vigas Tensairity con unas medidas del tubo en centro vano de 1,40 m de altura y 1,70 m de ancho. El elemento de compresión de cada viga está dividido en 7 piezas de 2,00 metros de longitud y 1,70 m de anchura. El peso propio estimado del puente es de unas 5 toneladas, mientras que el vehículo militar de diseño es el MLC 30 (peso alrededor de las 30 toneladas). El factor de seguridad recomendado por normativa para la fase de prediseño es de 1,15.

Con estos datos se obtiene una estimación de la presión de hinchado del tubo, así como los esfuerzos que debe soportar cada uno de los elementos del puente, que se resumen a continuación:

- *Presión de hinchado de la viga = 583 mbar*
- *Tensión en la membrana = 41 KN/m*
- *Tracción en el cable = 371 KN*
- *Compresión en el tablero = 371 KN*
- *Carga vertical sobre el cable y el tablero = 21 KN/m*

En el apéndice B se adjuntan las hojas de Excel a partir de las que se han obtenido estos resultados.

### 5.3.3. Simulación numérica

A partir de un diseño más detallado de la viga y con los datos preliminares obtenidos en la estimación anterior, se ha procedido a la modelización mediante elementos finitos con el fin de obtener las deformaciones producidas por la aplicación de la carga de diseño, así como las tensiones en los distintos elementos que la componen. Como ya se propuso en el apartado 5.1, la simulación numérica se ha realizado con el software Stampack.

La viga simulada se ha hinchado a una presión de 600 mbar, lo cual produce unas pre-deformaciones en el tablero. Al aplicar la carga del vehículo de diseño MLC 30 sobre la viga, el centro del tablero tiene una deformación máxima vertical de 327 mm, mientras que el elemento de tracción 366 mm (figura 5.11). Las tensiones en cada uno de los elementos de la viga se muestran en las figuras 5.12 y 5.13.

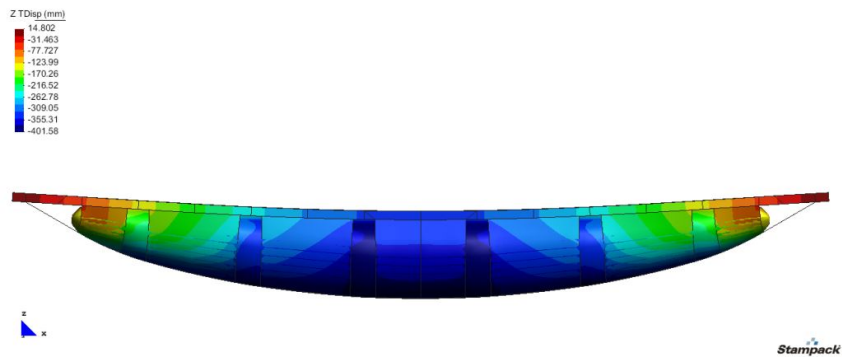


Figura 5.11: Deformación de la viga debido a la carga del vehículo de diseño MLC 30

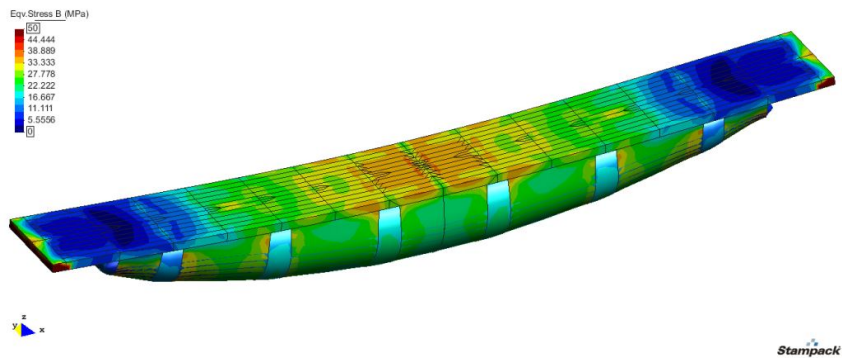


Figura 5.12: Tensiones en la viga debido a la carga del vehículo de diseño MLC 30 (vista superior)

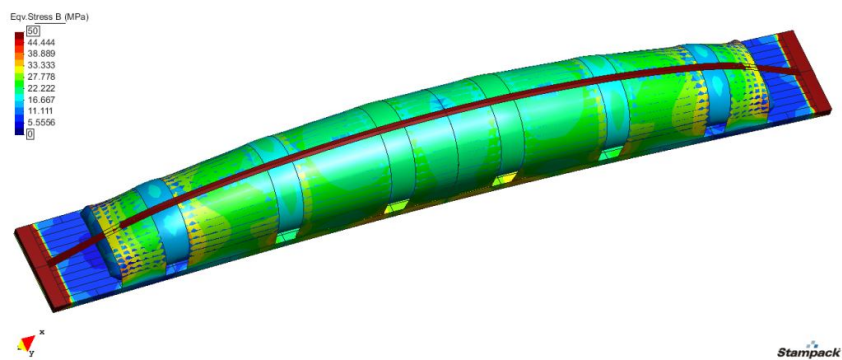


Figura 5.13: Tensiones en la viga debido a la carga del vehículo de diseño MLC 30 (vista inferior)

#### 5.3.4. Efectos dinámicos

Con el objetivo de tener en cuenta los efectos dinámicos, que con total seguridad serán un factor importante en el PVH-LMP, se han revisado con detenimiento los requisitos impuestos según la normativa militar "Trilateral Design Test Code"[27]. Curiosamente ésta no exige ningún tipo de cálculo complejo como se podría esperar, sino que simplemente obliga a aumentar las cargas estáticas por un "Factor de Impacto", correspondiente a un incremento del 15 %.

Literalmente la normativa define este factor como "el factor aplicado a una carga estática para considerar la carga dinámica inducida equivalente, causada por el movimiento de dicha carga ". Este factor de impacto aplicado a la carga de los vehículos de diseño MLC cubre velocidades de cruce de hasta 25 km/h.

A falta de un estudio dinámico más exhaustivo mediante el uso de métodos numéricos avanzados, tal y como se comenta en el apartado 8 de desarrollos futuros, ésta es una primera aproximación que se ha utilizado en la presente tesis y que además está descrito en la normativa adoptada.

### 5.4. Diseño constructivo

La estructura prototipo se ha diseñado pensando en usar exclusivamente elementos estándar existentes en el mercado, adaptándolos según las necesidades de forma para que no sea necesario fabricar piezas a medida ni realizar construcciones complejas.

La estructura proyectada consta esencialmente de cuatro elementos principales:

1. Un elemento hinchable, formado por dos membranas concéntricas sometidas a una presión máxima de 200 mbar
2. Un tablero de paneles y perfiles en material plástico fibro-reforzado (FRP)
3. Un elemento de tracción de material textil (Dyneema) que conecta el elemento hinchable con el tablero
4. Unas vigas metálicas transversales para el anclaje del elemento de tracción y para la transmisión de reacciones al terreno

La estructura debe además adecuarse a unos condicionantes que puedan ser compatibles con el transporte en elementos de dimensiones reducidas. En este sentido se fija en aproximadamente 2 m la longitud máxima de cada elemento. No obstante, debido a temas de disponibilidad del material de FRP para la fabricación del prototipo, algunos paneles medirán 2,50 m de largo, lo cual no debería ser así en el puente definitivo.

El tablero está formado por paneles de 160 mm de canto y aproximadamente 300 mm de ancho, nervados y encolados entre ellos longitudinalmente. Se forman así elementos de 1,70 m de ancho y 2,00 m (o 2,50 m) de longitud. En correspondencia con las juntas transversales se disponen, mediante la aplicación de adhesivos, perfiles en U de 180 mm de canto. La conexión entre elementos en dirección longitudinal se realiza con barras de acero dispuestas en la zona de juntas y pasantes a través de la misma. El acceso para atornillar estas barras se consigue con una apertura circular en correspondencia con la zona no nervada de la platabanda inferior. Inicialmente se pensó en disponer tramos de barra cortos justo en las uniones entre paneles, pero dada la dificultad de fabricación se ha optado finalmente por usar tramos de barra más largos, aunque éstos superen ahora las dimensiones máximas permitidas (este detalle se estudiará en profundidad de cara al diseño final del puente). Para absorber los esfuerzos cortantes en las juntas entre paneles se dispone de un anillo fabricado en acero que garantiza el contacto entre los dos paneles contiguos y la barra sin deslizamiento alguno entre sí.

El tablero se apoya directamente sobre el elemento hinchable que ejerce una reacción de tipo suelo elástico. A su vez la membrana del elemento hinchable se sujeta al tablero mediante bandas de tejido que abrazan el tubo y se anclan a los laterales de los paneles con unas chapas metálicas atornilladas comprimiendo la tela.

Las cargas verticales aplicadas sobre el tablero provocan deformaciones del elemento hinchable que se transmiten al elemento de tracción formado por las eslingas de Dyneema, un material textil de muy altas resistencias mecánicas. Las eslingas se unen con el tablero por medio de los apoyos de acero en ambos extremos de la viga, ancladas a unos elementos formados por barras roscadas que permiten regular su tensión.

En el apéndice C se adjuntan los planos de diseño del puente.

Para las uniones se han realizado varias pruebas en cada una de las partes que componen la viga. Estas comprenden pruebas de soldadura y costura de los tejidos del tubo hinchable, comprobación de estanqueidad del material y las válvulas, adhesión de los perfiles FRP entre sí y con otros materiales como acero o madera, etc. (figuras 5.14, 5.15 y 5.16).



Figura 5.14: Pruebas de soldadura y costura de los tejidos



Figura 5.15: Comprobación de estanqueidad del material y las válvulas



Figura 5.16: Adherencia entre materiales y pruebas de carga de los perfiles FRP pegados

## 5.5. Fabricación de un prototipo de viga

En una primera etapa se fabricó un prototipo de una primera viga del puente con el objetivo de ensayarla frente a la acción de las cargas de diseño y medir las deformaciones, así como realizar pruebas de manipulación, transporte y montaje/desmontaje.

Para ello se han realizado las siguientes tareas, las cuales están directamente relacionadas con los cuatro elementos principales de que está compuesta la estructura.

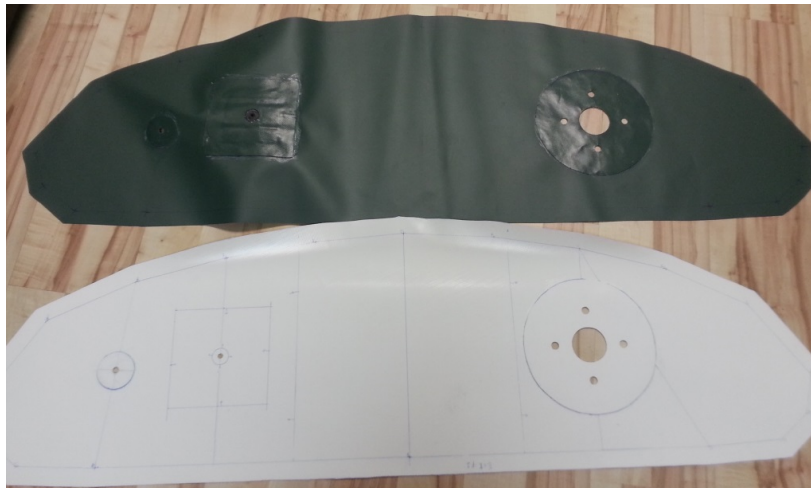
### 5.5.1. Fabricación del tubo hinchable

El tubo hinchable está compuesto por 2 partes, una cámara interior estanca al aire y una funda exterior que le confiere resistencia al conjunto.

El proceso de fabricación empieza con el corte de los patrones de ambas capas según patronaje. A continuación se prepara la punta del tubo con los detalles donde irán el sensor de presión, válvula de medición manual y conexiones con la conducción de aire a presión (figuras 5.17 y 5.18). Seguidamente se procede con la cámara interior del tubo, soldando las puntas mediante una máquina de soldar por alta frecuencia de pequeño tamaño para trabajar bien con la curvatura de éstas (figura 5.19), y posteriormente se suelda el resto del tubo mediante una máquina de mayor tamaño (figura 5.20). Antes de cerrar se añaden los detalles inicialmente previstos y luego se hace un hinchado de prueba (figura 5.21).

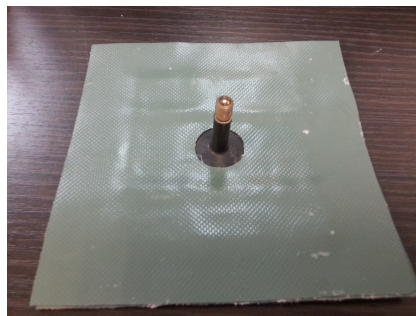


(a) Vista exterior de la punta de la cámara interior del tubo



(b) Vista interior de la punta de las cámaras interior (verde) y exterior (blanca) del tubo

Figura 5.17: Preparación de la punta del tubo hinchable con detalles para válvulas, bridas y sensores



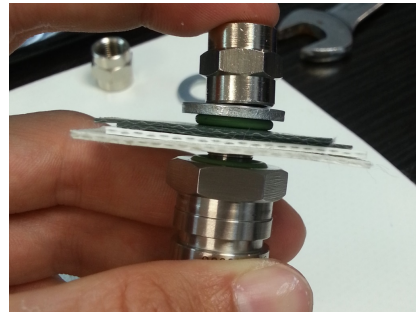
(a) Válvula medición manual



(b) Brida de conexión con la conducción de aire



(c) Brida de conexión con la conducción de aire



(d) Sensor de presión

Figura 5.18: Detalle de los elementos de la punta del tubo hinchable



Figura 5.19: Soldadura de la punta de la cámara interior del tubo hinchable

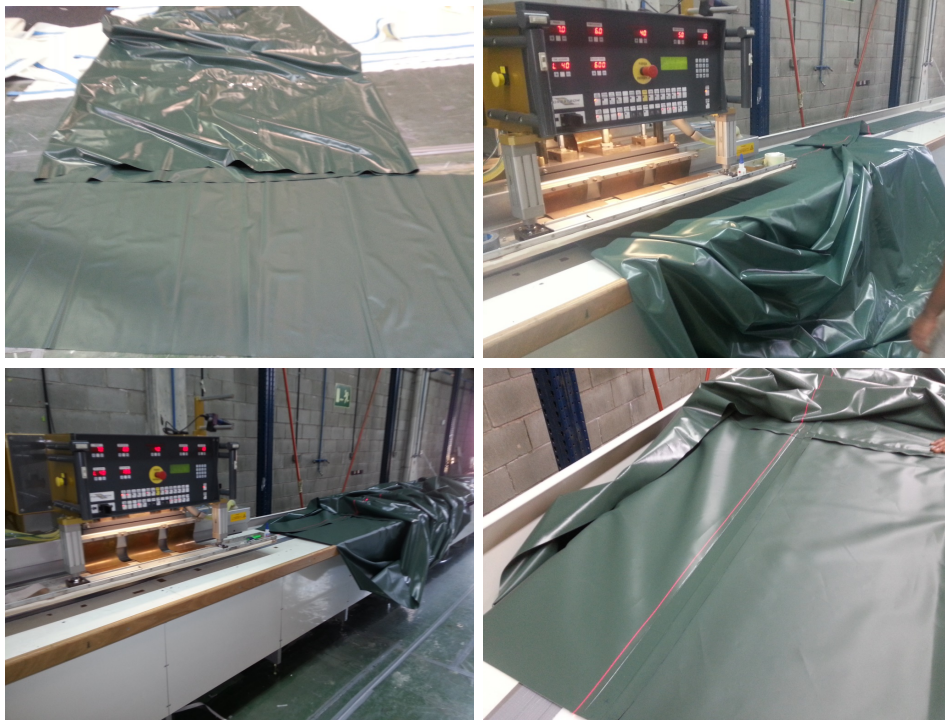


Figura 5.20: Soldadura del cuerpo central de la cámara interior del tubo hinchable



Figura 5.21: Cámara interior del tubo hinchable terminada

A continuación se realiza el mismo proceso con la funda exterior del tubo, con la diferencia que las puntas no se sueldan sino que se cosen (figura 5.22). El resto del cuerpo se suelda igual (figura 5.23). Para finalizar se inserta la cámara interior dentro de la funda (figura 5.24), se cierra mediante costura y se prueba el conjunto (figura 5.25).





Figura 5.22: Costura de la punta de la cámara exterior del tubo hinchable

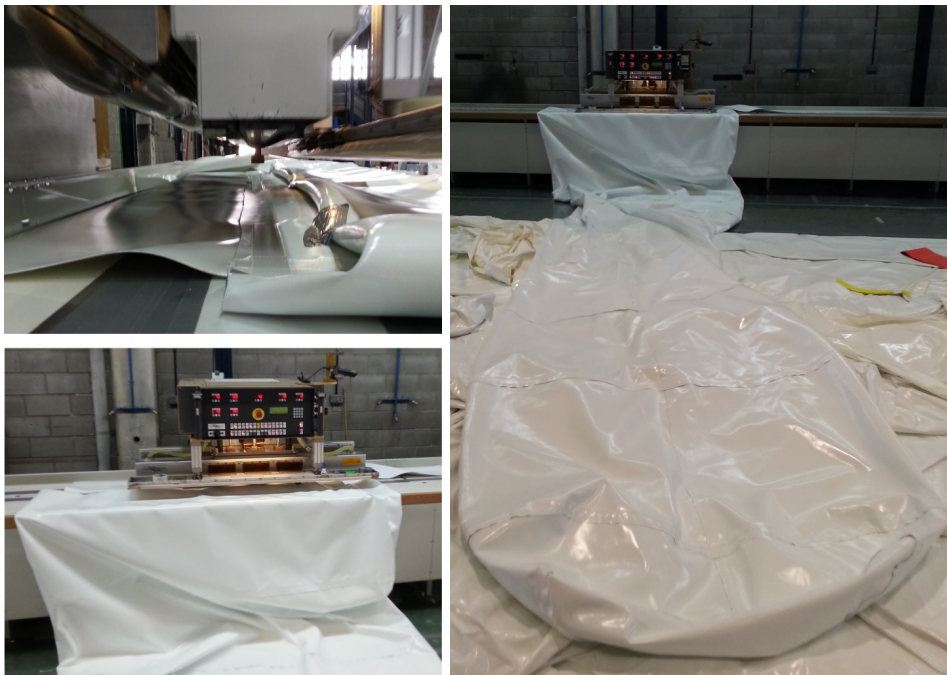


Figura 5.23: Soldadura del cuerpo central de la cámara exterior del tubo hinchable



Figura 5.24: Tubo hinchable terminado



Figura 5.25: Tubo hinchable terminado

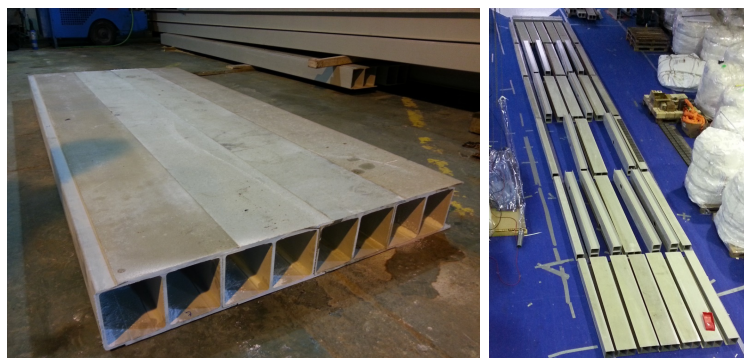
### 5.5.2. Fabricación del tablero de paneles y perfiles FRP

El tablero de la viga lo componen paneles 4 de 2,5 m y 2 paneles de 2,0 m de longitud. Cada panel está formado por perfiles FRP machihembrados encolados entre sí para formar paneles de 1,58 m de anchura (figuras 5.26 y 5.29), los cuales tienen encolados en el interior de sus laterales unas chapas con tuercas soldadas (figura 5.27) para unir el tablero con el tubo hinchable mediante unas bandas de tejido a modo de abrazo, además de disponer en su interior de unos tacos de madera para pasar las barras de acero longitudinales (figura 5.28). Estas barras se unen con manguitos en determinados puntos, accesibles a través de unas perforaciones en la parte inferior del tablero. Por último se completa el panel mediante el encolado de unos perfiles en U que sobresalen 10 cm a cada lado para facilitar la unión entre paneles y la futura unión entre vigas (figura 5.30).



(a) Corte de los perfiles FRP

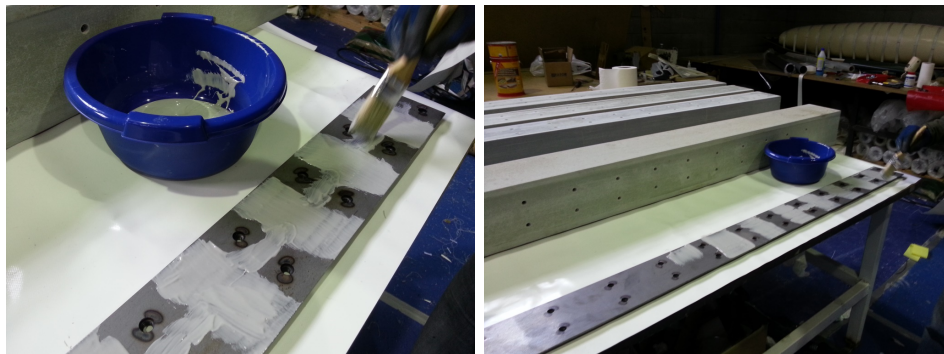
(b) Lijado para el pegado de los paneles



(c) Unión de los perfiles FRP machihembrados antes de encolar

(d) Pre-posicionamiento de los perfiles FRP

Figura 5.26: Preparación de los perfiles FRP para la formación de los paneles del tablero de la viga



(a) Encolado de las placas mediante resina especial (b) Encolado de las placas mediante resina especial



(c) Pegado en el interior y fijación mediante tornillos hasta endurecimiento (d) Pegado en el interior y fijación mediante tornillos hasta endurecimiento (e) Endurecimiento de la resina y extracción de tornillos

Figura 5.27: Pegado de las placas de anclaje del tubo en el interior de los laterales del tablero



(a) Pegado de tacos de madera (b) Perforaciones para la unión de barras

Figura 5.28: Tacos de madera y perforaciones para el paso y unión de las barras de acero longitudinales



Figura 5.29: Pegado de los perfiles FRP machihembrados para formar el cuerpo central de los paneles del tablero



(a) Preparación de perfiles U de FRP para encolar en los extremos del panel

(b) Panel terminado

Figura 5.30: Fabricación de los paneles FRP del tablero de la viga

### 5.5.3. Fabricación de elementos auxiliares para la unión de la eslinga con el tubo y el tablero

El elemento de tracción de la viga consiste en una eslinga tubular de tejido de Dyneema de 12 m de longitud (figura 5.31). Para asegurar el contacto entre la eslinga y el centro de la cara inferior del tubo, así como para mantener el tubo unido al tablero, se han diseñado unas bandas de tejido que se anclan a los laterales de éste, y que disponen de unos pasadores para colocar la eslinga en la posición prevista (figura 5.32). Para unir la eslinga con los extremos de la viga se han diseñado unas piezas de acero que se conectan a éstos a través de barras también de acero (figura 5.33).

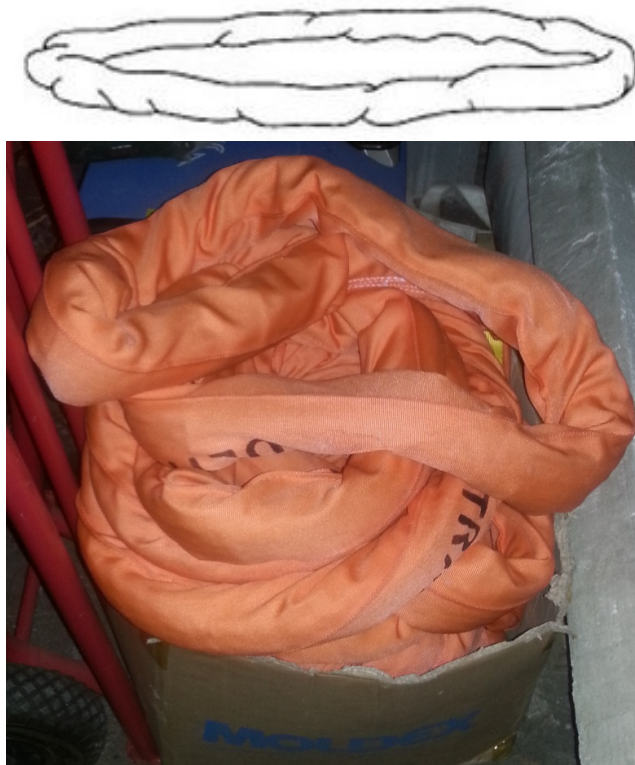


Figura 5.31: Eslinga de tejido de Dyneema el cuerpo central de los paneles del tablero



Figura 5.32: Bandas de tejido ancladas al tablero con pasadores para asegurar el contacto



Figura 5.33: Pieza de acero para la unión entre la eslinga y los extremos de viga

#### 5.5.4. Fabricación de apoyos de acero para los extremos de la viga

Con el fin de conectar el tablero con el elemento de tracción y transmitir a su vez las reacciones al terreno, se han diseñado y fabricado unos elementos de acero. Para levantar la viga y poder girarla durante la fase de posicionamiento se les han añadido unas orejetas en los laterales para levantar la viga y girarla en las operaciones de posicionamiento del puente (figura 5.34).

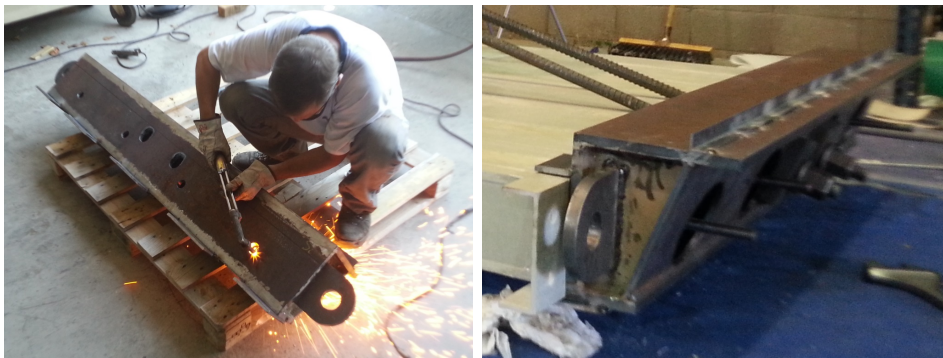


Figura 5.34: Apoyos de acero para los extremos de viga

### 5.5.5. Resultado final

Una vez fabricados todos los elementos por separado que componen el primer prototipo de viga de PVH-LMP, se procede a su montaje en el suelo en posición invertida (figura 5.35). Posteriormente, mediante la ayuda de unos pórticos diseñados para la ocasión, se le da la vuelta y se sitúa sobre unos caballetes también fabricados para este fin (figura 5.36). En el próximo apartado 5.9 se dan más detalles de este proceso.

El peso total de la viga es inferior a 2,5 tn, con lo que el puente completo no llegará a las 5 tn de peso. Dado que su capacidad de carga de diseño es de 30 tn, esto implica una relación de 1 a 6, lo cual le confiere una ligereza que no tienen otras alternativas de puentes.



Figura 5.35: Primer prototipo de viga montado en el suelo





Figura 5.36: Primer prototipo de viga en posición final sobre caballetes

## 5.6. Ensayo del prototipo de viga

La primera viga se ha ensayado con una sobrecarga repartida sobre el tablero de hasta 8 tn (8 sacos de arena de 1 tn cada uno), con una presión de hinchado del tubo de 240 mbar (figura 5.37). No se ha incrementado la carga debido a las grandes deflexiones aparecidas y para evitar posibles roturas en la viga antes de terminar el puente completo (ensayo no destructivo).



Figura 5.37: Prueba de carga de la viga 1 con 8 tn

A continuación se presentan los resultados obtenidos tras la medición de los desplazamientos verticales en cada una de las secciones existentes entre paneles, tanto en el tablero como en la eslinga, para incrementos de carga de 1 tn. En los gráficos presentados (figuras 5.38 y 5.39) se toma como referencia de medida el estado inicial sin carga (obviando en la representación la contraflecha inicial del tablero de la viga debido al hinchado, que en este caso es de 10 cm en el centro).

Como se puede observar en los gráficos obtenidos, la máxima flecha en el centro del tablero con 8 tn de peso es de 26,9 cm, mientras que en la eslinga es de 15,7 cm. Después de 1 hora con la carga en posición, se aprecia un descenso en el centro del tablero de 2,2 cm más, alcanzando los 29,1 cm. De la misma forma, en la eslinga aparece un incremento de la flecha de 1,8 cm, llegando a los 17,5 cm.

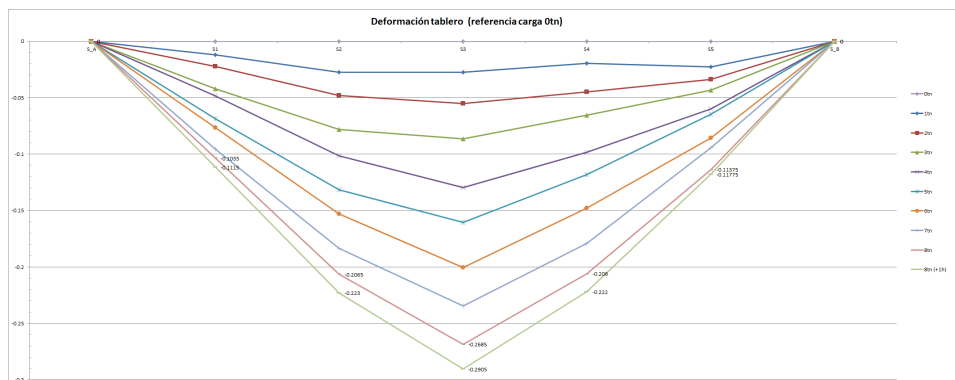


Figura 5.38: Flechas en varias secciones del tablero de la viga 1 en función de la carga (hasta 8 tn) [en metros]

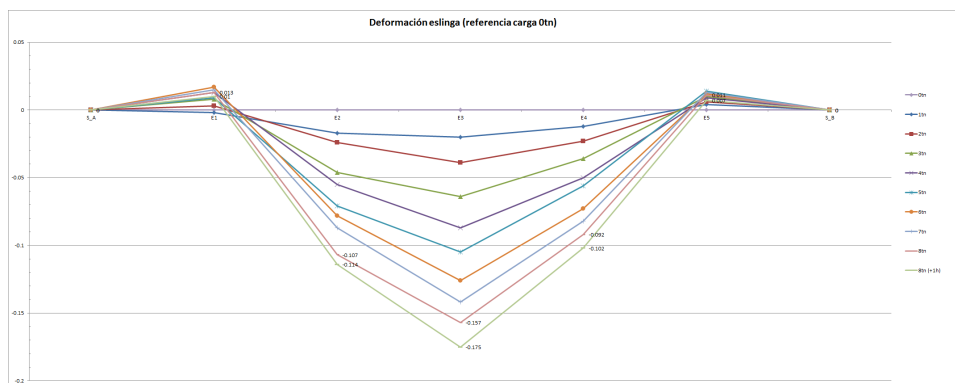


Figura 5.39: Flechas en varias secciones de la eslinga de la viga 1 en función de la carga (hasta 8 tn) [en metros]

Tras un estudio exhaustivo de los resultados y posibles causas de este efecto, se ha llegado a la conclusión que la eslinga de tejido de Dyneema tiene un problema de fluencia al estar sometida a una carga constante, produciéndose un alargamiento adicional indeseado, que incrementa el inicial al entrar en carga. La longitud del elemento entre apoyos inicialmente se fijó en 14,48 m (sin presión de hinchado), y se ha podido observar que al hinchar el tubo a 240 mbar, ésta ha aumentado 1,6 cm.

En la figura 5.40 se puede observar la penetración de la eslinga en el tubo hinchable al estar sometido a la carga de 8 tn, factor clave en el funcionamiento físico de la viga Tensairity.

Como conclusión, después de analizar esta primera experiencia se decide sustituir la eslinga textil por las mismas barras de acero que conectan la

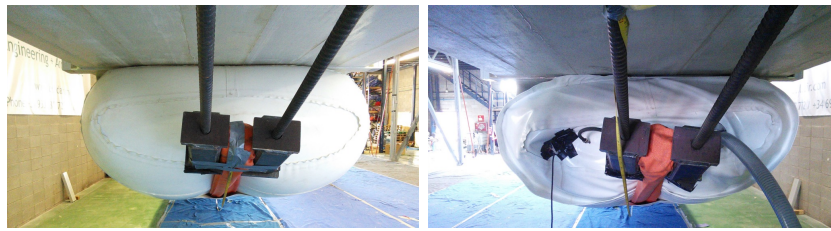


Figura 5.40: Penetración de la eslinga en el tubo y contacto tubo-tablero de la viga 1 con 8 tn de carga

eslinga con el tablero, extendiéndose éstas a lo largo de toda la longitud del tubo. Además esto permite alargar el tubo hinchable un poco más y, en consecuencia, poder cargar la viga más cerca de los apoyos (que también era una limitación en este primer prototipo). Igualmente, para mejorar la transferencia de esfuerzo cortante en las uniones entre paneles, se decidió aumentar la longitud de las arandelas en dichas uniones, junto con la adición de unos discos de FRP en el interior de los perfiles en U, incrementando de esta forma la superficie de contacto.

## 5.7. Rediseño y fabricación de un prototipo de viga mejorado

A partir de las conclusiones obtenidas en las pruebas de carga (apartado 5.6), así como de fabricación en sí (apartado 5.5) y operatividad en el montaje (apartado 5.9), en el primer modelo experimental se ha procedido a rediseñar algunas partes de la viga para fabricar una segunda que fuera más fácil de montar y con un comportamiento mejorado frente a la acción de cargas. Las mejoras introducidas se detallan en los siguientes apartados.

### 5.7.1. Cambio del elemento de tracción

En la primera viga se utilizó una eslinga de tejido de Dyneema, el cual se caracteriza por una elevada resistencia a tracción, pero que tras los ensayos ha mostrado tener una fluencia elevada. Para evitar este efecto se cambió por unos cables de acero. Dado que la opción de cables era más costosa en tiempo y dinero, se optó por usar varios tramos de barra de acero conectados por manguitos en el segundo prototipo (figura 5.41). Esto por un lado le añade más peso al elemento de tracción, pero por otro no requiere la pieza de conexión de acero anterior, con lo cual se equilibra bastante.

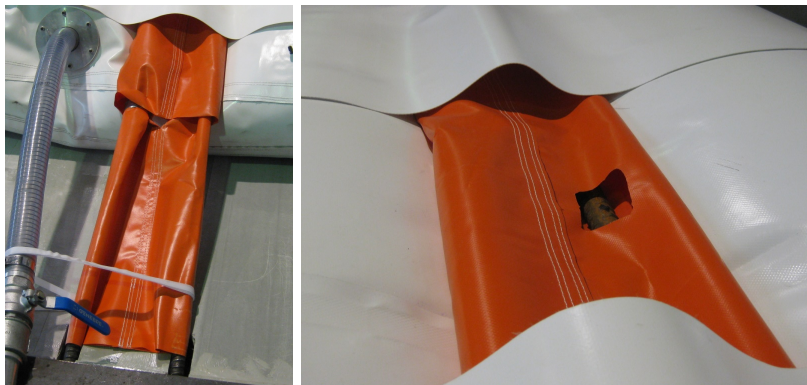


Figura 5.41: Elemento de tracción formado por barras de acero

### 5.7.2. Modificación de la longitud del tubo

La longitud del tubo en la primera viga estaba limitada por la longitud de la eslinga, que requería de unas piezas de acero en sus extremos que no podían tocarlo. Esto no permitía sostener cargas elevadas cerca de los extremos de la viga. Al cambiar la eslinga y quitar estas piezas, se ha podido alargar el tubo y resolver este problema (figura 5.42).



Figura 5.42: Aumento de la longitud del tubo hinchable

### 5.7.3. Mejoras en los perfiles en U de los paneles FRP de la viga

La unión entre paneles se realiza mediante el paso de unas barras de acero longitudinalmente a modo de pretensado inicial. Para absorber el esfuerzo cortante en estas juntas se diseñaron en la primera viga una especie de anillos de acero cuyo diámetro interior era algo mayor que el de las barras, y el diámetro exterior algo menor que el de las perforaciones realizadas en los perfiles en U. Para reducir la dificultad de inserción de estos elementos en el montaje de la primera viga y su corta longitud e incrementar la poca superficie de transferencia de cortante, se han encolado unos discos de FRP en los perfiles en U (figura 5.43). A su vez se han alargado los anillos de acero, así como se han diseñado unas terminaciones cónicas que faciliten el montaje en la segunda viga (figura 5.44). Además, se ha procedido a rediseñar los anillos de la primera viga añadiendo los finales cónicos para los siguientes montajes. El resultado obtenido ha sido satisfactorio.

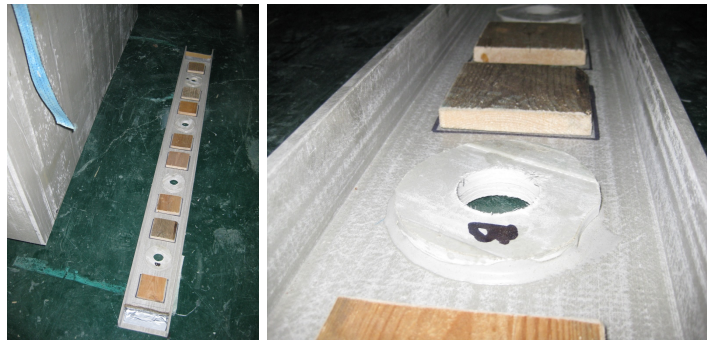
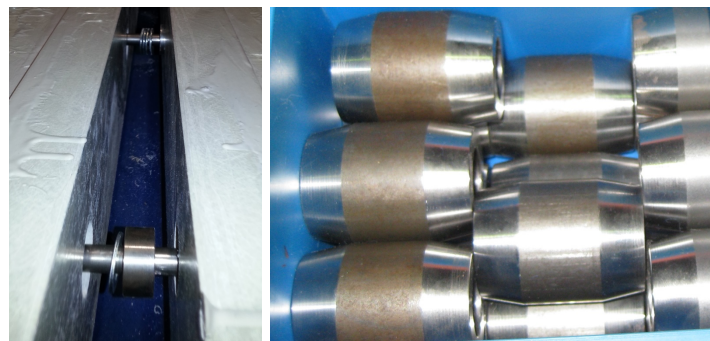


Figura 5.43: Discos de FRP encolados sobre los perfiles en U



(a) Viga 1

(b) Viga 2

Figura 5.44: Anillos para la transmisión de esfuerzos cortantes

#### 5.7.4. Fabricación de un prototipo de viga mejorado

La fabricación de la segunda viga se ha realizado de idéntica forma a la primera, exceptuando los cambios especificados anteriormente. En cuanto al montaje se ha mejorado sustancialmente respecto a la primera, reduciendo drásticamente el tiempo y esfuerzo requerido.

Con esta segunda viga, aprovechando también el prototipo de la primera, ya estaría fabricado el primer prototipo de PVH-LMP (figura 5.45). La unión entre vigas se realiza mediante unas piezas angulares de acero colocadas con tornillos en los salientes de los perfiles en U. El hinchado de las vigas se realiza con un único motor, que lleva un sistema de control de presión que da la orden de hinchar/parar cuando la presión está fuera de los límites preestablecidos.



Figura 5.45: Prototipo final del puente con las dos vigas juntas

## 5.8. Ensayo del prototipo de viga mejorado

Una vez incorporadas las mejoras a la segunda viga, sobre todo por lo que respecta al elemento de tracción (ahora de acero), se ensaya con una sobrecarga repartida sobre el tablero de hasta 10 tn (10 sacos de arena de 1 tn cada uno), con una presión de hinchado del tubo de 175 mbar (figura 5.46). A continuación, en las figuras 5.47 y 5.48 se presentan los resultados obtenidos tras la medición de flechas en cada una de las secciones existentes entre paneles, tanto en el tablero como en la eslinga, para incrementos de carga de 1 tn.



Figura 5.46: Prueba de carga de la viga 2 con 10 tn

La longitud inicial del elemento de tracción entre apoyos se ha fijado en 14,44 m (prácticamente idéntica a los 14,48 m en la viga 1). La diferencia está en que al hinchar el tubo, las barras de acero prácticamente no se alargan, con lo cual si se hincha con una presión de 240 mbar, el tablero adquiere una contraflecha excesiva (con peligro de rotura). Para evitar este efecto se trabaja con una presión de 175 mbar esta vez, más que suficiente.

En los gráficos presentados se toma como referencia de medida el estado



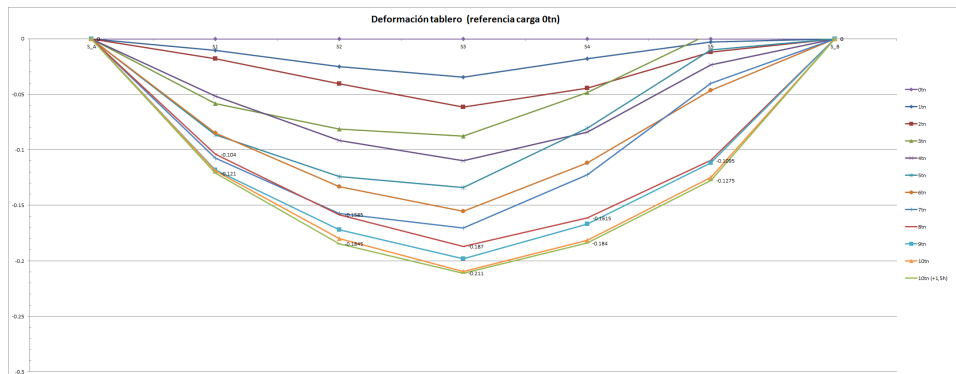


Figura 5.47: Flechas en varias secciones del tablero de la viga 2 en función de la carga (hasta 10 tn) [en metros]

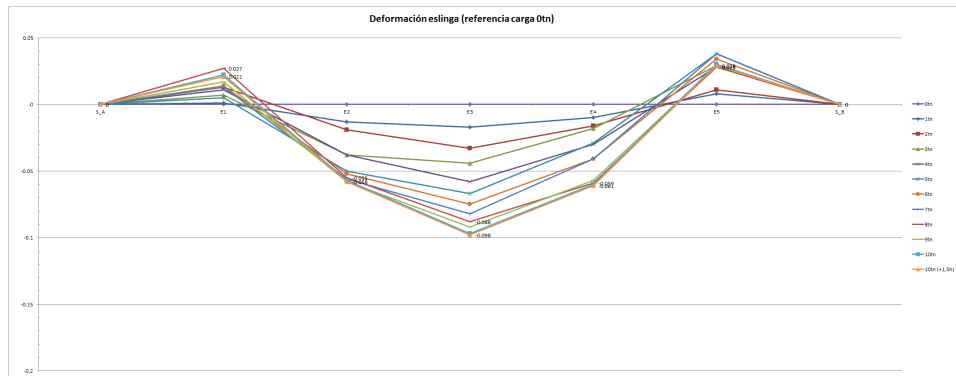


Figura 5.48: Flechas en varias secciones de la eslinga de la viga 2 en función de la carga (hasta 10 tn) [en metros]

inicial sin carga (obviando en la representación la contraflecha inicial del tablero de la viga debido al hinchado, que en este caso es de 22,5 cm en el centro, frente a los 10 cm en la viga 1).

Como se puede observar en los gráficos obtenidos, la máxima flecha en el centro del tablero con 10 tn de peso es de 21,0 cm, mientras que en la eslinga es de 9,7 cm. Después de 1 hora con la carga en posición, prácticamente ni se aprecia descenso en el centro del tablero (sólo 0,1 cm) ni en la eslinga (sólo 0,1cm), llegando a la conclusión que el problema de fluencia detectado en la primera viga ha sido solucionado. Para poder comparar los dos ensayos, en la tabla 5.1 se presenta un resumen, incluyendo las medidas de deformación para la viga 2 con una carga de 8 tn.

A partir de estos datos se puede concluir que las mejoras han sido sig-

Zona medida	Flecha máxima [en cm]		
	Carga	VIGA 1	VIGA 2
Tablero	8 tn	26,9	18,7
Eslinga		15,7	8,8
Tablero	10 tn	-	21,0
Eslinga		-	9,7

Tabla 5.1: Comparación de deformaciones en ambas vigas

nificativas, produciendo menores deformaciones aún con mayores cargas. El puente está teóricamente diseñado para soportar cargas de hasta 30 tn (15 tn por viga), que podrían alcanzarse sin problemas, dado el comportamiento de la viga en este segundo ensayo. En la fase de cálculo inicial, las simulaciones numéricas estimaban unas deflexiones del tablero de 32,7 mm (con 15 tn en la viga, distribuidas según la normativa militar para el vehículo MLC 30). Si suponemos un comportamiento más o menos lineal en este último ensayo, con 15 tn (eso sí, con carga repartida) llegaríamos a una deflexión teórica de 31,5 cm, muy similar a la obtenida mediante la aplicación de software. Obviamente la distribución de la carga no es la misma, pero parece dar un orden de magnitud bastante representativo. En futuros ensayos se analizará más en detalle éste y otros factores.

En la figura 5.49 se puede observar la penetración de la eslinga en el tubo hinchable al estar sometido a la carga de 10 tn, factor clave en el funcionamiento físico de la viga Tensairity. El tejido naranja es un recubrimiento que se ha preparado para las barras de acero, para evitar dañar el tubo hinchable al estar en contacto con éste.

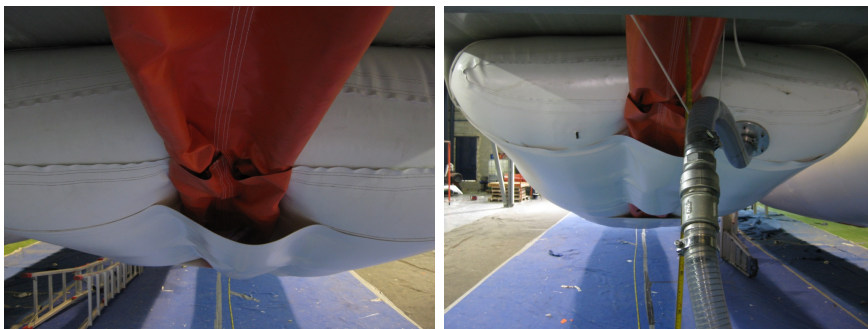


Figura 5.49: Penetración de la eslinga en el tubo y contacto tubo-tablero de la viga 2 con 10 tn de carga

### 5.8.1. Simulación numérica del prototipo de viga mejorado

Como validación adicional, se ha simulado el ensayo de la viga mejorada mediante el software RamSeries de la empresa Compass - Ingeniería y Sistemas, en Barcelona, íntimamente ligada con CIMNE.

RamSeries es un completo entorno de elementos finitos (FEM) para el análisis estructural. RamSeries proporciona la capacidad de analizar todos los aspectos estructurales de un producto, gracias a su completa gama de capacidades, que incluye análisis estático lineal, modal/vibraciones, dinámica lineal y no lineal, impacto, análisis acoplado fluido-estructura, estudios termomecánicos, verificación a fatiga y mucho más. RamSeries es la solución de simulación que permite resolver los problemas estructurales más complejos con facilidad.

RamSeries ofrece un completo rango de elementos 3D incluyendo vigas, cables, láminas, membranas y sólidos, y soporta una amplia gama de análisis no lineales, con diversas leyes de materiales y modelos de grandes desplazamientos. Además, RamSeries ofrece la más avanzada tecnología para resolver análisis dinámicos, incluyendo robustos algoritmos de contacto-impacto, necesarios para llevar a cabo simulaciones de muchos diseños complejos en ingeniería.

RamSeries es parte del entorno de simulación Tdyn; el más completo conjunto de herramientas de análisis, que permite dar solución a prácticamente cualquier necesidad de simulación multifísica en ingeniería. Esta solución está completamente integrada en un entorno gráfico (GUI) especializado que permite la más sencilla gestión de la geometría y datos gracias a una versátil interfaz tipo árbol. Asimismo cuenta con herramientas de generación de malla completamente automáticas y un completo conjunto de utilidades para la visualización y análisis de los resultados del cálculo.

Los resultados obtenidos mediante la simulación muestran grandes similitudes con la realidad, obteniéndose deformaciones muy parecidas en ambos casos, sobretodo en el tablero. En la figura 5.50 se muestra el modelo de viga utilizado con las zonas donde se cargan los 10 pallets de 1 tonelada, mientras que la figura 5.51 muestra los valores de deformación vertical. Para el tablero la deformación es de 20,1 cm (comparado con los 21,0 cm obtenidos en el ensayo real), mientras que la eslinga de acero tiene un descenso de 7,2 cm (frente a los 9,7 en la realidad). Aparece una pequeña subestimación en la simulación que puede ser debida a que las uniones entre paneles se han considerado rígidas, cosa que no es cierta en la realidad.

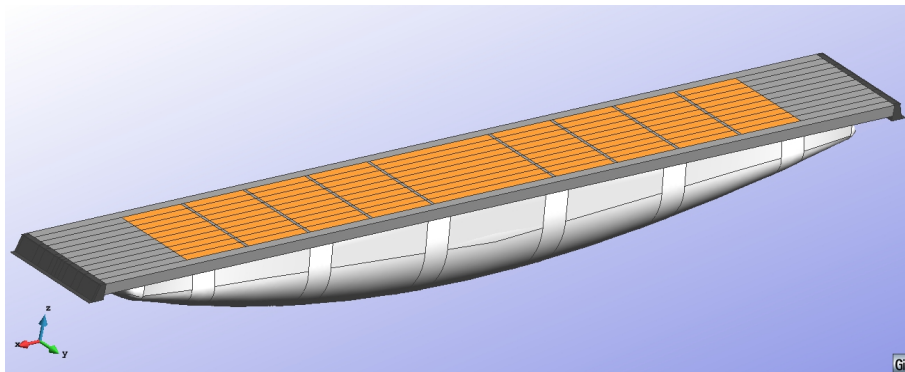


Figura 5.50: Modelo para la simulación numérica de la viga con 10 tn de carga

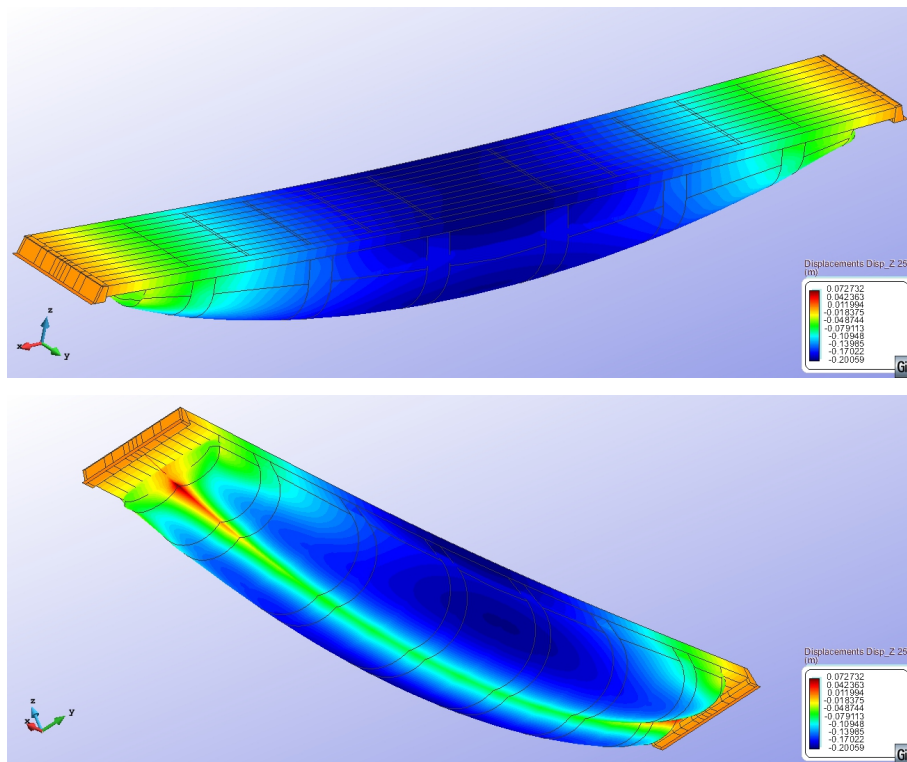


Figura 5.51: Deformación vertical de la viga con 10 tn de carga

## 5.9. Operatividad del PVH-LMP

### 5.9.1. Transporte

Dado que el puente debe ser fácilmente desmontable y transportable, éste está compuesto por piezas que caben dentro de pallets estándar de 88"x 54" para transporte de mercancías en aviones ( $2,235 \times 1,372 \times 1,70 \text{ m}^3$ ), según se muestra en la figura 4.5. En los prototipos realizados existen elementos de mayores dimensiones debido a problemas en el suministro de materiales estándar, pero el producto final se ceñirá a esos requerimientos.

A continuación se muestran algunas imágenes de una viga del puente montada boca abajo, y a su lado la otra desmontada pieza por pieza (figura 5.52).



Figura 5.52: Vista general y detalle de una viga montada y otra desmontada

El tubo de una viga plegado (figura 5.53) ocupa aproximadamente unos  $0,7 \text{ m}^3$  ( $1,10 \text{ m} \times 0,90 \text{ m} \times 0,70 \text{ m}$ ), cuando su volumen hinchado es de  $19 \text{ m}^3$ . Los paneles definitivos medirán  $2,00 \text{ m} \times 1,80 \text{ m}$  (figura 5.54).

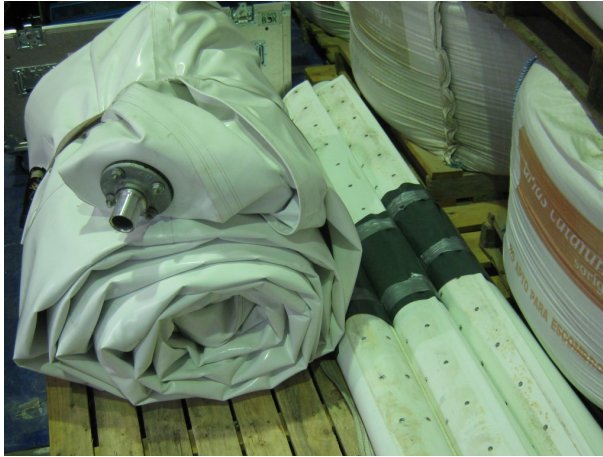


Figura 5.53: Tubo hinchable plegado y bandas de amarre

Figura 5.54: Paneles de FRP desmontados

La eslinga y toda la tornillería, manguitos, arandelas de cortante, placas metálicas, herramientas, etc. caben en una caja de  $1,00 \text{ m} \times 0,50 \text{ m} \times 0,50 \text{ m}$  (figura 5.55). Los apoyos de acero y las placas de anclaje miden como máximo  $2,00 \text{ m}$  de longitud y caben encima de un pallet estándar (figura 5.56).



Figura 5.55: Eslinga y accesorios de montaje

Figura 5.56: Apoyos metálicos y placas de anclaje

Por último, el motor de hinchado pesa  $40 \text{ kg}$  y cabe sobradamente dentro

de un pallet de 1,00 m x 1,00 m. Las mangueras de conducción de aire se pueden doblar y almacenar en muy poco espacio (figura 5.57).



Figura 5.57: Motor de hinchado y manguera

### 5.9.2. Montaje

A diferencia de otras alternativas de puentes de despliegue rápido, el montaje puede realizarse de forma sencilla en unas 8 horas con un equipo de 8 personas. El proceso se realiza en posición invertida en el suelo, es idéntico para las dos vigas y se puede realizar en paralelo (salvo la maniobra de giro y posicionamiento). A continuación se detalla la forma de montaje de una viga (algunas tareas, no obstante, pueden realizarse en distinto orden al aquí indicado):

#### 1. Montaje del tablero

Se alinean los paneles y se pasan las barras de acero longitudinales (figura 5.58), introduciendo en cada unión entre paneles las arandelas de transmisión de cortante (figura 5.59). Las barras longitudinales se unen mediante manguitos en los orificios destinados a tal fin en el tablero. Finalmente se añaden los apoyos metálicos en los extremos y se aprietan las barras mediante tuercas, a modo de pretensado (figura 5.60).

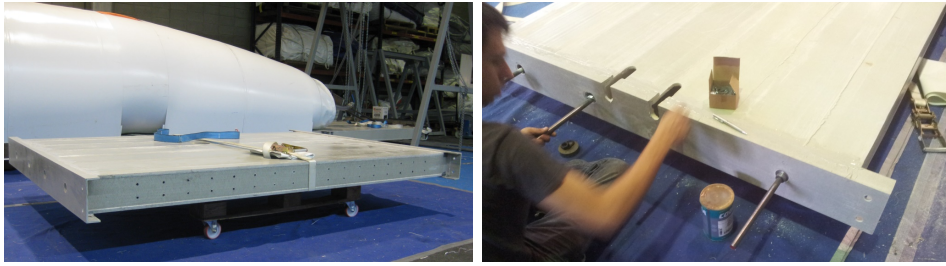


Figura 5.58: Alineamiento de paneles e inserción de barras de acero longitudinales

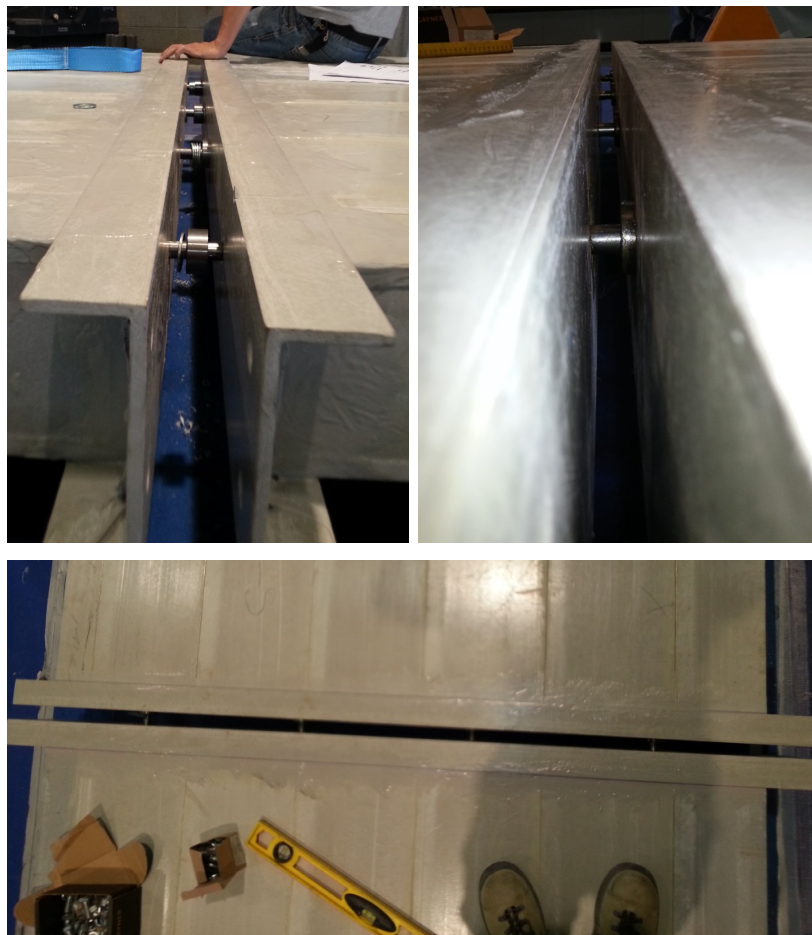


Figura 5.59: Colocación de las arandelas para transmisión de esfuerzo cortante





Figura 5.60: Colocación de apoyos metálicos y apriete de barras

## 2. Posicionamiento del tubo y sus bandas de amarre

Sobre el tablero se despliega el tubo y se centra. Posteriormente se fijan las bandas de amarre del tubo a los laterales del tablero mediante placas de acero atornilladas. También se atornillan las uniones entre paneles (figura 5.61).



Figura 5.61: Posicionamiento del tubo y sus bandas de amarre

### 3. Colocación de la eslinga

Con las bandas de amarre fijadas en un lateral del tablero, se coloca la eslinga a través de los pasadores diseñados para tal fin (figura 5.62). Posteriormente se pasan por encima del tubo y se fijan las bandas al otro lateral. Una vez fijadas y el tubo semi-hinchado se ancla la eslinga a los extremos de la viga (figura 5.63).

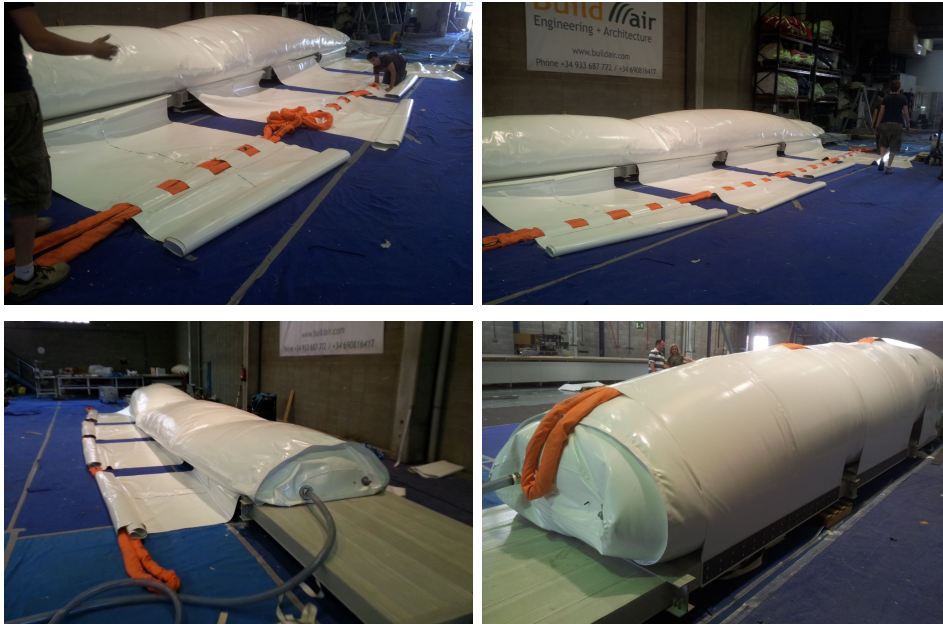


Figura 5.62: Colocación de la eslinga a través de los pasadores



Figura 5.63: Fijación de la eslinga a los extremos de la viga

### 4. Maniobra de giro de la viga

Una vez montada la viga boca abajo se procede a la maniobra de giro. Para ello se han diseñado dos pórticos con polipastos que se anclan

a los laterales de los apoyos de acero de la viga, permitiendo el giro y levantamiento de ésta. Una vez girado, la viga se posiciona sobre unos caballetes diseñados para las pruebas. En las siguientes imágenes (figuras 5.64 y 5.65) se puede observar todo el proceso, ordenado de izquierda a derecha y de arriba a abajo.



Figura 5.64: Maniobra de giro y posicionamiento de la viga



Figura 5.65: Puente completo formado por 2 vigas unidas

### 5. Posicionamiento en emplazamiento final

Todavía no se han llegado a realizar pruebas en exterior, simulando un caso real. No obstante, se han estudiado diferentes posibilidades. Finalmente se considera que la solución idónea es la de construir las dos vigas por separado en el suelo en una zona próxima al emplazamiento del apoyo inicial, y colocarlas en posición final de forma independiente.

En una fase posterior, con las vigas ya situadas en su emplazamiento definitivo, se procede a su unión.

Otro aspecto a considerar son los medios con los cuales efectuar las operaciones de montaje y colocación en obra del puente. Se proponen los siguientes medios:

- a) Medios manuales: piezas que pueden llegar a pesar unos 200 kg o más. Dificultad de movimiento y posicionamiento.
- b) Medios auxiliares ligeros y/o desmontables: tráctel, trípode con las propias vigas, etc.
- c) Medios auxiliares medianos: plumas en camión, etc.
- d) Medios auxiliares pesados: plumas.

Tras haber considerado las posibles alternativas y debido a la dificultad objetiva de colocar en obra un elemento de al menos 14 m de longitud, se han desechado las opciones de emplear medios manuales. Por otra parte, el peso y las dimensiones de la estructura, aunque en la hipótesis de montaje de vigas independientes, obligan a optar por medios suficientemente potentes que garanticen una puesta en obra rápida y segura. En este sentido una pluma sobre un camión se considera como el medio más eficaz para efectuar todas las operaciones asociadas al montaje y desmontaje del puente.

En una primera aproximación se considera que las reacciones en los extremos de cada viga se transmiten al terreno mediante "tornillos" metálicos de grandes dimensiones hincados mecánicamente al terreno de apoyo de la estructura (figura 5.66). Se trata, obviamente, de una simple propuesta que deberá confirmarse en una fase posterior del trabajo en función de otros parámetros actualmente indefinidos (longitud del "tornillo", capacidad de cargas del terreno, distancia de los apoyos a las laderas del obstáculo, etc).

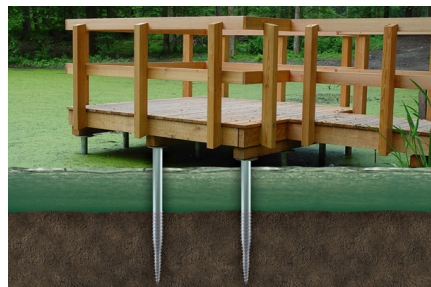


Figura 5.66: Ejemplo de fijación mediante "tornillos" metálicos de grandes dimensiones

## 5.10. Actividades de difusión y demostración

En las primeras etapas del proyecto de PVH-LMP, éste se empezó a mencionar en temas relacionados con el I+D. Como ejemplo, se escribió un pequeño artículo en la revista "informacions" de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) en abril de 2012, el cual se adjunta en el apéndice E. De forma similar, se grabó un breve reportaje para la televisión catalana (TV3) donde se hablaba de proyectos de investigación y empresas spin-off relacionadas con la universidad (<http://www.324.cat/video/4507791/altres/Les-empreses-creades-per-les-universitats-per-financar-se>). En la figura 5.67 se puede ver una fotografía de la grabación.



Figura 5.67: Fotografía de la grabación del reportaje de TV3

Más adelante, la idea de PVH-LMP se presentó en la Academia Militar de Estados Unidos en West Point mediante pequeños prototipos a escala (figura 5.68), así como en el Regimiento de Pontoneros y Especialidades de Ingenieros no. 12 en Zaragoza, del Ejército Español. Ambos son organismos especializados en la construcción y despliegue de puentes para uso militar y en emergencias. La idea les pareció muy interesante.

En una primera fase de construcción, el prototipo de viga estuvo montado en fábrica durante 1-2 semanas. Posteriormente lo estuvo el puente completo durante otras 2 semanas más. En este tiempo se realizaron contactos con posibles inversores interesados en el producto, así como personal académico interesado en este nuevo concepto de puente (figura 5.69) y otras personas del sector, los cuales visitaron los prototipos, quedando realmente impresionados.



Figura 5.68: Fotografía del encuentro en la academia militar de West Point (EEUU)



Figura 5.69: Fotografía de la visita del profesor Bernd Kröplin (Tao GmbH, Stuttgart, Alemania)

Asimismo, el prototipo de puente se presentó también en el primer evento del CERCA el 30/4/2014, en el Born (Barcelona), dentro del marco del proyecto Air-Bridge [1]. Para este evento se preparó un pequeño folleto técnico informativo sobre el proyecto (apéndice D). A dicho evento acudieron varias autoridades, empresas e investigadores interesados. En la figura 5.70 se muestran varias fotografías del evento.



Figura 5.70: Presentación del prototipo de puente completo en el evento del CERCA (30/4/2014)

Después del montaje para este evento hubo una gran repercusión mediática, además de realizar varias entrevistas para algunos medios (prensa, radio y televisión):

- *28/5/2014*: Entrevista en directo en Radio Nacional (Radio 4), en el programa "Matí a 4 bandes" de Toni Marin, en una sección de Francis Casado sobre proyectos tecnológicos de interés.  
[http://www.ivoox.com/mati-a-4-bandes-avui-amb-el-audios-mp3\\_rf\\_3166996\\_1.html](http://www.ivoox.com/mati-a-4-bandes-avui-amb-el-audios-mp3_rf_3166996_1.html)
- *8/6/2014*: Publicación de una entrevista para el diario La Vanguardia en la versión escrita (adjunta en el apéndice E).
- *12/6/2014*: Se volvió a montar el prototipo de una viga del puente para el programa "Divendres" de TV3, presentado por Xavi Coral, en una sección de Pau Garcia-Milà denominada "Negocis d'èxit a Catalunya".  
<http://www.tv3.cat/videos/5131241/Negocis-dexit-a-Catalunya-120614>

En el apéndice E se adjunta documentación sobre publicaciones en los medios relacionadas con el PVH-LMP, así como algunos de los múltiples datos sobre su repercusión después del evento del CERCA.

En cuanto al ámbito académico, se han realizado algunas presentaciones de la idea en congresos:

- *9-11/10/2013*: Structural Membranes 2013. VI International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures (Munich, Alemania) (figura 5.71).
- *20-25/7/2014*: IACM & ECCOMAS. 11th World Congress on Computational Mechanics (WCCM XI) + 5th European Conference on Computational Mechanics (ECCM V) + 6th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD VI).





Figura 5.71: Fotografía de los asistentes al congreso Structural Membranes 2013 (Munich, Alemania)

## Capítulo 6

# Perspectivas Industriales del PVH-LMP

### 6.1. Estudio de mercado

#### 6.1.1. Estimación del volumen de la demanda

Aunque no hay mucha información sectorial específica para este tipo de puentes, si tan solo consideramos la información disponible de algunas naciones con bajos recursos como Nueva Guinea que dedicó 5,4 millones de euros en 2007 como presupuesto para puentes de emergencia [41]; los 690.000\$ que Haití habría de dedicar a puentes de emergencia para la reparación de una sola carretera en 2010; los más de 100 millones de dólares por nación que el BID ha otorgado a diversas naciones americanas para la reconstrucción de infraestructuras en caso de desastres naturales (ejemplo: República Dominicana); las más de 15 misiones de gran magnitud y entre 500 y 700 de menor magnitud, que se realizan por año a nivel mundial para ayuda humanitaria por terremotos e inundaciones y la creciente urbanización mundial, podemos inferir que el Mercado mundial para este tipo de soluciones es muy superior a los 100 millones de Euros anuales (menos del 0,2% de los costes anuales que generan los desastres naturales crecen sin posibilidad de cubrir la cantidad de demanda cada año) [42, 43].

De acuerdo con las perspectivas de mercado e información de los competidores, podemos estimar un mercado para la venta del Puente de Vigas Hinchables Ligero, Modular y Portátil (PVH-LMP) que se cuantifica en la tabla de la figura 6.1.

Considerando la venta del primer puente el 2016, un ratio de penetración

	Número de unidades/año					
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Europa	300	309	318	328	338	348
América del Norte	400	412	424	437	450	464
América del Sur	200	206	212	219	225	232
Asia-Pacífico	400	412	424	437	450	464
Otros	250	258	265	273	281	290
<b>Tamaño total de mercado (uds/año)</b>	<b>1550</b>	<b>1597</b>	<b>1644</b>	<b>1694</b>	<b>1745</b>	<b>1797</b>

Figura 6.1: Estimación del tamaño total del mercado de puentes tácticos

inicial en el Mercado del 0,5% a partir de 2017 y un crecimiento anual conservador, se refleja una estimación de las ventas en la figura 6.2 a lo largo de los próximos años.

	Número de unidades/año					
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
<b>Cuota de mercado/año</b>	<b>-</b>	<b>0.5%</b>	<b>1%</b>	<b>2%</b>	<b>3%</b>	<b>5%</b>
Europa	0	1	3	6	10	17
América del Norte	1	2	4	8	13	23
América del Sur	0	1	2	4	6	11
Asia-Pacífico	0	2	4	8	13	23
Otros	0	1	2	5	8	14
<b>Volumen de ventas (uds/año)</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>15</b>	<b>31</b>	<b>50</b>	<b>88</b>

Figura 6.2: Estimación del volumen de ventas de los PVH-LMP

### 6.1.2. Análisis de competencia

Es un mercado bastante segmentado por el momento. Aunque no hay muchos competidores de gran peso en el panorama mundial, existen redes de distribuidores de armamento y otros fines que cuentan con algunos puentes tácticos que podrían competir. En el caso de los gobiernos, cada gobierno se aprovisiona normalmente a través de mecanismos públicos o acuerdos internacionales y mediante sus respectivos canales corporativos.

#### Principales competidores:

Waagner - <http://www.waagner-biro.at/>

Origen: Austria

Industria: Estructural, puentes e Ingeniería

Productos: Diversos de ingeniería, no tiene especialización en despliegue rápido

Mabey - <http://www.mabey.com/>

Origen: UK y USA

Industria: Puentes Bailey e Ingeniería

Productos: Puentes Bailey (venta y alquiler)

Wfel - <http://www.wfel.com/>

+++El competidor más fuerte en puentes tácticos+++

Origen: UK

Industria: Ingeniería táctica y militar.

Productos: Puentes tácticos y de despliegue rápido

Lonestar Bridges - <http://www.lonestarbridges.com/>

Origen: USA

Industria: Estructural, puentes e Ingeniería

Productos: Puentes de cercha y plataforma (peatonales)

Acrow- <http://www.acrowusa.com/index.php?page=military-bridges>

Origen: USA

Industria: Estructural, puentes e Ingeniería + Puentes tácticos

Productos: Versión modificada del Bailey y distintos tipos de puentes desplegables y tácticos

Pioneer Bridges - <http://www.baileybridge.com/>

Origen: USA

Industria: Estructural, puentes e Ingeniería

Productos: Puentes Bailey

Beaver Bridges - <http://www.beaverbridges.co.uk>

Origen: UK

Industria: Estructural, puentes e Ingeniería

Productos: Bailey y diversos de ingeniería se especializa en uso civil no despliegue rápido.

Unibridge - <http://www.unibridge.fr>

Origen: Francia

Industria: Estructural, puentes e Ingeniería + Puentes tácticos

Productos: Todo tipo de puentes permanentes, temporales y de emergencia.

Una de las principales ventajas de observar a la competencia es ver que pese a las pocas alternativas que existen en este mercado, todas las compañías mencionadas se encuentran en una fase de expansión de sus productos y con ventas en continuo crecimiento según un estudio de investigación directa realizada por Buildair.

El competidor más importante en lo que se refiere a usos tácticos y de emergencia es WFEL quienes aseguran tener unas ventas seguras de unos 100 puentes de tan solo un modelo en esta década.

### **6.1.3. Interés de potenciales compradores**

Buildair ha hecho presentación de su tecnología en el FCT programa del ejército americano. Este programa estadounidense tiene como finalidad comprar tecnología extranjera para usar en la operación del propio ejército. Se ha establecido además contacto con la división de puentes asesorados por el Coronel Boixareu (Coronel de Intendencia del E.T. Agregado Financiero y de Armamento) de la embajada de España en Washington. El ejército norteamericano y en especial la división de puentes han mostrado un gran interés y están a la expectativa de que se culminen estos desarrollos. Con el ejército norteamericano se ha tenido contacto con Robert A. Thompson (Office Of The Secretary Of Defense - comparative testing Office).

### **6.1.4. Canales de distribución**

Buildair tiene una gran fortaleza en la venta directa, sin embargo tanto para el sector militar y de emergencias como para el sector civil, será necesario establecer acuerdos de comercialización con grandes empresas de aprovisionamiento militar y consorcios industriales y logísticos de gran tamaño. Un ejemplo es Airbus/EADS (España), a quien se ha incluido en una investigación previa y se muestra muy interesado por estos desarrollos, aportando ideas de distribución a través de ellos y/o conjuntamente con organismos internacionales para lograr un mayor alcance internacional.

Por otra parte se va a establecer una red de distribución internacional en Europa, Asia y América a través de las distintas oficinas que Buildair tiene en estos países, según una comisión en función de varios aspectos, como puede ser el volumen de facturación anual, que inicialmente se estima en un 15%. De la misma forma, mediante los contactos existentes en toda la red mundial de centros CIMNE, se explorarán las posibilidades de expansión para este tipo de producto.

Igualmente, se va a dar a conocer el producto en ferias del sector en cada continente, junto con los distribuidores respectivos en cada caso.

## 6.2. Análisis coste-beneficio

Los costes de un PVH-LMP se pueden desglosar en los siguientes apartados:

### (a) Costes de material

Se pueden desglosar en los 5 elementos básicos que forman el puente:

1. *Tubo hinchable*: Tejidos para la cámara y la funda, válvulas, adhesivos de unión, hilo para costura, logos, motorización. . .
2. *Elemento de compresión*: material para paneles FRP, corte/perforación de perfiles FRP, adhesivo unión paneles, piezas/accesorios para la fabricación y posterior montaje de los paneles. Estos elementos de FRP los suministra un proveedor especializado.
3. *Elemento de tracción*: eslinga textil, cables/barras de acero. . . Estos elementos los suministra un proveedor especializado.
4. *Apoyos*: apoyos de acero en los extremos de las vigas, suministrados por un taller especializado, según planos de diseño.
5. *Accesorios de montaje*: caballetes de apoyo de la viga u otros sistemas necesarios para transmitir las reacciones al terreno, pórticos de giro e izado, polipastos. . . Un proveedor especializado se dedicará al suministro de los apoyos en función de los requerimientos de cada emplazamiento. Un taller de confianza suministrará los demás accesorios diseñados a medida.

### (b) Costes de producción

Trabajos necesarios en la fabricación del puente, tales como las labores de soldadura del tubo mediante máquina específica de soldadura por alta frecuencia, costura de partes del tubo, inserción de accesorios tales como válvulas, sensores, mangueras para la conducción de aire, etc. Por otra parte está la fabricación de los paneles mediante la unión de varias piezas de FRP con los adhesivos apropiados.

### (c) Ventas, distribución y marketing

Costes en la venta a través de los canales de distribución indicados anteriormente.

### (d) Royalties en tecnología

Se establecerá un acuerdo con la empresa propietaria de las patentes para el uso y explotación de la tecnología Tensairity.

### (e) I+D

Trabajos posteriores dedicados a la mejora del producto.

Considerando los costes de fabricación del PVH-LMP de 14 metros actualmente construido, junto con los demás valores estimados, en la figura 6.3 se presentan las cifras de costes y beneficios, junto con el precio de venta.

<b>COSTES</b>	Costes de material	23%	45,000 €
	Costes de producción	8%	15,000 €
	Ventas, distribución y marketing	15%	30,000 €
	Royalties en tecnología	10%	20,000 €
	I+D	5%	10,000 €
Margen de empresa		40%	80,000 €
<b>PRECIO DE VENTA</b>			<b>200,000 €</b>

Figura 6.3: Desglose de costes y precio de venta

A partir del precio de venta orientativo, junto con la estimación del volumen de ventas obtenido con anterioridad en el apartado 6.1.1 y el desglose de costes, en la tabla de la figura 6.4 se presenta una estimación de los ingresos en la venta de los puentes.

	Euros					
	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Volumen de ventas (uds/año)	1	7	15	31	50	88
Ingresos ventas	200,000 €	1,400,000 €	3,000,000 €	6,200,000 €	10,000,000 €	17,600,000 €
Total coste directo e indirecto	90,000 €	630,000 €	1,350,000 €	2,790,000 €	4,500,000 €	7,920,000 €
Royalties en tecnología	20,000 €	140,000 €	300,000 €	620,000 €	1,000,000 €	1,760,000 €
I+D	10,000 €	70,000 €	150,000 €	310,000 €	500,000 €	880,000 €
Margen de empresa	80,000 €	560,000 €	1,200,000 €	2,480,000 €	4,000,000 €	7,040,000 €

Figura 6.4: Estimación de ingresos en la venta

## 6.3. Viabilidad económica

### 6.3.1. Mercado potencial

De acuerdo con [44], debe pensarse en el PVH-LMP como un puente para una solución de emergencia, más que como puente temporal de apoyo durante situaciones de sustitución, demolición o reparación de puentes existentes. En estos casos, en los cuales se puede hacer una actuación más o menos programada en el tiempo, y por tanto no sea crítico el tiempo de puesta en servicio como sucede en una situación de emergencia, será más

efectiva económicamente una solución modular clásica de las existentes hoy en día en el mercado (puente Bailey o similar). En este sentido, la utilización del PVH-LMP también sería una solución adecuada como puente de despliegue militar.

Dentro de las soluciones existentes de despliegue rápido para el rango de luces y cargas máximas consideradas en el PVH-LMP y en las que la nueva solución planteada puede competir de manera clara, destacan las de Mabey, WFEL y Unibridge, que se exponen brevemente a continuación.

### Solución de Mabey

La solución Quick Bridge es un puente completo (no modular) con luces de 6 a 20 metros (figuras 6.5a y 6.5b). Se puede instalar en 1 hora con la ayuda de una grúa (figura 6.5c). Sería el máximo competidor de la solución PVH-LMP para luces hasta los 20 metros. No obstante, sería menos adecuado para casos de emergencia, ya que el traslado hasta el lugar de colocación es mucho más complicado por tener que transportarse casi completo, ocupando un volumen importante, y además requiere del uso de una grúa para su posicionamiento final. Sería más plausible su utilización como puente temporal. El peso de esta solución está en el entorno de 1 tn/m<sup>2</sup>, siendo una solución mucho más pesada que la solución PVH-LMP.

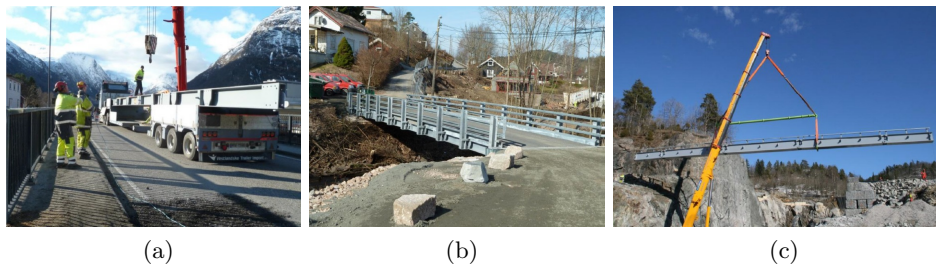


Figura 6.5: Alternativa de puente Quick Bridge (Mabey)

### Solución de WFEL

La empresa WFEL cuenta con varias soluciones de puentes de despliegue rápido para luces pequeñas y medianas, hasta los 50 metros en vano simplemente apoyado, especialmente diseñados para uso militar.

El puente Medium Girder Bridge, es una solución que para luces pequeñas tiene una tipología de viga en celosía (figura 6.6a) y que para conseguir



luces mayores se apoya en un atirantamiento inferior (figura 6.6b), desarrollando, por tanto, una idea análoga a la de PVH-LMP. Es una tipología pensada principalmente para su uso militar. No necesita de grúa auxiliar de montaje y se puede colocar lanzándolo desde un único extremo con la ayuda de un pico de lanzamiento. En la solución no atirantada se pueden salvar luces de hasta 40 metros para una carga máxima de un vehículo militar de 40 toneladas. El tiempo de montaje es de 1 hora con un equipo de 24 personas. La solución atirantada permite luces de hasta 50 metros para cargas de 60 toneladas, con un tiempo de montaje de 3 horas con un equipo de 32 personas. Los paneles están formados por una aleación especial de zinc, magnesio y aluminio que le dan más ligereza que los paneles del puente Bailey. Todos los componentes, excepto 3, pesan menos de 200 Kg y se pueden manejar mediante 4 personas. Los 3 restantes deben ser transportados por 6 personas. Se puede transportar por aire mediante pallets estándar o bien también parcialmente montado.

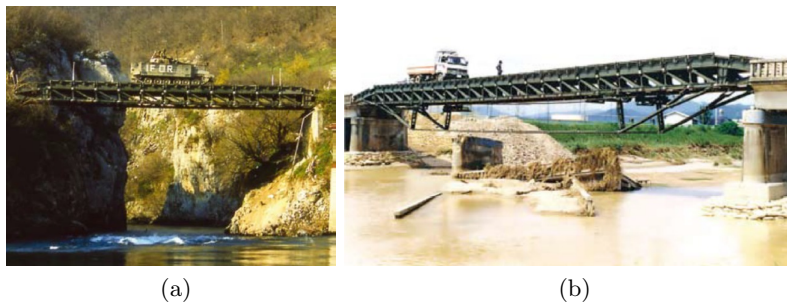


Figura 6.6: Alternativa de puente Medium Girder Bridge (WFEL)

La alternativa Dry Support Bridge permite construir desde un solo lado apoyándose en un vehículo especial que es el que lleva incorporada la viga auxiliar de lanzamiento del puente (figuras 6.7a y 6.7b). El tiempo de montaje es de alrededor de 90 minutos con un equipo de 8 personas y permite llegar a luces de hasta 46 metros para una carga total de 120 toneladas. Está fabricado con una aleación ligera de aluminio bajo patente de WFEL, lo que le confiere una gran ligereza. Se trata de un puente específicamente diseñado para su uso militar, aunque en algunos casos se ha empleado también con fines humanitarios como es el caso reciente de sustitución de un puente destruido por causas naturales en Suiza en el verano de 2015 (figura 6.8). El ejército suizo ha adquirido 16 puentes de este tipo y 24 vehículos lanzadores especiales entre los años 2011 a 2013 [45].

La alternativa Air Portable Ferry Bridge es una solución especialmente diseñada para ser transportada en helicóptero. La solución convencional cubre luces de hasta 14.5 metros para una carga de 35 toneladas (MLC 35),



Figura 6.7: Alternativa de puente Dry Support Bridge (WFEL)



Figura 6.8: Sustitución de un puente destruido por causas naturales en Suiza (verano 2015)

pudiéndose complementar con un atirantamiento inferior que permite llegar hasta luces de 30 metros para la misma carga total (figura 6.9), siendo el tiempo de construcción de 2 horas con un equipo de 24 personas.

### Solución de Unibridge

La empresa Unibridge ha desarrollado para vanos cortos y para zonas remotas de difícil acceso, el Ibridge, que es un puente adecuado para una longitud máxima de 30 m. Está basado en la tecnología Unibridge (figura 6.10a) y está compuesto de una serie de cajones que son ensamblados por medio de pernos pero se puede lanzar en una sola fase. Los componentes de un puente como el de la figura 6.10b se pueden ensamblar en 1 semana con una grúa con capacidad para 35 toneladas y un equipo de 10 personas.



Figura 6.9: Alternativa "Air Portable Ferry Bridge" de la empresa WFEL



Figura 6.10: Alternativa de puente Ibridge (Unibridge)

### Otras soluciones con materiales compuestos

En relación a las soluciones efectuadas íntegramente con materiales compuestos (fibra de vidrio, fibra de carbono), que podría ser una solución factible para situaciones de emergencia teniendo en cuenta su ligereza, hay que decir que ha habido algunos intentos de desarrollo. Por ejemplo, en [46] se describe el diseño y los ensayos llevados a cabo para la verificación de un puente en celosía de fibra de vidrio, para una luz de 20 m y que soportó una carga última equivalente a MLC42, fallando finalmente por un fallo en una unión y pandeo del cordón superior comprimido. Los principales inconvenientes de este tipo de soluciones son la baja rigidez del material y la resolución de las uniones entre los distintos elementos, además del elevado coste del material. El resultado final es que no se encuentran hoy en día en el mercado alternativas de este tipo que cubran el rango de prestaciones de la solución PVH-LMP, listas para su utilización, estando todavía en fase de investigación y estudio.

Dentro de las soluciones con materiales compuestos en [47], se describe el ARPA/UCSD Composite Assault Bridge (CAB), un desarrollo para el ejército norteamericano con una luz de 14 m, en el cual se evitan las uniones entre elementos. Otras soluciones en materiales compuestos para luces pequeñas, menores de 10 m, se pueden encontrar en [48, 49, 50]. Estas soluciones están principalmente pensadas para ser utilizadas en puentes lanzados desde vehículos, debido a la baja capacidad de carga y peso considerable de las soluciones actuales (figura 6.11), utilizando Seemann Composites Resin Infusion Molding Process (SCRIMP)–infusion carbon/epoxy como material para el tablero [51, 52]. Utilizando material compuesto, esta solución ofrece una reducción del 20 % en coste y del 25 % en peso comparado con una solución en aluminio [51, 52].



Figura 6.11: Solución de puente ARPA/UCSD Composite Assault Bridge

A continuación se recogen las principales ventajas e inconvenientes de la solución de PVH-LMP respecto a sus competidores industriales:

■ **Ventajas**

1. Rapidez de montaje
2. Situaciones de emergencia, sin previsión de solución provisional
3. Peso reducido: posibilidad de montaje con helicóptero, grúa de menor potencia
4. Volumen reducido cuando está desmontado

■ **Inconvenientes**

1. Rigidez de la solución: luces determinadas y fijas sin posibilidad de modulación
2. Necesidad de gálibo inferior

3. Método constructivo: necesidad de volteo y grúa auxiliar o helicóptero
4. Poca robustez (vandalismo)
5. Facilidad de sabotaje en despliegue militar

A la vista de la misma, parece lógico pensar que la solución PVH-LMP, más que competir con otras soluciones en un mercado que es bastante rígido y está plenamente servido mediante diferentes alternativas, se puede erigir como la única solución para puentes de luces pequeñas que precisen de mucha rapidez en el montaje. Por tanto, debería abordarse un estudio de mercado pensando en esta solución como la única factible en dichos casos, y por tanto sin competidor posible, más que plantear una potencial introducción en un mercado de puentes temporales que ya cuenta con otras soluciones que resuelven el problema. En este caso, donde ya existen soluciones técnicas viables y bien contrastadas con años de experiencia, la única posibilidad que tendría de introducirse fácilmente en el mercado sería a cambio de plantear un ahorro económico muy importante, que no parece ser el caso (ver apartado 6.3.2).

Un claro campo de aplicación para la solución PVH-LMP estaría ligado a la destrucción de infraestructuras motivada por catástrofes naturales por riada o inundación, o bien por sismo. Sin embargo, no existen muchas publicaciones que traten el problema logístico asociado a las operaciones post-desastre [53]. Es más, los estudios existentes se centran más en la preparación y predicción de los desastres naturales que no en la inmediata respuesta o reconstrucción después del evento [53]. Sin duda, la importancia que está adquiriendo recientemente el concepto de resiliencia de las infraestructuras hará que se invierta esta tendencia en un futuro próximo.

### 6.3.2. Comparación de costes con soluciones análogas

Comparando económicamente la solución de PVH-LMP frente a otras soluciones existentes en el mercado que responden a la necesidad de un despliegue rápido para un mismo rango de luces, tenemos que el coste de material sería:

- Mabey Quick Bridge = 1.000 €/m<sup>2</sup>
- Mabey Compact 2000 (tipo Bailey) = 1.300 €/m<sup>2</sup> (incluyendo todos los elementos auxiliares de montaje)
- WFEL Dry Support Bridge = 10.000 €/m<sup>2</sup> (puente solo), coste al que habría que añadir el de un vehículo especial de lanzamiento que estaría entorno a los 3.500.000 €<sup>[45]</sup>

- PVH-LMP = 1.260 €/m<sup>2</sup>

A la vista de lo anterior, podemos concluir que los costes de la nueva solución de PVH-LMP están dentro del rango de costes de otras soluciones que pueden resolver una misma situación de emergencia.

La solución Dry Support Bridge de WFEL podría considerarse que juega en otra división, teniendo en cuenta la luz máxima que cubre (49 m), el peso total admisible (120 tn) y el coste aproximado, el cual viene condicionado principalmente por la aleación ligera especial de la que están fabricados. Por ello, dicha solución no se consideraría como competencia del puente inflable.

Por tanto, en comparación con las soluciones Mabey y la solución Medium Girder Bridge de WFEL, que sí son una competencia clara, vemos que el coste económico de la solución PVH-LMP no parece ser una variable fundamental que pudiera decidir su utilización. En este sentido, sería difícil que una solución nueva como la del PVH-LMP, a igualdad de costos, pudiera introducirse fácilmente en un mercado ya bastante saturado con soluciones probadas a lo largo de muchos años. En consecuencia, el mercado potencial de la solución PVH-LMP hay que buscarlo en situaciones que sólo puedan ser resueltas con ella desde un punto de vista técnico y logístico.

## Capítulo 7

# Conclusiones

El objetivo básico de esta tesis era desarrollar la tecnología Tensairity para la fabricación de un prototipo de "Puente de Vigas Hinchables Ligero, Modular y Portátil"(PVH-LMP), de forma que pudiese llegar a ser el puente temporal más ligero, modular, transportable y fácil de montar disponible, con mucha mejor relación carga/peso en comparación con las alternativas de despliegue rápido existentes. Las alternativas actuales se encuentran con problemas en el transporte y posicionamiento debido a su elevado peso, así como en el montaje in-situ, el cual requiere de gran cantidad de personal y de alta cualificación.

La conclusión general es que gracias a la prueba inicial más conceptual realizada mediante la fabricación y ensayo del primer prototipo a escala real, se puede afirmar que un PVH-LMP con todas estas características es factible. Los principales requerimientos que van a cumplir y las ventajas diferenciales que podrán aportar este tipo de puentes temporales son las siguientes:

- El cálculo y diseño del puente se regirá por la normativa militar "Trilateral Design Test Code"[27], considerando el vehículo de diseño MLC 30.
- Luz del puente de 14 m y ancho mínimo libre para la circulación de 3,35 m.
- Tamaño máximo de las piezas del puente determinado por las dimensiones útiles de un contenedor estándar de Airbus de 88" x 54", que son 2,134 m x 1,270 m x 1,70 m.
- Puente auto-resistente a su propio peso en caso de una pérdida de presión de hinchado en los tubos o de su deshinchado total.

- Tecnología hinchable, completamente innovadora para puentes de emergencia. Resistente y capaz de soportar vehículos pesados
- Ultra-ligero. Utilización de materiales reforzados de última generación
- Sistema de ensamblaje mediante elementos simples, sin necesidad de especialización
- Sistema de posicionamiento que no requiere helicóptero o grúas pesadas
- Tiempo de montaje cuantificable en horas, no días ni meses
- Volumen de logística y transporte reducido. El mismo volumen permite hacer un stock de decenas de puentes en el espacio que actualmente ocupa una sola de las alternativas

Además de las conclusiones generales que se puedan extraer, también se han podido obtener algunas conclusiones parciales propias de cada una de las fases de investigación de este proyecto:

- Los ensayos realizados en los prototipos a escala reducida y a tamaño real han permitido la validación del software de simulación numérica, el cual se considera apropiado para poder calcular en el futuro este tipo de estructuras sin problemas
- El modelo de cálculo analítico extraído a partir de los artículos publicados sobre Tensairity [17] proporciona unos resultados bastante discutibles. Se obtienen presiones necesarias de hinchado muy elevadas (alrededor de 600 mbar) cuando la realidad y las simulaciones numéricas muestran que no es necesaria tanta presión (suficiente con presiones entre 100 y 200 mbar). La experiencia con estructuras hinchables demuestra que es muy difícil poder aproximar analíticamente su comportamiento debido principalmente a las grandes deformaciones que se producen.
- El diseño constructivo obtenido se adapta bien a los requerimientos modulares establecidos, salvo algunos paneles del tablero FRP que por temas puntuales de disponibilidad de material se tuvieron que hacer de mayores dimensiones (2,5 m en lugar de 2,0 m). Este hecho no sería un problema en el futuro, ya que se fabricarían con las dimensiones necesarias. Otro requisito que no se ha respetado es la capacidad del tablero de resistir su propio peso, ya que el trabajo realizado se ha concentrado en estudiar de forma pura el comportamiento de una viga del PVH-LMP. Para la propuesta final el tablero deberá rigidizarse de



forma que el puente pueda resistir su propio peso en caso de desinflado accidental.

- La fabricación del tubo hinchable ha sido muy satisfactoria en cuanto a estanqueidad se refiere, lo que es un punto clave en estructuras con una presión de hinchado del orden de centenares de milibares. Se ha conseguido mantener una presión de hinchado dentro de los límites aceptables durante varios días sin necesidad de aportaciones extra de presión. Además el sistema de control instalado es totalmente autónomo y se conecta automáticamente cuando la presión baja por debajo del umbral marcado.
- Las pruebas de montaje realizadas han sido satisfactorias aunque queda pendiente realizarlas en un emplazamiento real, sin las facilidades que ofrece una localización plana perfectamente asfaltada. El punto crítico del montaje ha sido el giro de la viga inicialmente montada boca abajo, hecho que viene derivado de que el tablero no tiene la rigidez necesaria para soportar su propio peso. En cualquier caso, se estima necesaria una pequeña grúa ligera o bien algún sistema simple de lanzamiento del puente. En cuanto al transporte se puede concluir que se realiza sin problemas gracias al poco peso y reducido tamaño de todos los elementos.
- Los ensayos realizados han evidenciado la importancia de la longitud del tubo hinchable, así como las características del material de la eslinga. También la necesidad de calibrar con precisión la longitud de la eslinga para no provocar una excesiva contraflecha en el tablero que podría llegar a romperlo.
- Un punto clave observado en los ensayos son las uniones entre paneles, que son bastante delicadas y en algún caso se ha fisurado el material de FRP. Se ha comprobado que pueden terminar trabajando como rótulas. No obstante, estas rótulas son necesarias para poder obtener grandes deformaciones en la viga flexible, ofreciéndole así su aporte modular.
- Por último, las perspectivas industriales de los PVH-LMP son optimistas. Por un lado se puede concluir que los costes de la nueva solución de PVH-LMP están dentro del rango de costes de otras soluciones que pueden resolver una misma situación de emergencia. No obstante, sería difícil que una solución nueva como la del PVH-LMP, a igualdad de costes, pudiera introducirse fácilmente en un mercado ya bastante saturado con soluciones probadas a lo largo de muchos años. En consecuencia, el mercado potencial de la solución PVH-LMP habría que buscarlo en situaciones donde se requiera mucha rapidez de montaje, sobretodo en casos de emergencia (no programados).

A raíz de las pruebas realizadas en el prototipo de PVH-LMP se ha podido concluir con éxito una primera etapa de prueba conceptual que a la vez ha permitido identificar algunas de sus carencias. Como trabajo futuro se deben revisar cada una de las deficiencias detectadas para alcanzar soluciones únicas, rentables y flexibles para la comercialización de este producto en un futuro próximo. Los aspectos en los que hay que trabajar están detallados en el capítulo 8 sobre desarrollos futuros, y están específicamente relacionados con un estudio más profundo de la estabilidad del puente frente a cargas dinámicas, el diseño de un sistema de barandillas, los elementos de apoyo sobre el terreno y la cimentación, una mejora del sistema de empaque, transporte y sobretodo despliegue en una situación real de emergencia, así como la escalabilidad de la solución para fabricar puentes de mayores luces. Por último habría que definir unas directrices claras para el diseño, fabricación en serie y operatividad del PVH-LMP en situaciones reales.

## 7.1. Aportaciones de la tesis

A modo de resumen, las aportaciones de la presente tesis se pueden clasificar en dos tipos: conceptual estructural e industrial.

### 7.1.1. Aportaciones de carácter conceptual estructural

Hacen referencia a una visión crítica sobre la parte más teórica de la tecnología Tensairity. Se ha podido comprobar que el modelo de cálculo analítico extraído de los artículos publicados sobre Tensairity [17] proporciona unos resultados bastante discutibles.

Aplicando esta metodología para el caso del PVH-LMP, donde la magnitud de las cargas y el tamaño de las vigas son importantes, se obtienen presiones necesarias de hinchado muy elevadas cuando la realidad demuestra que no es necesario.

La experiencia con estructuras hinchables demuestra que es muy difícil poder aproximar analíticamente su comportamiento debido principalmente a las grandes deformaciones que se producen. Los modelos teóricos publicados sobre Tensairity se exponen con bastantes simplificaciones, entre ellas ciertas limitaciones precisamente en las deformaciones, hecho que es difícilmente asumible con este tipo de estructuras.

Es por estos motivos que en la tesis se ha optado por la validación numérico-experimental, primero mediante prototipos a escala y posteriormente con dos vigas a escala real, obteniendo en todos los casos unas con-

cordancias totalmente adecuadas.

### 7.1.2. Aportaciones de carácter industrial

Están relacionadas principalmente con la posible introducción de un nuevo producto novedoso competitivo en el mercado de puentes portátiles, ya bastante saturado con soluciones probadas a lo largo de muchos años. En este sentido, las perspectivas son optimistas, ya que se puede concluir que los costes de la nueva solución de PVH-LMP están dentro del rango de otras soluciones que pueden resolver una misma situación de emergencia. Eso sí, el mercado potencial de la solución PVH-LMP habría que buscarlo en situaciones donde se requiera mucha rapidez de montaje, sobretodo en casos de emergencia (situaciones no programadas).

Entrando algo más en detalle en la solución propuesta en esta tesis, una de las aportaciones más importantes ha sido proveer a la viga de carácter modular. Un punto clave observado en los ensayos han sido las uniones entre paneles, que son bastante delicadas y en algún caso se ha fisurado el material de FRP. Se ha comprobado que pueden terminar trabajando como rótulas, lo cual es necesario para poder obtener grandes deformaciones en la viga flexible, ofreciéndole así este aporte modular mencionado.

## Capítulo 8

# Propuestas de desarrollo futuro del PVH-LMP

Como se ha mencionado en el capítulo 5, Buildair diseñó, fabricó y probó con éxito en Barcelona un prototipo de PVH-LMP de 14 m de luz. Esta exitosa prueba inicial ha permitido identificar algunas carencias. En este capítulo se pretenden expresar estas deficiencias y ampliar las capacidades del concepto de PVH-LMP para alcanzar soluciones únicas, rentables y flexibles para el diseño, construcción, operación y comercialización del puente en un futuro próximo.

Los principales retos de cara al futuro para completar una hoja de ruta hacia la comercialización del PVH-LMP son:

- Mejora de la estabilidad del puente frente a cargas estáticas y dinámicas
- Diseño del sistema de barandillas, elementos de apoyo sobre el terreno y cimentación
- Mejora del sistema de embalaje, transporte, despliegue y monitorización
- Escalabilidad de la solución a puentes de mayores luces
- Definición de las directrices de diseño, fabricación y operación

## **8.1. Mejora de la estabilidad del puente frente a cargas estáticas y dinámicas**

Se deberá hacer mayor énfasis en la estabilidad del puente frente a cargas estáticas y dinámicas debido a los efectos del tráfico y el viento (incluyendo la estabilidad lateral). El tablero del puente también debe ser diseñado para soportar su propio peso y evitar el colapso del puente en caso de deshinchado accidental. El objetivo es que el puente pueda soportar una carga de tráfico dinámica de hasta 30 tn, asegurando la estabilidad y la seguridad general del puente.

### **8.1.1. Análisis de estabilidad en fase de montaje y bajo cargas de tráfico**

Se debe llevar a cabo un análisis de estabilidad del prototipo de PVH-LMP bajo cargas inducidas durante la fase de montaje, así como cargas de tráfico en su puesta en servicio. Este análisis se podría realizar mediante un cálculo de elementos finitos avanzados para estructuras no lineales desarrollado en CIMNE ([www.cimne.com/kratos](http://www.cimne.com/kratos)). Se estudiarán mejoras en la estabilidad del prototipo actual, sobre todo en relación con la supresión de la deformación en el tablero por medio de mejoras en el contacto elástico entre éste y el tubo hinchable. En relación con esto también habrá que implementar una integración funcional completa entre los cables traccionados, el elemento de compresión y el tubo hinchable. También se estudiará la posibilidad de utilizar materiales polímeros de alta resistencia para sustituir el elemento de tracción.

### **8.1.2. Análisis aero-elástico bajo cargas de viento**

Se podría realizar un análisis de estabilidad del prototipo de PVH-LMP debido a los efectos del viento mediante métodos de elementos finitos para el análisis de la interacción fluido-estructura, desarrollados en CIMNE ([www.cimne.com/kratos](http://www.cimne.com/kratos)). Se tendrá que poner especial atención en el efecto del bajo peso del puente y de la forma del tubo hinchable en el comportamiento aero-elástico y su estabilidad durante las fases de montaje y de servicio.

## 8.2. Diseño del sistema de barandillas, elementos de apoyo sobre el terreno y cimentación

Para una futura demostración exitosa de operatividad, segura y robusta de los PVH-LMP en escenarios reales, se deben diseñar cimentaciones adecuadas en el terreno, elementos de apoyo apropiados y un sistema de barandillas.

### 8.2.1. Diseño del sistema de barandillas

Habrá que centrarse en el diseño del sistema de barandillas o barreras necesarias para garantizar la seguridad del puente durante su funcionamiento. Más específicamente se deberá investigar la posibilidad de utilizar elementos de material pultrusionado como barrera de protección en el puente. Éste puede ser o bien unido a las vigas exteriores o bien colocado in-situ (se probará la conexión). Otra ventaja de este sistema es que va a añadir rigidez al tablero, especialmente en los bordes. Se estudiará colocar una viga en U longitudinal que mejore la rigidez torsional del sistema. También se puede estudiar un sistema postesado de barandillas mediante un cable longitudinal para mayor rigidez y capacidad lateral.

### 8.2.2. Diseño de la cimentación y apoyos

La investigación se centrará en el diseño de soluciones innovadoras para los apoyos del puente y su cimentación. El prototipo actual de 14 m se ha probado sobre unos caballetes de apoyo provisionales para las pruebas en fábrica y ensayos de laboratorio, así como para las demostraciones en público. Se diseñará un sistema de cimentación y unos apoyos robustos para un despliegue exitoso en escenarios reales. Se estudiarán alternativas para diferentes lugares.

Para la mayoría de situaciones el requisito básico es que el puente sea portátil. No obstante, puede haber situaciones en las que de antemano, antes de que ocurra la emergencia, ya sabemos dónde se tendrá que instalar el puente y su ubicación es accesible. En ese caso se podría llegar a fabricar directamente una cimentación tradicional de hormigón.

### **8.3. Mejora del sistema de embalaje, transporte, despliegue y monitorización**

Es importante mejorar el sistema de plegado y embalaje de los elementos del PVH-LMP, la definición de la solución de transporte y los procedimientos para el despliegue rápido en el suelo, el desmantelamiento del puente y la monitorización de los elementos clave del puente durante su funcionamiento.

#### **8.3.1. Sistemas de plegado y embalaje eficiente de los componentes del puente**

Los esfuerzos deben concentrarse en el diseño de los elementos que componen el PVH-LMP y las operaciones de plegado y embalaje para garantizar el correcto almacenamiento de la estructura, así como optimizar el peso y espacio requerido. Los componentes del puente deben caber dentro de los contenedores estándar utilizados en el transporte de mercancías por aire y carretera. Una mejora en el diseño de todas las partes del puente facilitará y mejorará el transporte, así como las operaciones de despliegue y desmontaje.

#### **8.3.2. Sistemas de transporte eficiente de los componentes del puente**

El embalaje del puente debe ser fácil de transportar en diferentes medios de transporte: portaaviones, camiones, barcos, trenes... Se diseñarán soluciones de embalaje adecuadas para optimizar los métodos de carga y descarga.

#### **8.3.3. Métodos para el despliegue y desmontaje rápidos**

El despliegue rápido del PVH-LMP es fundamental para ser competitivo frente a otras alternativas. El sistema de almacenamiento se optimizará teniendo en cuenta la necesidad de una descarga rápida de todos los elementos. Se definirá un procedimiento que garantice un despliegue rápido en diferentes escenarios posibles. El objetivo es reducir al mínimo la necesidad de material y maquinaria auxiliar para obtener un ahorro de tiempo significativo, teniendo siempre en cuenta la seguridad ante todo. Se estudiará la opción de lanzar por paracaídas desde un avión algunos de los componentes del puente por medio de la tecnología de paracaídas.

También se tendrá que definir el procedimiento para el desmontaje rápido

y eficiente del PVH-LMP.

#### **8.3.4. Sistemas de monitorización**

Se definirá el sistema de control durante la fase de servicio del puente. Esto incluye la definición de los sensores que se adherirán al tubo hinchable y al tablero, con el fin de controlar la presión de aire en el tubo y medir tensiones y deformaciones en los elementos clave del puente debido a las cargas de tráfico y viento. También se podrá definir y desarrollar el tratamiento de los datos de los sensores mediante el uso de una plataforma web.

### **8.4. Definición de las directrices de diseño, fabricación y operación**

Para una fabricación en serie y puesta en marcha en situaciones reales de PVH-LMP, habrá que definir muy detalladamente los procedimientos a seguir en cada una de estas fases.

#### **8.4.1. Directrices para el diseño, análisis y fabricación**

Se elaborarán directrices para el diseño, análisis y fabricación del PVH-LMP. Esto incluye la especificación de los pasos a seguir para la definición de la forma estructural de la viga hinchable, el patronaje, la selección de materiales para el tubo hinchable, métodos de análisis y procedimientos de fabricación del tubo y el tablero (incluyendo la fabricación en serie). Esta tarea también incluye las especificaciones para la definición del sistema de motorización, el elemento de tracción inferior y el sistema de anclaje, entre otros elementos del puente.

Se pondrá especial énfasis en la definición de directrices de seguridad sobre los posibles problemas relacionados con el uso del puente. Esto incluye la definición del sistema de barandillas, la selección de material ignífugo y las restricciones de accesibilidad en casos de emergencia, entre otros.

#### **8.4.2. Directrices para el transporte, embalaje y operatividad**

Se definirán directrices para el plegado, embalaje, transporte, despliegue y desmontaje del PVH-LMP bajo una cierta variedad de situaciones. Se



especificarán reglas generales y directrices para el funcionamiento y mantenimiento de los diferentes componentes del puente durante el montaje, así como también una vez que han sido desmontados, empaquetados y almacenados. Se hará hincapié en los aspectos de mantenimiento relacionados con la seguridad de la estructura del puente. Se definirán también directrices para la monitorización de la estructura.

### **8.5. Escalabilidad de la solución a puentes de mayores luces**

Se deberán realizar estudios preliminares para el diseño, análisis, fabricación y operación de puentes de mayores longitudes, en el rango de 20-30 metros, capaces de soportar cargas de tráfico de hasta 35 y 40 toneladas. En el estudio también se considerará el uso de un número variable de vigas hinchables.

# Bibliografía

- [1] Buildair & CIMNE, *AIR-BRIDGE: Development, validation and transfer to market of a prototype of Air-Bridge for surface transport vehicles*, 2012-13. [http://www.cimne.com/air-bridge/presentation/index\\_en.html](http://www.cimne.com/air-bridge/presentation/index_en.html).
- [2] United Nations Development Program, *Supercities face high quake risk*, April 2011. <http://reliefweb.int/node/397978>.
- [3] United Nations Development Program, *Supercities face high quake risk*, April 2011. [http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Full\\_Report\\_43.pdf](http://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/Full_Report_43.pdf).
- [4] GRID Arendal, *Desastres naturales*. <http://www.grida.no/publications/other/geo3/?src=/geo/geo3/spanish/448.htm>.
- [5] Banco Interamericano de Desarrollo (BID), *Gestión financiera de riesgos de desastres naturales para República Dominicana*. <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=35232098>.
- [6] ActionAid, *FactFile*. <http://www.actionaid.org/main.aspx?PageID=1061>.
- [7] GFDRR Country Notes, *Disaster Risk Management in Latin America and the Caribbean Region*. <http://www.gfdr.org/gfdr/sites/gfdr.org/files/Haiti-2010.pdf>.
- [8] U.S. Federal Highway Administration, Office of Technology, *National Bridge Inventory Program*. [http://www.allcountries.org/usensus/1016\\_bridge\\_inventory\\_non\\_deficient\\_and\\_deficient.html](http://www.allcountries.org/usensus/1016_bridge_inventory_non_deficient_and_deficient.html).
- [9] Parlamento Sudafricano, *Temporary Bridges for Emergencies*. <http://www.pmg.org.za/docs/2005/051026buys.htm>.
- [10] Headquarters Department of the Army, *Bailey Bridge, Field Manual 5-277*, 1986. [www.baileybridge.com](http://www.baileybridge.com).

- [11] Headquarters Department of the Army, *Medium Girder Bridge, Field Manual 5-212*, 1989. <http://www.globalsecurity.org/military/agency/army/250eng-co.htm>.
- [12] *Armored Vehicle-Launched Bridge*. [http://en.wikipedia.org/wiki/M60\\_AVLB](http://en.wikipedia.org/wiki/M60_AVLB).
- [13] *Wolverine*. <http://www.fas.org/man/dod-101/sys/land/wolverine.htm>.
- [14] *Expandable Scissor Bridge*. <http://www.erelogistics.com/portable-bridge-systems/ere-logistics/>, <http://www.youtube.com/watch?v=P5vTsgkfnNQ>.
- [15] *Dry Support Bridge*. [http://www.primeportal.net/vehicle\\_pages/dsb\\_home.htm](http://www.primeportal.net/vehicle_pages/dsb_home.htm).
- [16] Headquarters U.S. Marine Corps, *Principal Technical Characteristics of U.S. Marine Corps Engineer Equipment, Technical Manual 11275-15/3D*, 2009.
- [17] R. Luchsinger, A. Pedretti, M. Pedretti, and P. Steingruber, "The new structural concept tensairity: Basic principles," in *Proceedings of the Second International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation*, (Lisse, The Netherlands), 2004.
- [18] R. Luchsinger, A. Pedretti, M. Pedretti, and P. Steingruber, "The new structural concept tensairity: Fe-modeling and applications," in *Proceedings of the Second International Conference on Structural Engineering, Mechanics and Computation*, (Lisse, The Netherlands), 2004.
- [19] M. Pedretti, "Tensairity," in *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering (ECCOMAS)*, 2004.
- [20] R. Luchsinger, R. Crettol, and T. Plagianakos, "Temporary structures with tensairity," in *International Symposium IASS-SLTE, 3rd Latin American Symposium on Tensile-Structures*, (Acapulco, Mexico), 2008.
- [21] R. Luchsinger, "Recent progress in the R&D of TENS AIRITY," in *International Conference on Textile Composites and Inflatable Structures (Structural Membranes)*, (Barcelona, Spain), 2009.
- [22] R. Luchsinger and U. Teutsch, "An analytical model for Tensairity girders," in *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*, (Valencia, Spain), 2009.
- [23] T. Wever, T. Plagianakos, R. Luchsinger, and P. Marti, "Effect of fabric webs on the static response of spindle-shaped Tensairity columns," *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 2010.

- [24] Ministerio de Fomento, *IAP-11, Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*, 2011. Normativa de puentes en España.
- [25] Comité Europeo de Normalización (CEN), *Eurocódigo 1: Bases de proyecto y acciones en estructuras. Parte 3: Acciones del tráfico en puentes*, 1998. Normativa de puentes en Europa.
- [26] American Association of State Highway and Transportation Officials, *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, 5th ed., 2010. Normativa de puentes en Estados Unidos.
- [27] ABCA Quadripartite, *Trilateral Test Design and Test Code for Military Bridging and Gap-crossing Equipment*, 2005. Agreed to by: Germany, United Kingdom, United States of America.
- [28] Headquarters Department of the Army, *Military Nonstandard Fixed Bridging, Field Manual 3-34.343*, 2002. Manual para diseño y clasificación de puentes militares en Estados Unidos.
- [29] OTAN, *Military Load Classification of Bridges, Ferries, Rafts and Vehicles*, 6th ed., 1986. Acuerdo de Estandarización de la OTAN (STANAG No. 2021).
- [30] OTAN, *Military Load Classification Markings*, 6th ed., 1980. Acuerdo de Estandarización de la OTAN (STANAG No. 2010).
- [31] Headquarters Department of the Army US Marine Corps, *River-Crossing Operations, Field Manual 90-13*, 1998. Manual de operaciones para puentes militares en Estados Unidos.
- [32] A. Ruiz-Teran and A. Aparicio, "Structural behaviour and design criteria of under-deck cable-stayed bridges and combined cable-stayed bridges. Part 1: Single-span bridges," *Canadian Journal of Civil Engineering*, no. 35, pp. 938–950, 2008.
- [33] VRR Aviation, Rotterdam, The Netherlands, *PBF pallet (HcU-6E)*, 2013.
- [34] AENOR, *EAE: Instrucción de Acero Estructural*, 2011.
- [35] AENOR, *EUROCÓDIGO 3, Proyecto de estructuras de acero*, 1998.
- [36] ASCE, *Structural Plastics Design Manual. Manual No.63*, 1984.
- [37] European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, *Reinforced Plastic Composites: Specifications for Pultruded Profiles, Parts 1-3, EN 13706*, 2002.

- [38] National Research Council of Italy (CNR), Rome, *CNR DT 205/2007, Guide for the design and construction of structures made of thin FRP pultruded elements*, 2008.
- [39] AENOR, *UNE-EN 13782, Estructuras Temporales, Carpas, Seguridad*, 2007.
- [40] AENOR, *UNE-EN 1492-1, Eslingas textiles, Seguridad*, 2001.
- [41] Government of Papua New Guinea (Department of Works), *Government PNG funded projects*. <http://www.works.gov.pg/go-png.html>.
- [42] IRIN, Humanitarian news and analysis, *AFRICA: Natural disasters, a heavy price to pay*. <http://www.irinnews.org/IndepthMain.aspx?reportid=62446&indepthid=14>.
- [43] GRID Arendal, *Desastres naturales*. <http://www.grida.no/publications/other/geo3/?src=/geo/geo3/spanish/448.htm>.
- [44] J. R. Casas, “Informe sobre las características técnicas y el mercado del puente l.m.p.,” in *CIMNE*, (Barcelona, España), Diciembre 2015.
- [45] WFEL, *WFEL News*. <https://www.wfel.com/news/>.
- [46] G. Sedlacek, H. Trumpf, and U. Castrischer, “Development of a light-weight emergency bridge,” *Structural Engineering International*, vol. 14, no. 4, pp. 282–287, 2004.
- [47] J. Kosmatka, “Structural testing of darpn/bir composite army bridge treadway,” *Journal of Composite Structures*, vol. 4, pp. 99–115, 1999.
- [48] R. Wight, M. Erki, C. Shyu, R. Tanovic, and H. P.J., “Development of frp short-span deployable bridge—experimental results,” *Journal of Bridge Engineering*, vol. 11, no. 4, pp. 489–498, 2006.
- [49] M. Robinson and J. Kosmatka, “Development of a short-span fiber-reinforced composite bridge for emergency response and military applications,” *Journal of Bridge Engineering*, vol. 13, no. 4, pp. 388–397, 2008.
- [50] P. Heffernan, R. Wight, and M. Erki, “Research on the use of frp for critical load-bearing infrastructure in conflict zones,” *Journal of Composites for Construction*, vol. 15, no. 2, p. 136–145, 2011.
- [51] J. Kosmatka, “Composite bridging for military and emergency applications,” in *8th Annual Int. Conf. on Composites/Nano Engineering*, (Anchorage (Alaska)), 2011.

- [52] J. Kosmatka and F. Policelli, "The development of the darpa/bir composite army bridge: Phase i accomplishments," *Journal of Advanced Materials*, vol. 31, no. 3, p. 23Ú36, 1999.
- [53] G. Kovacs and K. Spens, "Humanitarian logistics in disaster relief operations," *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, vol. 37, no. 2, p. 99Ú114, 2007.

## Apéndice A

# Ensayo de un prototipo de viga de PVH-LMP de 4 metros de longitud



Laboratori per a la Innovació  
Tecnològica d'Estructures i Materials

**Report N° 120529-S01173\_v2**

**Bending test of an inflatable structure**

**Client: BuildAir**

Engineer: Catalin Neagoie  
Coordinator: Lluís Gil



CER LITEM - Universitat Politècnica de Catalunya  
C/ Colom 11 Ed. TR45 ETSEIAT 08222 Terrassa  
T. 937398724 F. 937398994 litem@upc.edu

*July 2012*



## 1. Introduction

The current report presents the results of an experimental test regarding the flexural behavior of an inflatable structure composed of a synthetic membrane filled with air under pressure, attached to a plywood top by means of textile straps and steel bolts.

The experiment has been conducted in the laboratory of CER LITEM from the Department of RMEE of ETSEIAT Terrassa (UPC).

## 2. Objectives of the study

- To evaluate the behavior of the inflatable structure under service load conditions.
- To determine the global deflection and the cross-sectional displacements of the prototype.
- To assess the influence of the carried load over the internal pressure of the air contained inside the synthetic membrane.

## 3. Experimental methodology

The inflatable structure was tested under three-point bending, in service load conditions, until a maximum load value of 2,15 kN was achieved. Because of large vertical deflections it was considered during the experiment that a load increase beyond this value would be undesirable.

Loading was done by a 100 kN MTS hydraulic actuator and the force value was measured by a more precise 50 kN HBM load cell. A steel beam was used in order to better distribute the load across the width of the structure.

The prototype had a total length of 3970 mm, 540 mm in height and 600 mm in width in the middle cross section. The measured span between the supports was 3750 mm. The test setup is described in the following figures.

TEST SETUP  
Longitudinal view

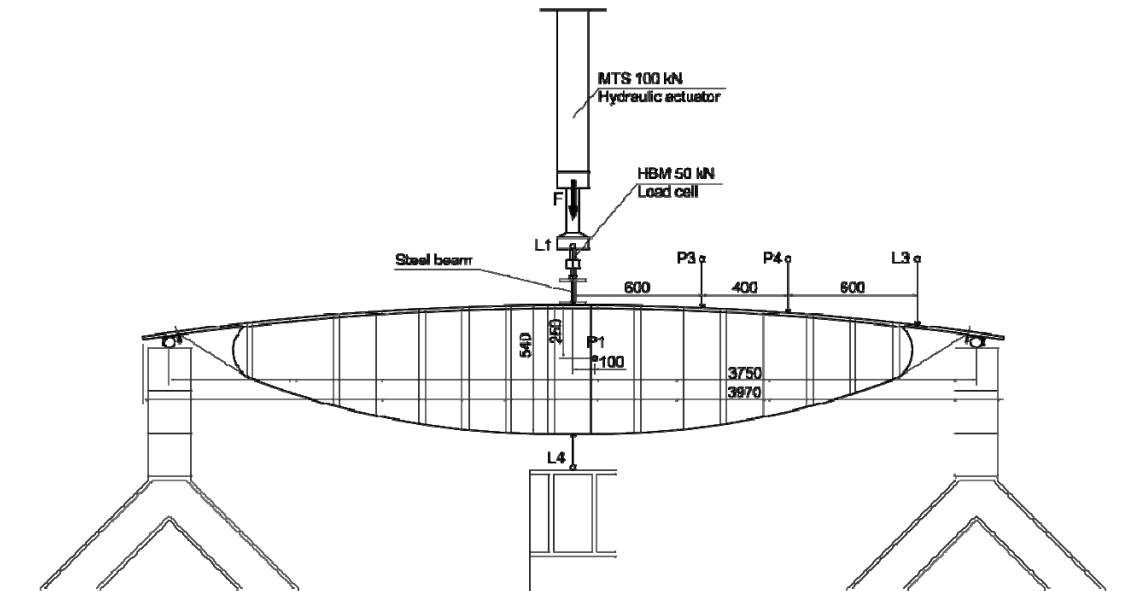


Figure 1. Longitudinal view of the test setup.

TEST SETUP  
Middle cross section view

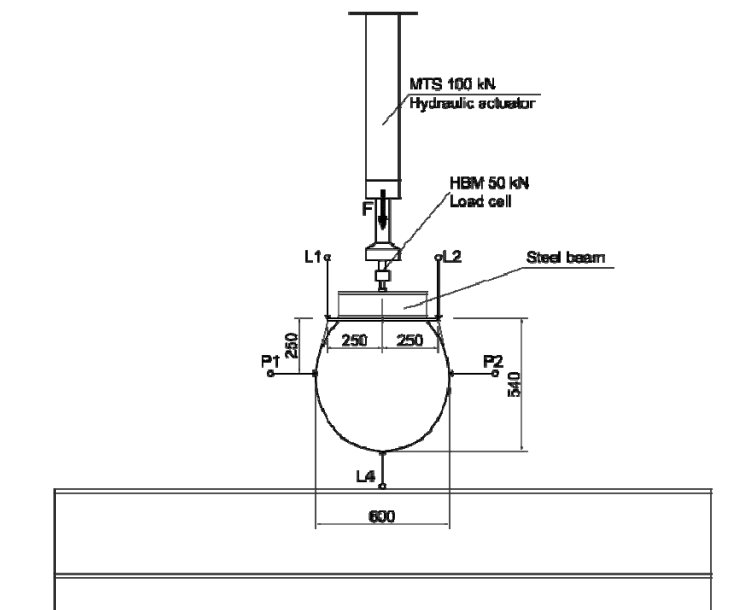


Figure 2. Middle cross section view of the test setup.

The prototype was simply supported on steel cylinders (5 cm in diameter), attached to U-shaped steel profiles in order to avoid local stress concentrations and to allow the free rotation of the specimen.

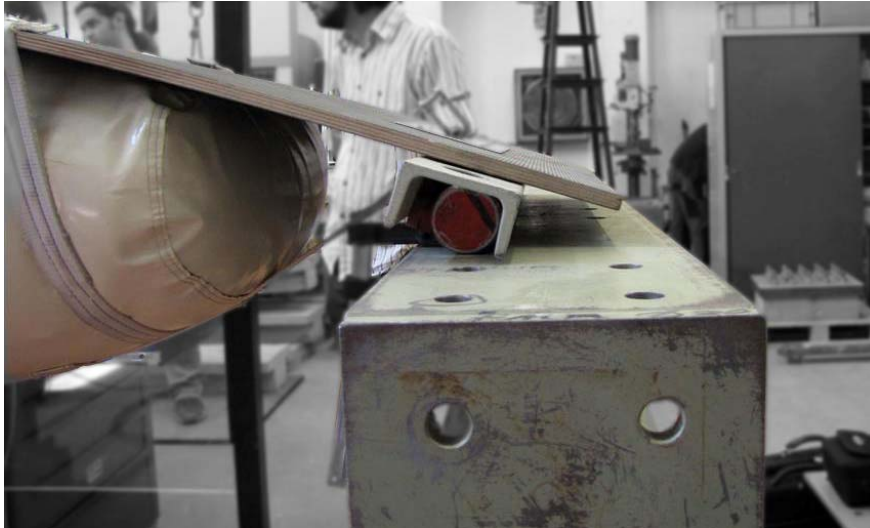


Figure 3. Support design.

Lasers L1 and L2 were positioned so as to measure the top middle displacement, on either side of the specimen. By considering the fact that the membrane itself will deform during the test, another laser, L4, was placed below its middle cross section to evaluate the respective vertical displacement.

The middle lateral deformation of the membrane was measured with two potentiometers, P1 and P2, positioned at 250 mm below the plywood top face, on the first textile strap. In the case of the longitudinal deflection, the vertical displacements were measured in three points by potentiometer P3 (600 mm from the center), potentiometer P4 (1000 mm from the center) and laser L3 (1600 mm from the center, at the end of the inflatable membrane).

The initial pressure, before the experiment commenced, was 220 mbar. The value was double checked with a manual pressure gauge.

Loading of the specimen was done at a constant speed of 5 mm/min and all information from sensors was gathered by an HBM data acquisition system (50 Hz sampling).

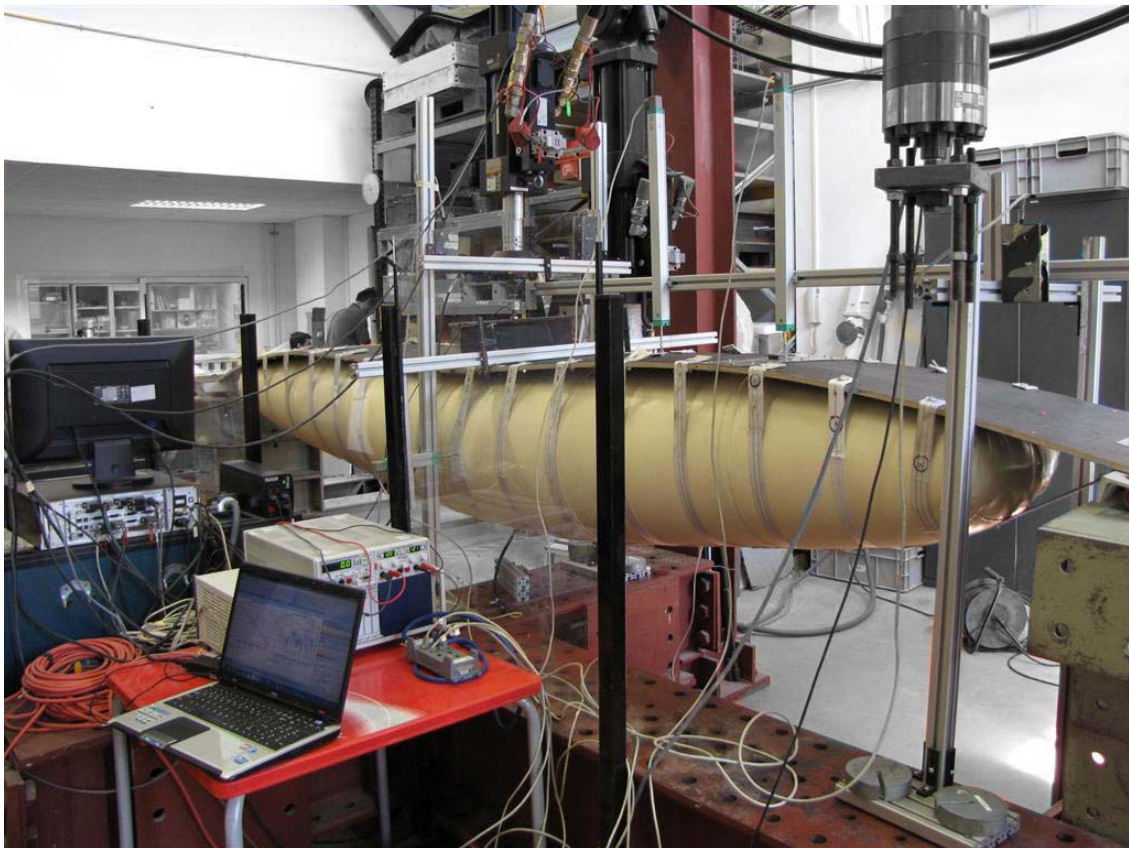


Figure 4. Instrumentation of the inflatable structure.

#### 4. Experimental results and observations

As we can notice from the force vs. time diagram, the force varied linearly until the maximum value, with a small exception at the beginning of the test, when the system was still settling.

The inflatable prototype was subjected to service load conditions until a maximum value of 2,15 kN. Due to large vertical deflections it was decided not to increase the load further and instead keep the specimen for approximately 20 minutes under constant displacement, since the test had been carried away under displacement control method. We can observe in the graphic that during this stage the force dropped 0,15 kN until an almost constant value of 2 kN. It can be argued that this case happened because of the capability of the system to better redistribute the load – possibly owing the fact to the deformation of the textile straps that tied the inflatable membrane to the plywood board and the movement of membrane itself.

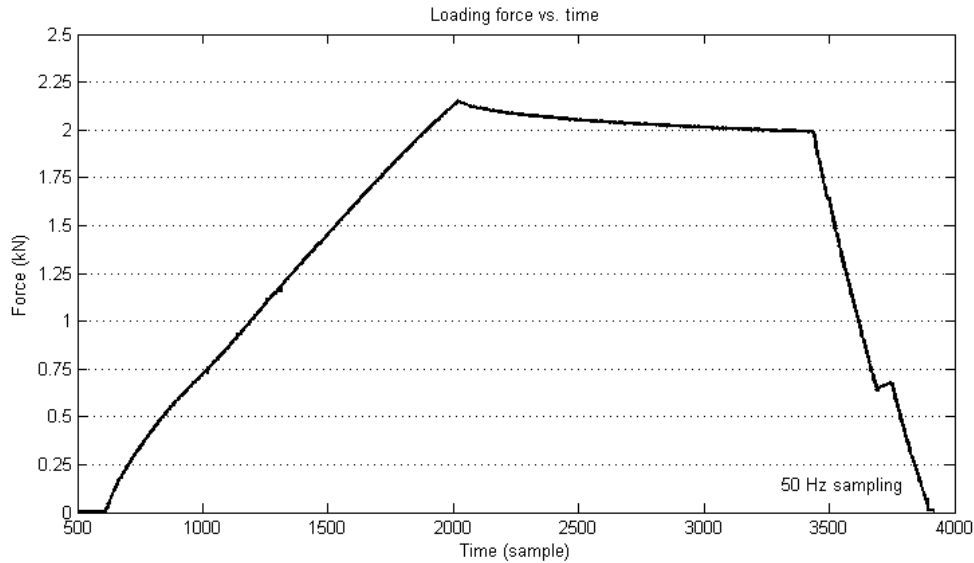


Figure 5. Loading force vs. time.

The final test stage consisted in monitoring the unloading of the specimen at a constant rate of 5 mm/min. At a force value of approx. 0,6 kN the speed was increased to 10 mm/min until it was fully unloaded.

The following figure plots the force parameter versus the top middle displacement of the structure. It is noticeable that the system evidenced as designed a linear behavior, with no evidence of failure. The maximum displacement measured was 115,9 mm.

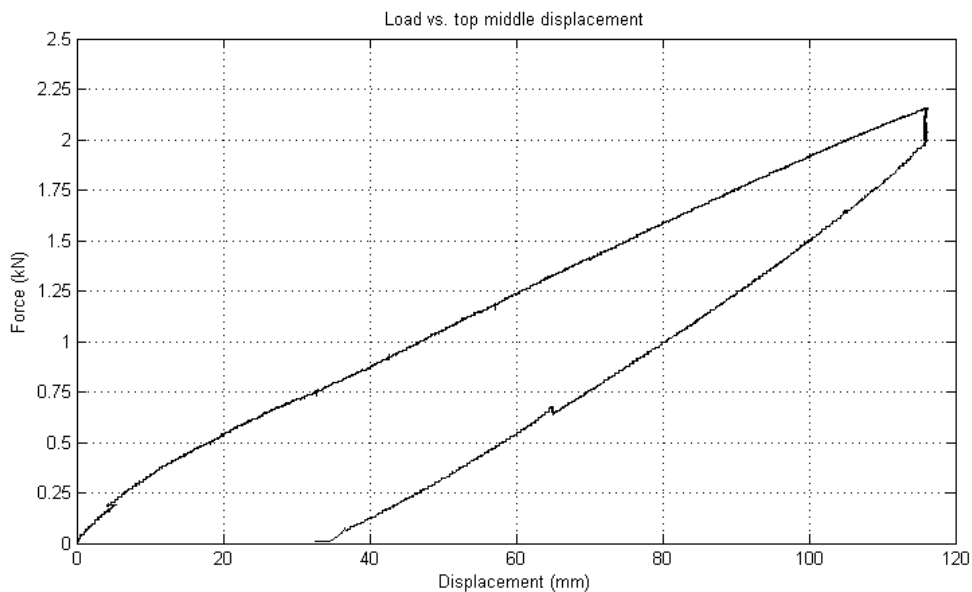


Figure 6. Load vs. top middle displacement.

After the maximum load the displacement was kept constant but the load decreased to 2 kN, as mentioned before. The unloading of the system was fairly linear until the end.

In a more complete plot a comparison is made between the displacements registered at the middle cross section of the structure. Plotted with blue line, the bottom displacement grew slower than the top one, presenting the same linear trait. Due to the fact that the system had important vertical deflections and that laser was positioned close to the membrane, the measurement stopped at approx. 73 mm and continued only in the unloading stage. Presented with blue dotted line is the possible unrecorded variation of the bottom deflection, where a maximum value of 85 mm might had been achieved.

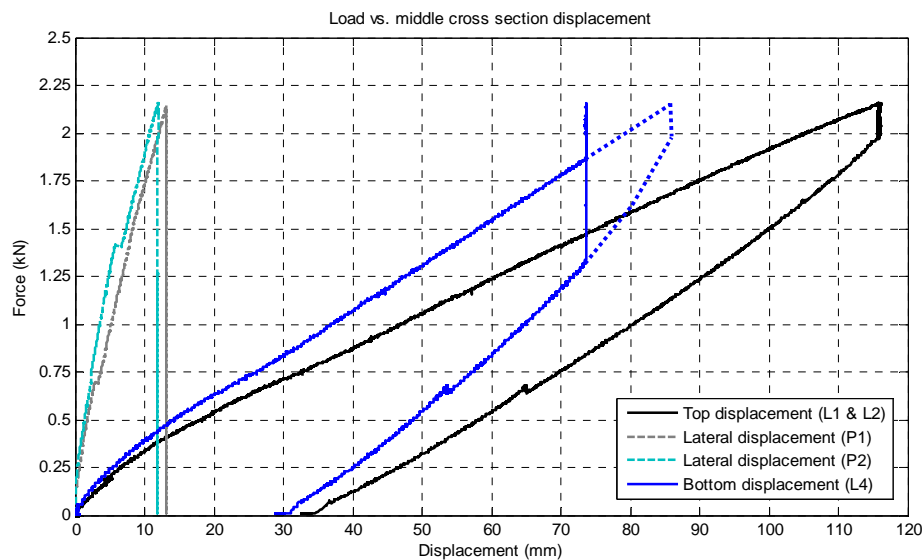


Figure 7. Load vs. middle cross section displacements.

In the case of the lateral displacements both potentiometers measured similar values – the maximum displacement was around 13 mm for P1 and 12 mm for P2. After starting the unloading phase the instruments detached from the textile straps and hence the constant measurements until the end of the experiment.

By plotting discrete values of the vertical deflections evaluated in the longitudinal direction and by considering the symmetry of the test setup it is possible to analyze the global deformation of the inflatable structure. The values are displayed for forces at an interval of 0,5 kN.

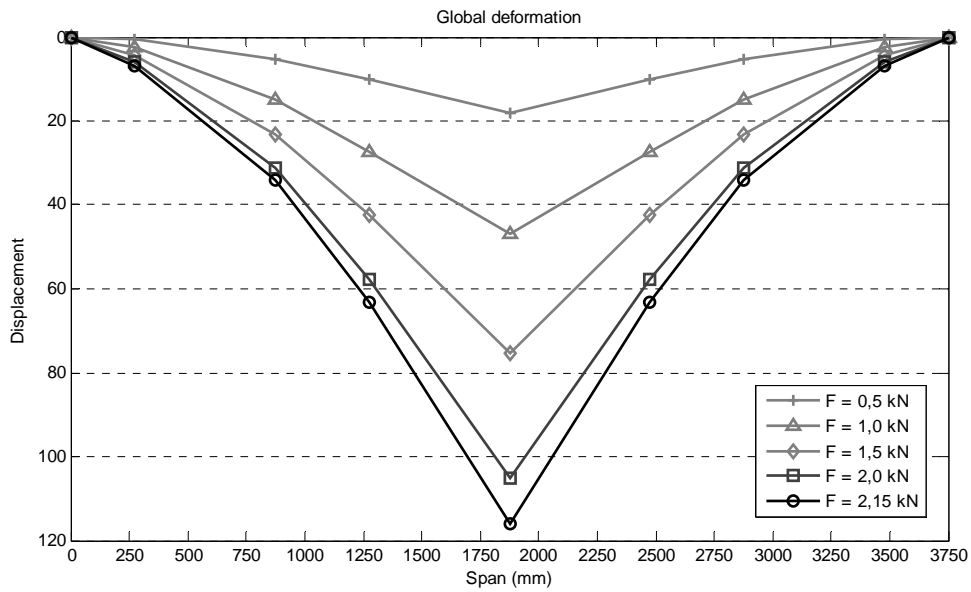


Figure 8. Global deformation of the inflatable structure.

Opposed to typical simply supported structures the inflatable structure did not illustrate a parabolic distribution of the deflections and instead a more triangular one with the maximum deflection encountered, as expected, in the middle of the system. This fact can be noticed also in the picture below.

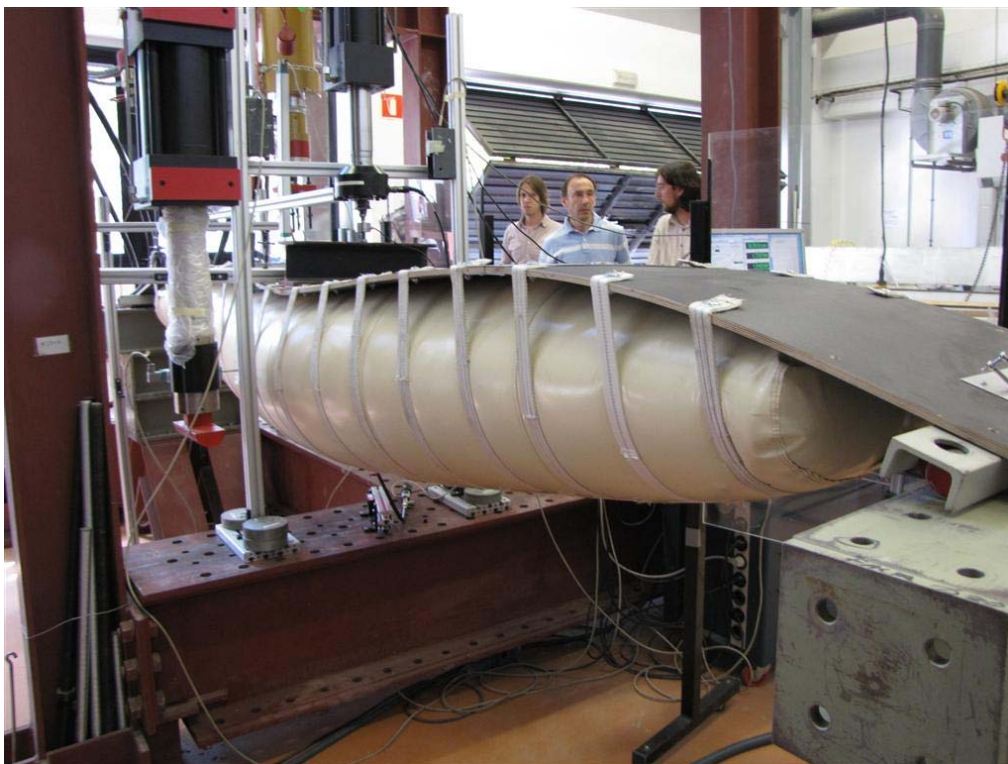


Figure 9. The deflection of the specimen under constant displacement.

This type of behavior can be attributed to the way the plywood top was designed – with a metallic plate connection at the middle – and to the fact that the load was concentrated on it.

The internal air pressure in the synthetic membrane was measured by a manual pressure gauge and determined to be 220 mbar at the start of the test. When the test finished the pressure was measured again and a value of 210 mbar was displayed as shown in Figure 10, very close to the initial one. A little lost of pressure might be justified by a leak of gas because of hand manipulation of the measurement system.

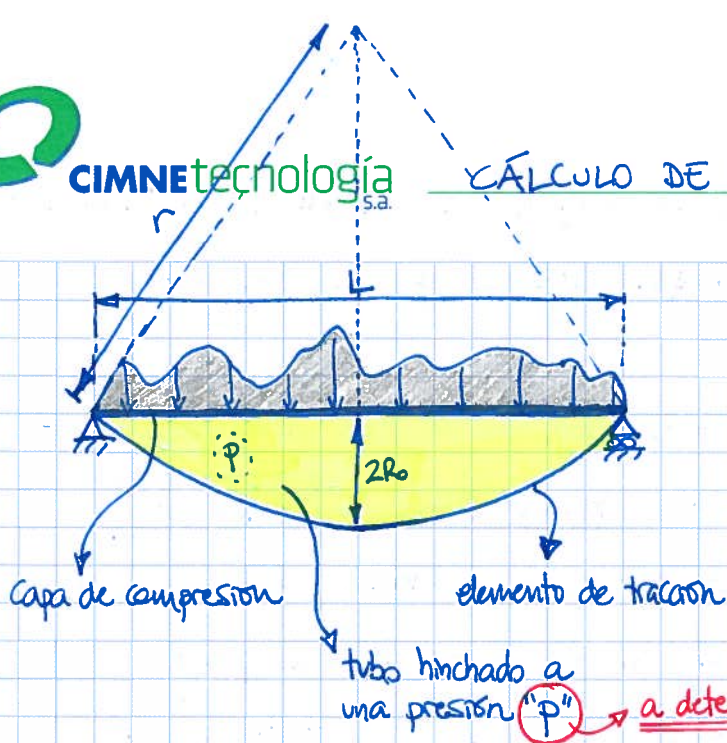


**Figure 10. Manual measurement of the internal air pressure.**



## Apéndice B

# Hojas Excel de cálculo analítico simplificado



Tenemos una viga Tensarity de longitud  $L$  con forma de huso textil (spindle-shaped) que en el centro tiene un diámetro  $2R_0$  sometida a unas determinadas cargas.

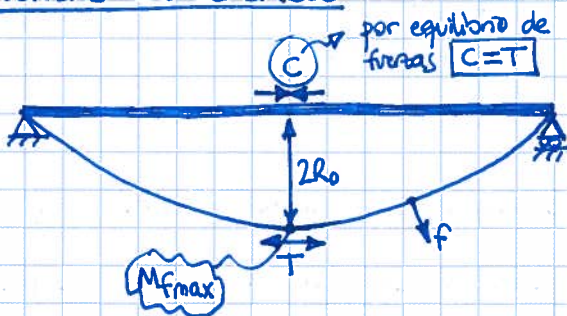
El tubo lo suponemos con forma circular de radio " $r$ " para facilitar los cálculos. Otra opción sería suponerlo parabólico, pero en nuestro caso ambas opciones son muy parecidas (para  $L=14\text{m}$ ,  $R_0=0,7\text{m}$ ; la máxima diferencia entre ambas es de  $14\text{mm}$ ).

El radio " $r$ " se relaciona de forma sencilla con  $L$  y  $R_0$ :

$$r^2 = \left(\frac{L}{2}\right)^2 + (r - 2R_0)^2$$

$$\boxed{r = \frac{L^2}{16R_0} + R_0}$$

#### • FUERZAS EN EL CABLE



Por una parte el cable tiene que absorber el momento flector máximo que tendremos en el centro de la viga. La tensión será:

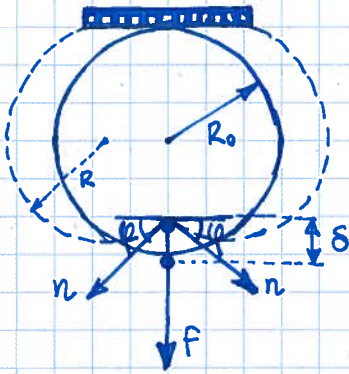
$$M_{fmax} = T \cdot 2R_0 \Rightarrow \boxed{T = \frac{M_{fmax}}{2R_0}} \quad (1)$$

Por otra parte el cable interactúa con la membrana, soportando una fuerza normal " $f$ ", que según la teoría de cables se obtiene para un cable:

$$\boxed{T = f \rho}, \quad (2)$$

donde  $\rho$  es el radio de curvatura, que en este caso es " $r$ ".

Suponiendo un esquema similar al que propone Pedretti et. al en "The new structural concept Tensairity: Basic principles", tenemos que el cable deforma el tubo hinchable:



La tensión circunferencial en la tela viene dada por:

$$n = pR \rightarrow \text{la tensión máxima} \rightarrow n_{\max} = pR_0$$

Asumiendo que el esquema obtenido es similar al que se propone en el paper tenemos que:

$$f = 2n \sin \varphi \quad \left( \text{si } \frac{\delta}{R_0} \leq 0,2 \right) \rightarrow f_{\max} = \frac{1}{2} p R_0 \quad (3)$$

Conociendo  $\rho$ , junto con (2) y (3):

$$T = f \rho = \frac{1}{2} p R_0 r = \frac{1}{2} p R_0 \left( \frac{L^2}{16R_0} + R_0 \right) \quad (4)$$

tensión en el cable debido al contacto con la tela hinchada a presión "p"

suponemos que el cable no penetra en el tubo más de un 20% del radio inicial de diseño

Igualando las ecuaciones (1) y (4) obtendremos la presión necesaria a la que hay que hinchar el tubo para sostener las cargas que producen un momento flector máximo  $M_{\max}$ :

$$T = \frac{M_{\max}}{2R_0} = \frac{1}{2} p R_0 \left( \frac{L^2}{16R_0} + R_0 \right) \Rightarrow p = \frac{M_{\max}}{R_0^2 \left( \frac{L^2}{16R_0} + R_0 \right)}$$

### • EFECTOS LOCALES

Si consideramos una viga Tensairity donde la capa de compresión está compuesta por varios tableros unidos entre sí para formar un conjunto rígido, la carga de una rueda de un vehículo se repartirá sobre el tubo hinchable en una superficie igual a la del tablero. Si el tablero mide "l" x "h", y la rueda transmite una carga Q:

$$p_{\text{local}} = \frac{Q}{l \cdot h}$$



### • FUERZAS EN EL TABLERO

Según hemos visto, la compresión en el tablero es igual a la tracción en el cable:

$$C_{\max} = T_{\max}$$

De esta forma la tensión máxima en el cable será:

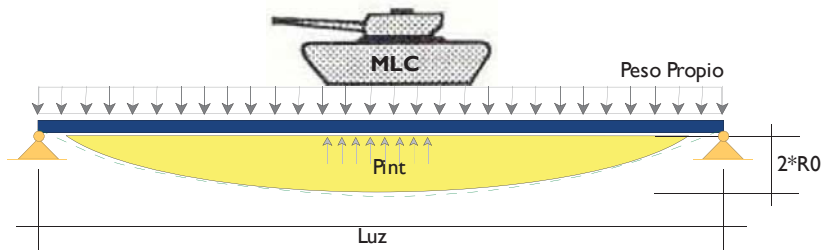
$$T_{\max} = \frac{1}{2} p_{\max} R_0 \left( \frac{L^2}{16R_0} + R_0 \right) \quad \text{donde } p_{\max} = \max \{ p, p_{\text{local}} \}$$

## Cálculo de vigas Tensairity

(Datos de entrada marcados en verde / selección del vehículo en la pestaña MLC)

### Datos de la viga (no del puente, sólo de la viga)

Luz =	14.00 m	(total del puente, no del tubo inflado)
Radio R0 =	0.70 m	(es el RADIO del tubo en el centro de la viga)
Ancho placas =	1.70 m	(ancho de las placas del tablero de la viga)
Largo placas =	2.00 m	(largo de las placas del tablero de la viga)
Núm de placas =	7 ud	(número de placas que forman el tablero de la viga)
Peso total viga =	25.00 KN	estimación del peso propio de la viga --> 1.78571429 KN/m
Coef seguridad =	1.15	1.05 KN/m2
<b>MLC =</b>	<b>30</b>	(definido en la pestaña MLC)
Mf max vehículo =	469.15 KN·m	(datos según MLC)
Q max vehículo =	75.56 KN	(datos según MLC)



### 1) Cálculo de momentos flectores

Mf Q=	469.15 KN·m	(momento flector maximo carga vehículo)
Mf pp=	50.31 KN·m	(momento flector maximo por carga repartida peso propio)
<b>Mf maximo=</b>	<b>519.47 KN·m</b>	

### 2) Cálculo de la esbeltez

$$\text{Esb} = 10.00 \quad \text{Esb} = \frac{L}{2 * R0}$$

### 3) Presión interior por efectos sobre todo el puente

$$\text{Pint 1} = 58.249 \text{ KN/m}^2 \rightarrow 582.49 \text{ mbar}$$

$$P = \frac{M_{fmax}}{R_0^2 \left( \frac{L^2}{16R_0} + R_0 \right)}$$

### 4) Presión interior por efectos locales de las ruedas

Área de carga=	3.40 m <sup>2</sup>	
Pint 2=	44.44 KN/m <sup>2</sup>	444.44 mbar

$$P_{local} = \frac{Q}{L \cdot h}$$



**P int adoptada= 58.25 KN/m<sup>2</sup> ---> 582.49 mbar**

(Es la máxima de las dos presiones interiores calculadas P1 y P2)

### 5) Cálculo de la tensión en la membrana

**Tens mem= 40.77 KN/m** (el esfuerzo máximo esperado en la membrana) **Tens mem = Pint \* R0**

### 6) Cálculo de la carga sobre el elemento a tracción y a compresión

T presión tubo= 371.05 KN Tracción por la presión sobre el cable

$$T_{max} = \frac{1}{2} P_{max} R_0 \left( \frac{L^2}{16R_0} + R_0 \right)$$

T brazo palanca= 371.05 KN Tracción por el brazo de palanca para absorber momento flector

$$T = \frac{M_{fmax}}{2R_0}$$

**Carga Traccion= 371.05 KN** (adoptamos la máxima de las dos)

### 7) Carga del tubo inflado sobre la capa de rodadura y sobre el cable

**Carga f maxima= 20.39 Kn/m** (es la carga maxima / unidad de longitud a lo largo de la viga) (siempre que la penetración sea menor al 20% del radio R0)

### Notas varias:

- 1.- Se debe cumplir que la esbeltez de la viga sea mucho mayor que 1
- 2.- Se debe cumplir que la penetración del cable sea menor que el 20% del radio
- 3.- No se consideran efectos locales como por ejemplo anclaje del tubo a la capa de rodadura

**Cargas ejercidas por los vehículos militares sobre UNA VIGA (sólo un lado del vehículo)**  
 Vehículos catalogados según la Military Load Classification (MLC) - Hoja válida para MLC24\_30\_40\_L50

MLC =	30	← único dato de entrada (el resto se calcula automáticamente según MLC)
<b>MLC con ruedas</b>		
UN lado del vehículo		
Q1 =	57.30 KN	a = 3.05 m
Q2 =	31.28 KN	b = 1.22 m
Q3 =	31.28 KN	c = 3.66 m
R <sub>total</sub> =	82.30 KN	a+b+c = 7.93 m
R <sub>viga</sub> =	95.03 KN	a+b = 4.27 m
MF max =	461.62 KN·m	c = 3.66 m
(suponiendo en centro viga)		L = 14.00 m
		L/2 = 7.00 m
Contacto Rueda	75.56 KN	
Ancho contacto =	0.35 m	
Largo contacto =	0.30 m	
Área contacto =	0.11 m <sup>2</sup>	

MF max	469.15 KN·m
Q max	75.56 KN

<b>MLC con orugas</b>		
UN lado del vehículo		
Q total =	156.52 KN	e = 3.35 m
MF max =	469.15 KN·m	
Contacto Rueda Equivalente	26.09 KN	
(considerando carga repartida en 5 ó 6 ruedas, según normativa)		
Ancho contacto =	0.46 m	pb = 0.90 N/mm <sup>2</sup>
Largo contacto =	0.063 m	
Área contacto =	0.0290 m <sup>2</sup>	

1	2	3	4	5	6	7
MLC	<b>Wheeled Vehicles</b>					
	<b>Tracked Vehicles</b>	<b>Axle Load [Tonnes] and Spacing [m]</b>	<b>Maximum Single Wheel Contact Width [m]</b>	<b>Typical Single Wheel Contact Width [m]</b>	<b>Axle Load and Spacing [Tonnes]</b>	<b>Axle Wheel Spacing and nominal Contact Width [m]</b>
24						
30						
40						
50						

## Apéndice C

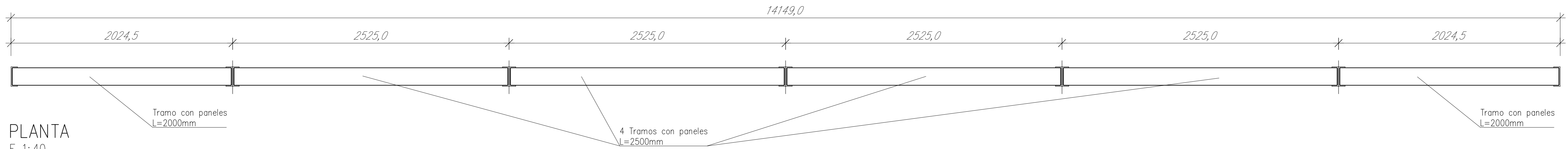
# Planos de diseño del PVH-LMP

LISTADO DE REVISIONES			
Nº	FECHA	COMENTARIOS	CTR
1	26/10/2012		B
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			

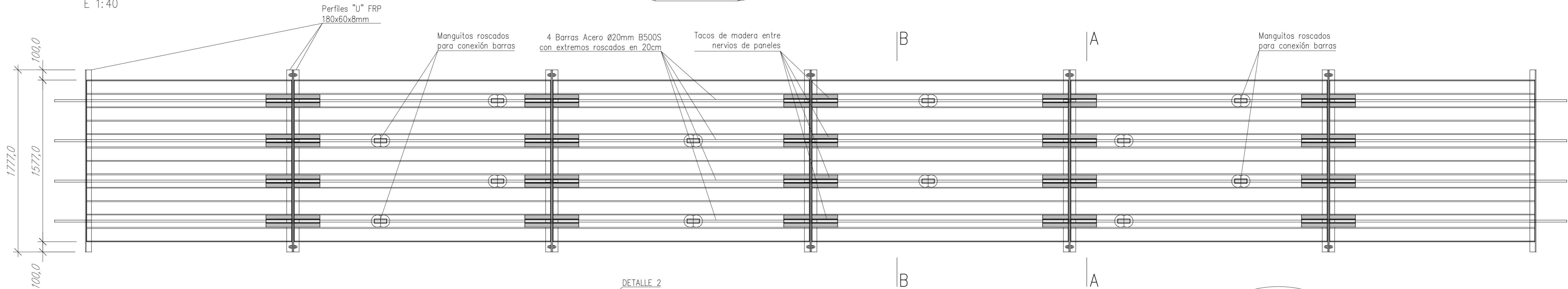
DOCUMENTOS RELACIONADOS	
Nº	Nombre de los documentos
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	

### AIR-BRIDGE - PLAN 1: GENERAL VIEW OF THE AIR-BEAM

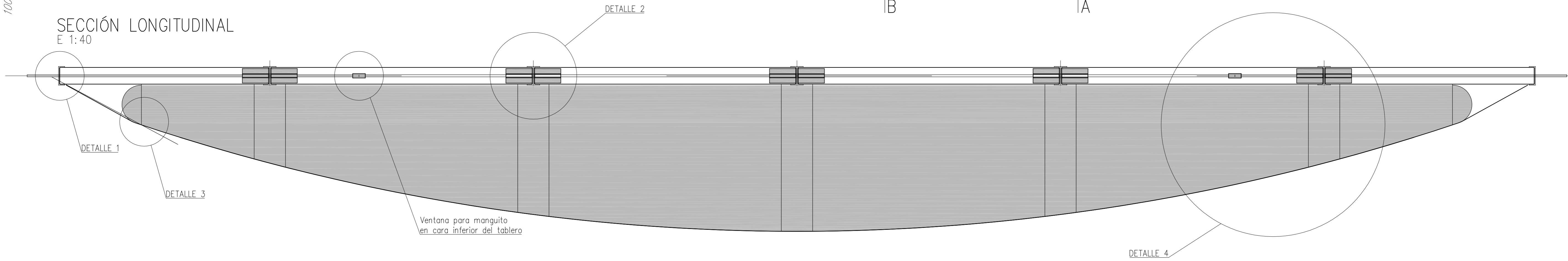
DISTRIBUCIÓN DE PANELES  
 E 1: 40



PLANTA  
 E 1: 40



SECCIÓN LONGITUDINAL  
 E 1: 40



**Boma Inpasa** 2013  
 Telf +34 934 144 762  
 www.bomainpasa.com

Proyecto Puente Hinchable

**xD02**

Detalles

Está prohibida la reproducción total o parcial, de este documento por cualquier medio, sin el consentimiento explícito de sus propietarios.

Consultar en los planos de arquitectura y replantear la posición y/o forma de los elementos representados en este documento. En este plano sólo se acotan las medidas invariantes de los elementos estructurales.

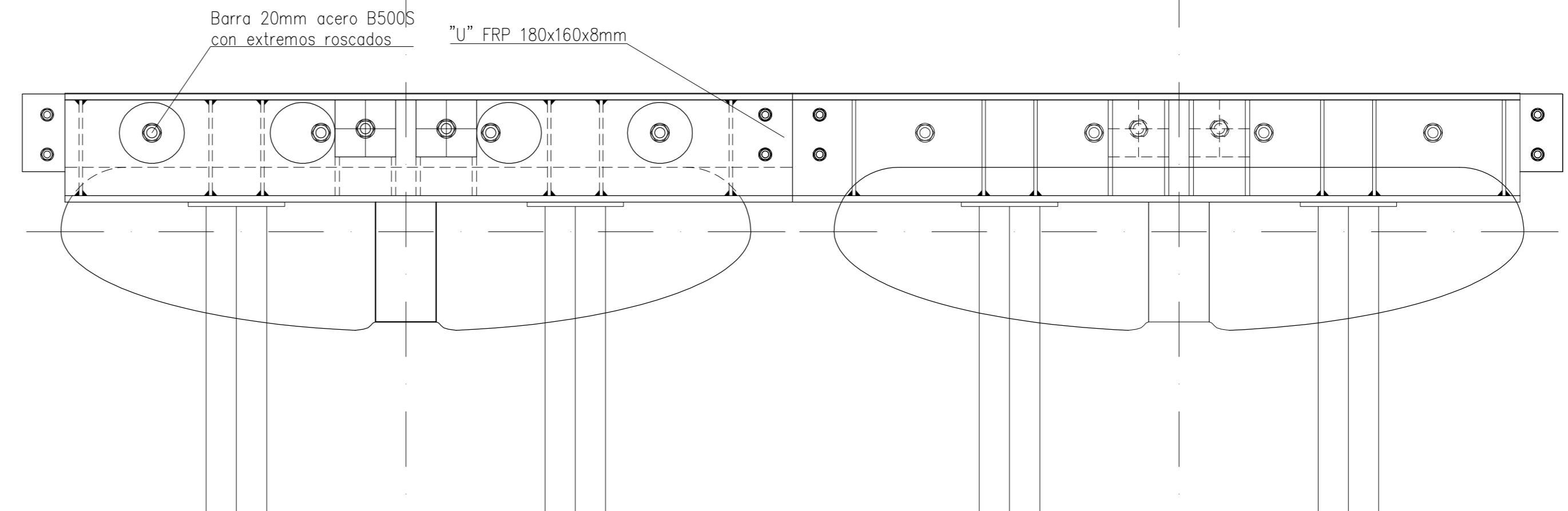
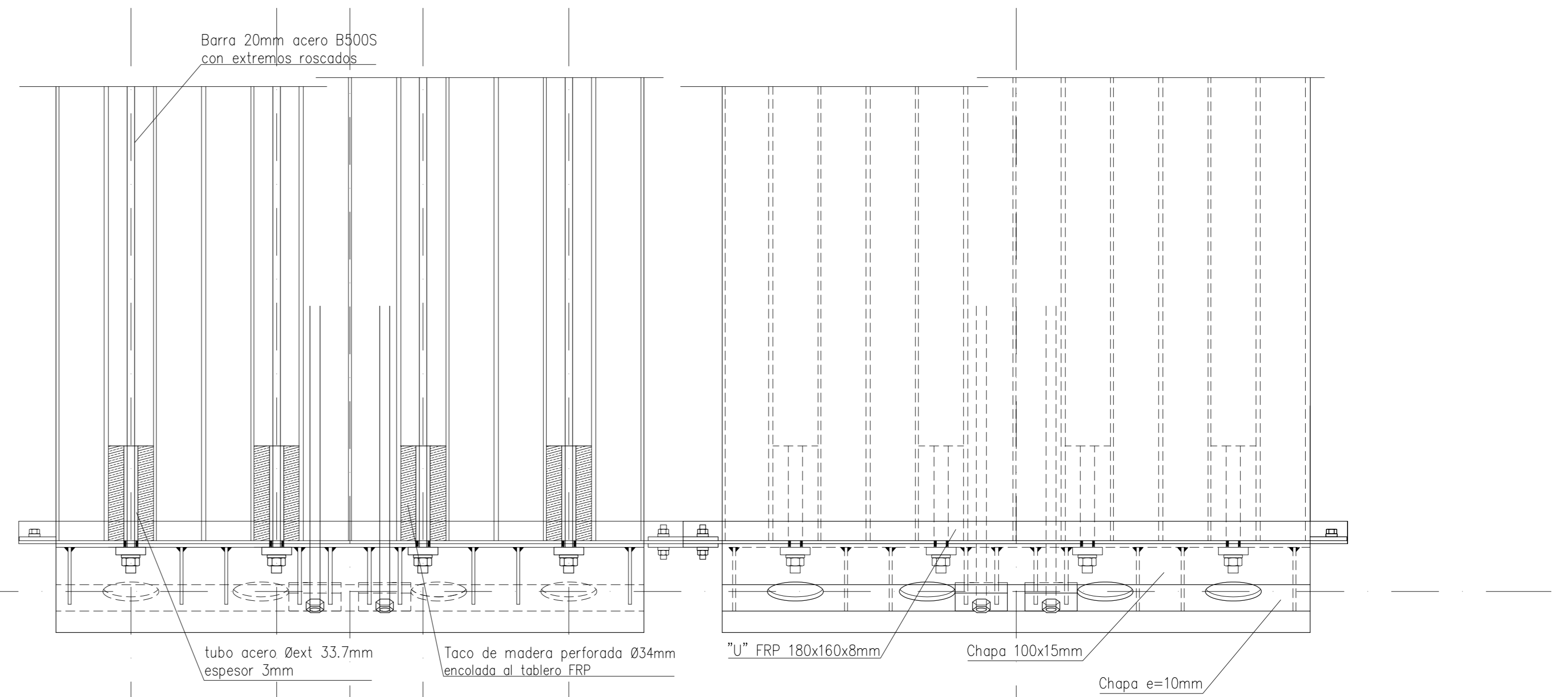
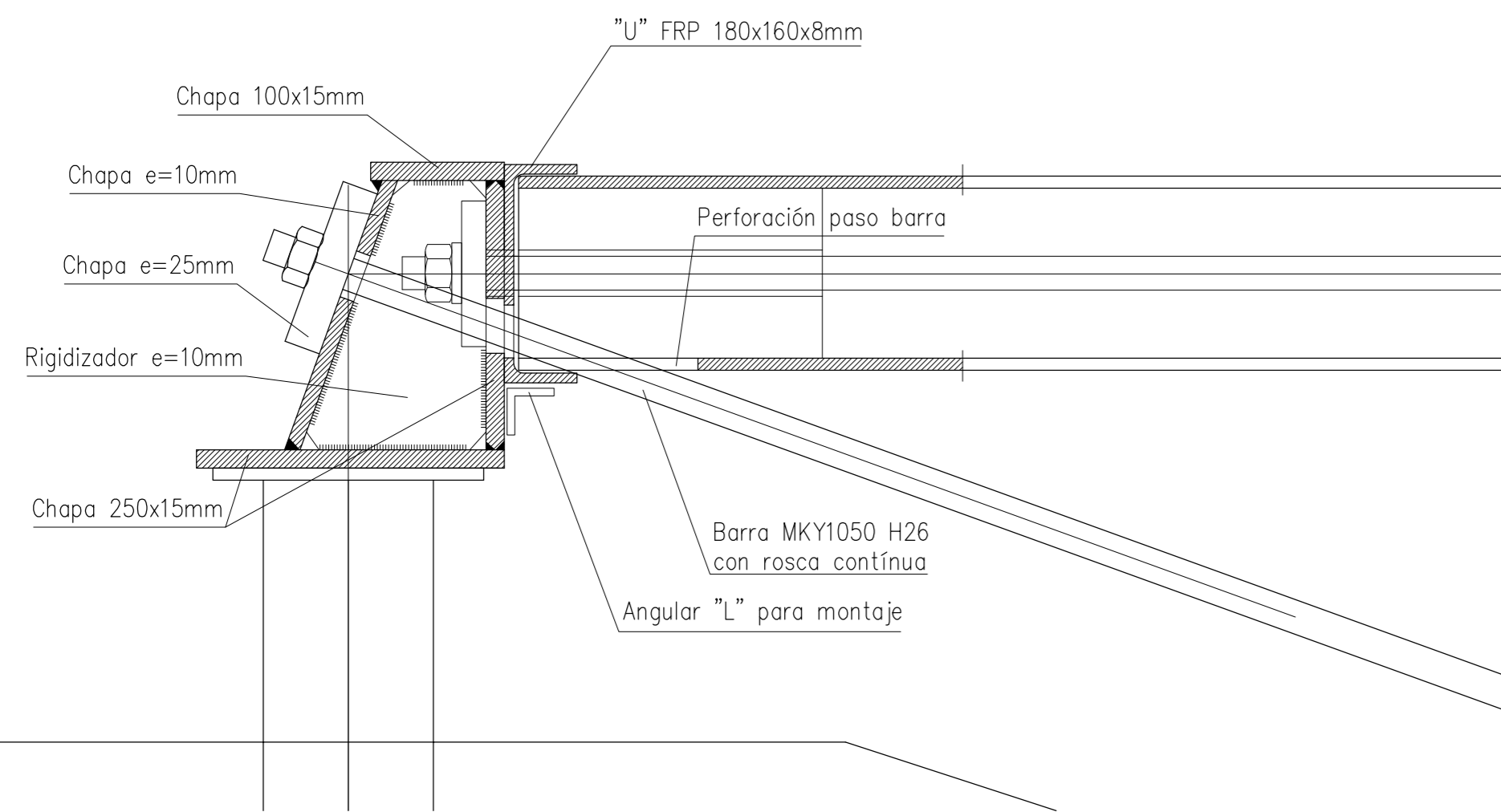
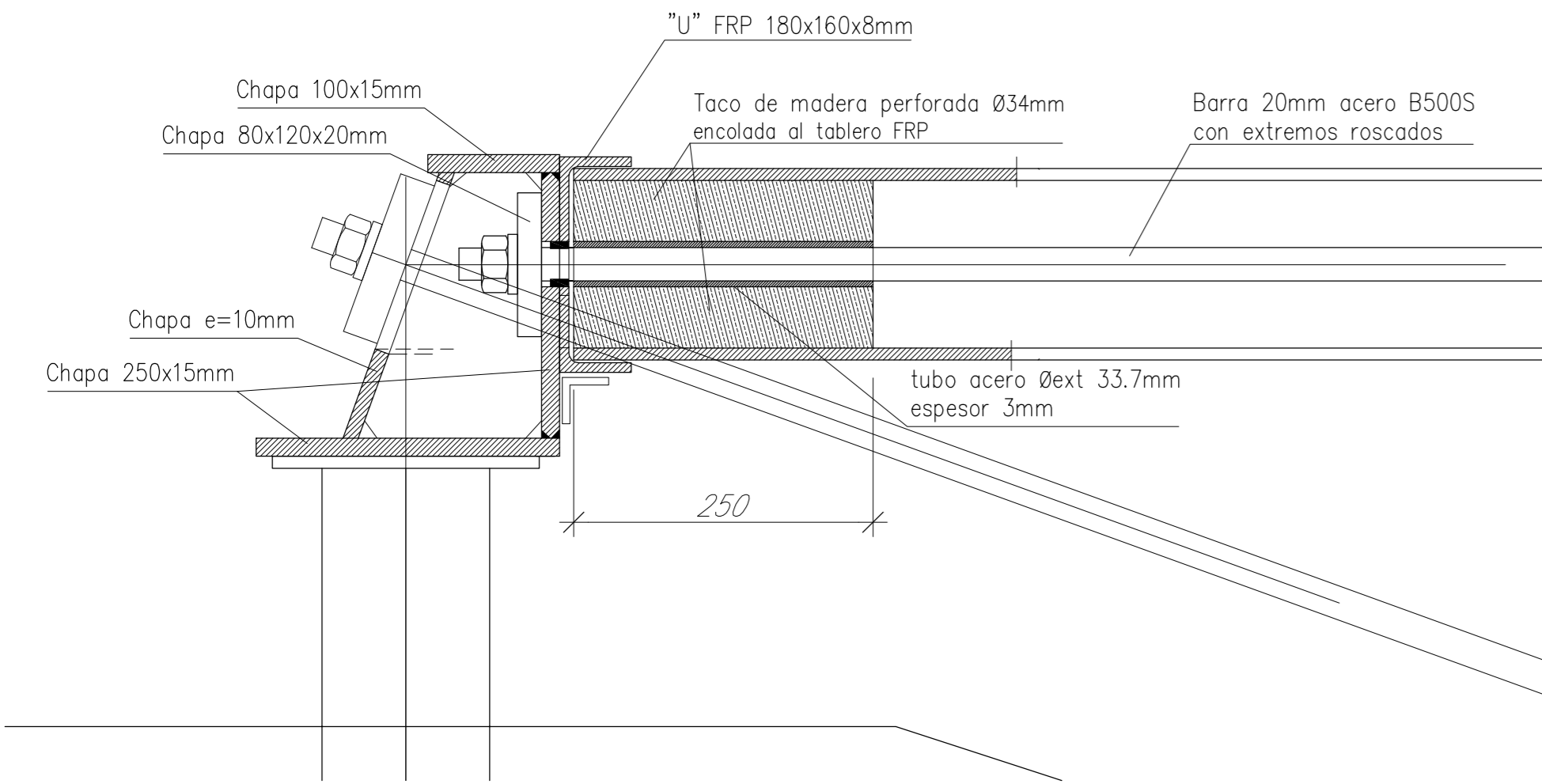
LISTADO DE REVISIONES			
Nº	FECHA	COMENTARIOS	CTR
1	26/10/2012		B
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			

DOCUMENTOS RELACIONADOS	
Nº	Nombre de los documentos
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	

## AIR-BRIDGE - PLAN 2: DETAILED VIEW OF THE AIR-BRIDGE ANCHORING SYSTEM

### DETALLE 1

DETALLE PIEZA DE CONEXIÓN TABLERO - ESLINGA  
 E 1:5





**Boma Inpasa** 2013  
 Telf +34 934 144 762  
 www.bomainpasa.com  
 Proyecto Puente Hinchable

**xD03**

Asociación de Consultores Estructurales  
 Está prohibida la reproducción total o parcial de este documento por cualquier medio, sin el consentimiento expreso de sus propietarios.

Consultar en los planos de arquitectura y replantear la posición y/o forma de los elementos representados en este documento. En este plano sólo se acotan las medidas invariantes de los elementos estructurales.

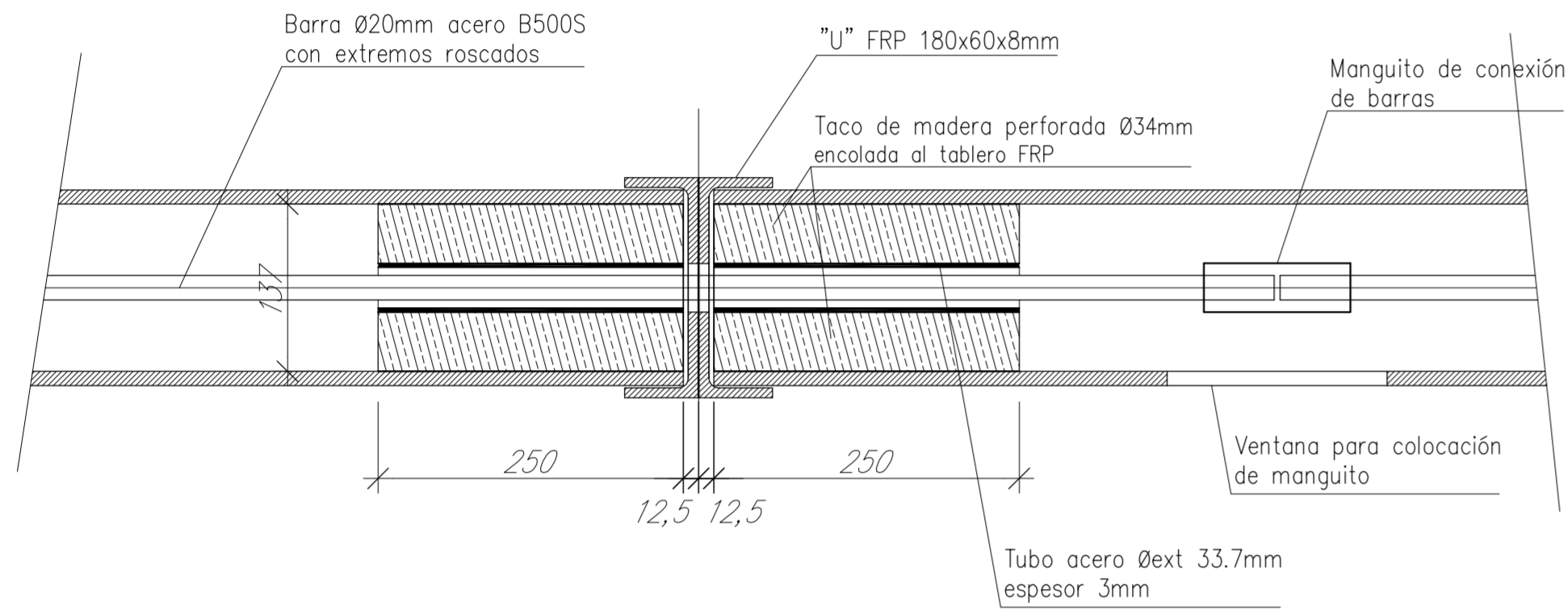
LISTADO DE REVISIONES			
Nº	FECHA	COMENTARIOS	CTR
1	26/10/2012		B
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			

DOCUMENTOS RELACIONADOS	
Nº	Nombre de los documentos
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	

### AIR-BRIDGE - PLAN 3: DETAILED VIEW OF THE AIR-BRIDGE CONNECTIONS

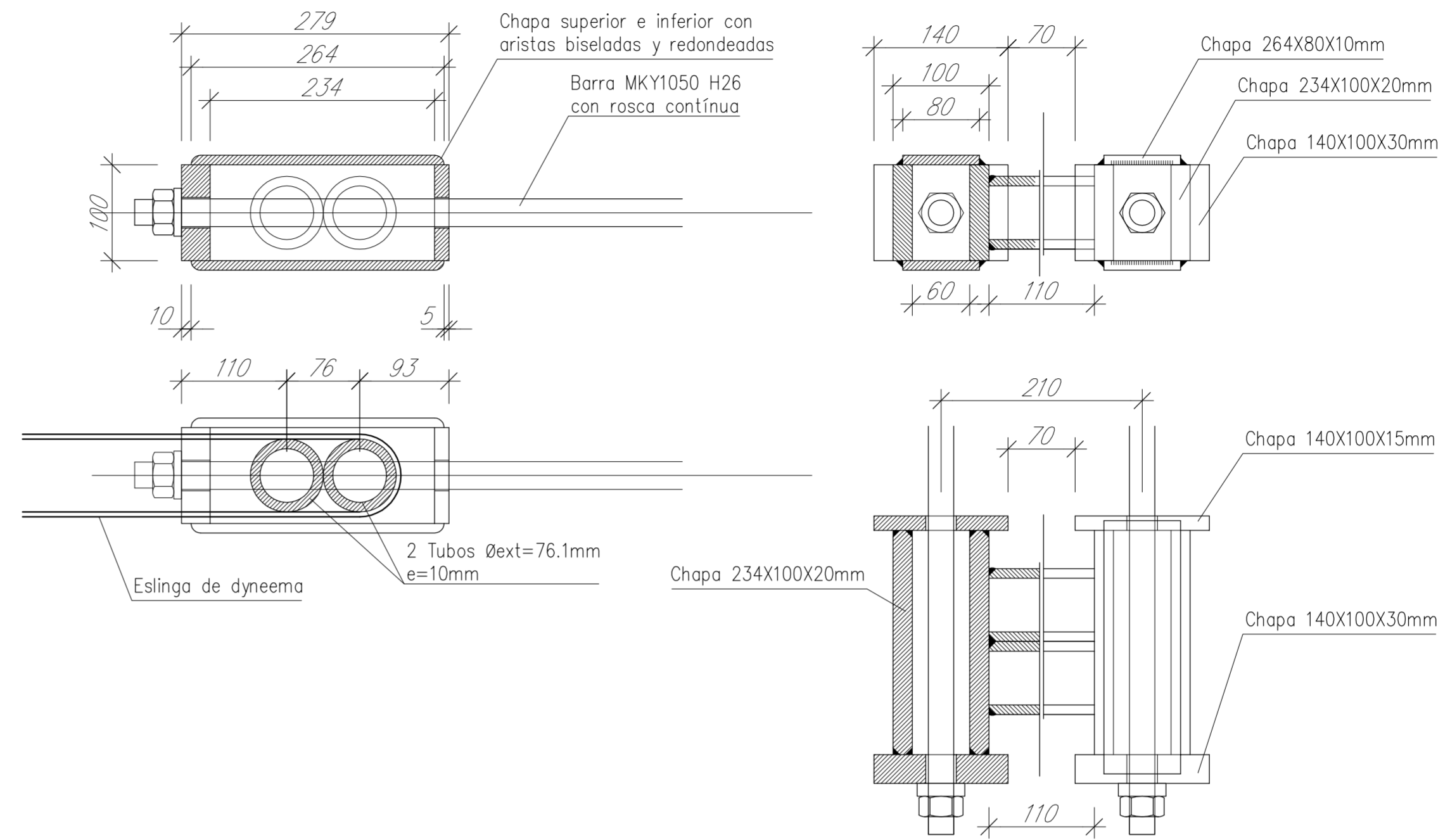
DETALLE 2

DETALLE CONEXIÓN ENTRE PANELES  
 E 1:10



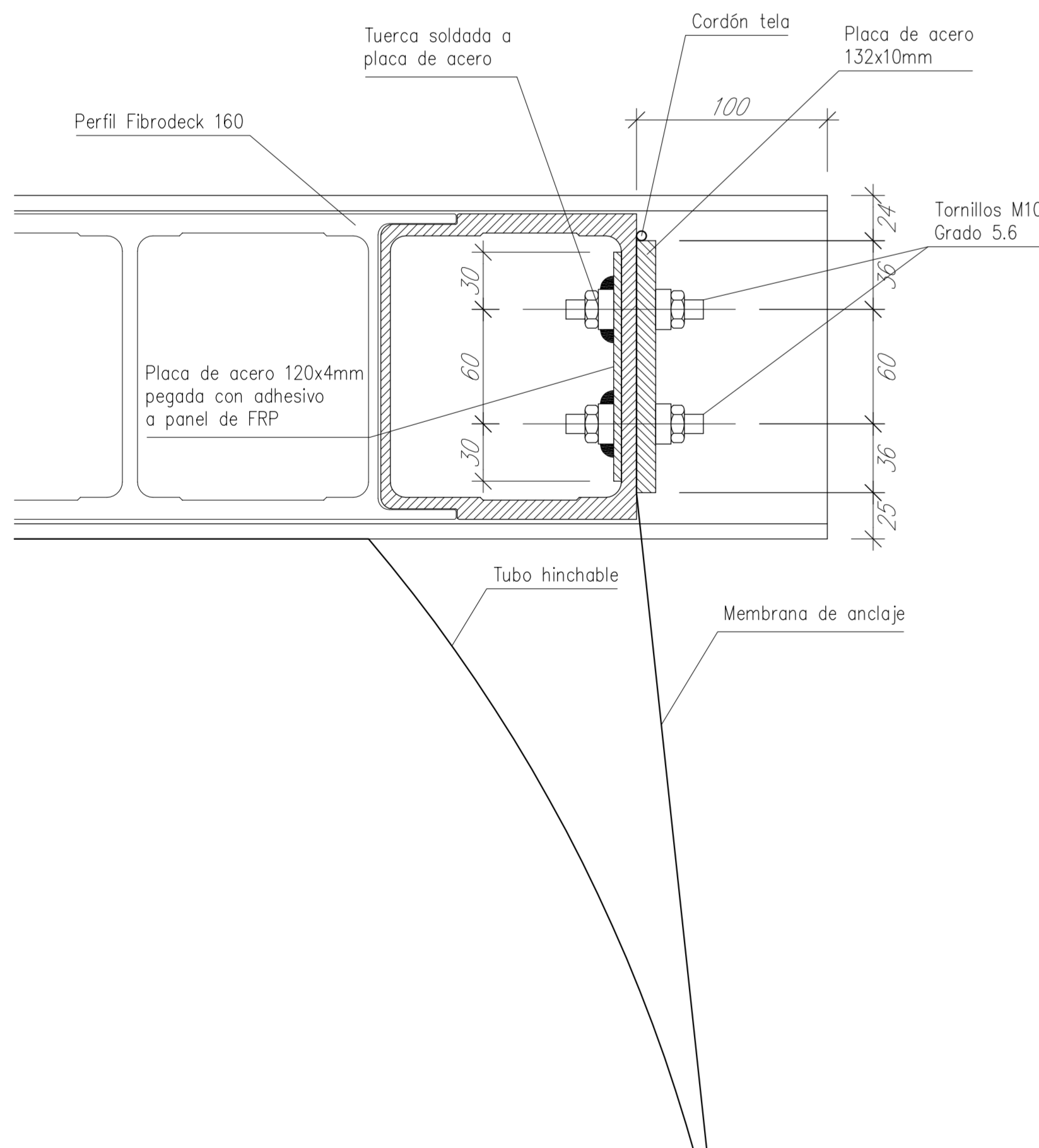
DETALLE 3

DETALLE PIEZA DE CONEXIÓN ESLINGA  
 E 1:10

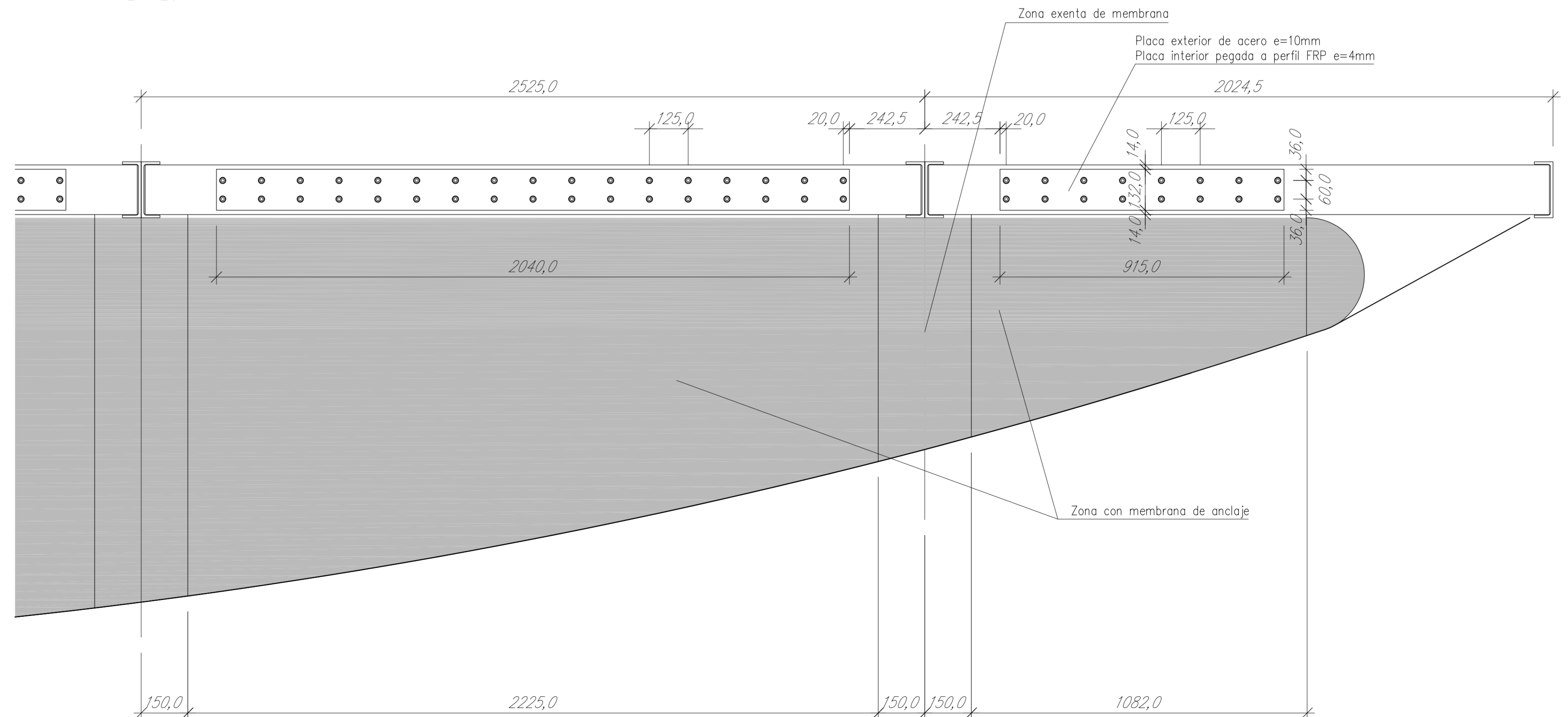


DETALLE 4

DETALLE CONEXIÓN ENTRE PANELES  
 E 1:5



DETALLE CONEXIÓN MEMBRANA HINCHABLE  
 E 1:20



**Boma Inpasa** 2013  
 Telf +34 934 144 762  
 www.bomainpasa.com

Proyecto Puente Hinchable

**xD04**

Asociación de Consultores Estructurales de España

Está prohibida la reproducción total o parcial de este documento por cualquier medio, sin el consentimiento expreso de sus propietarios.

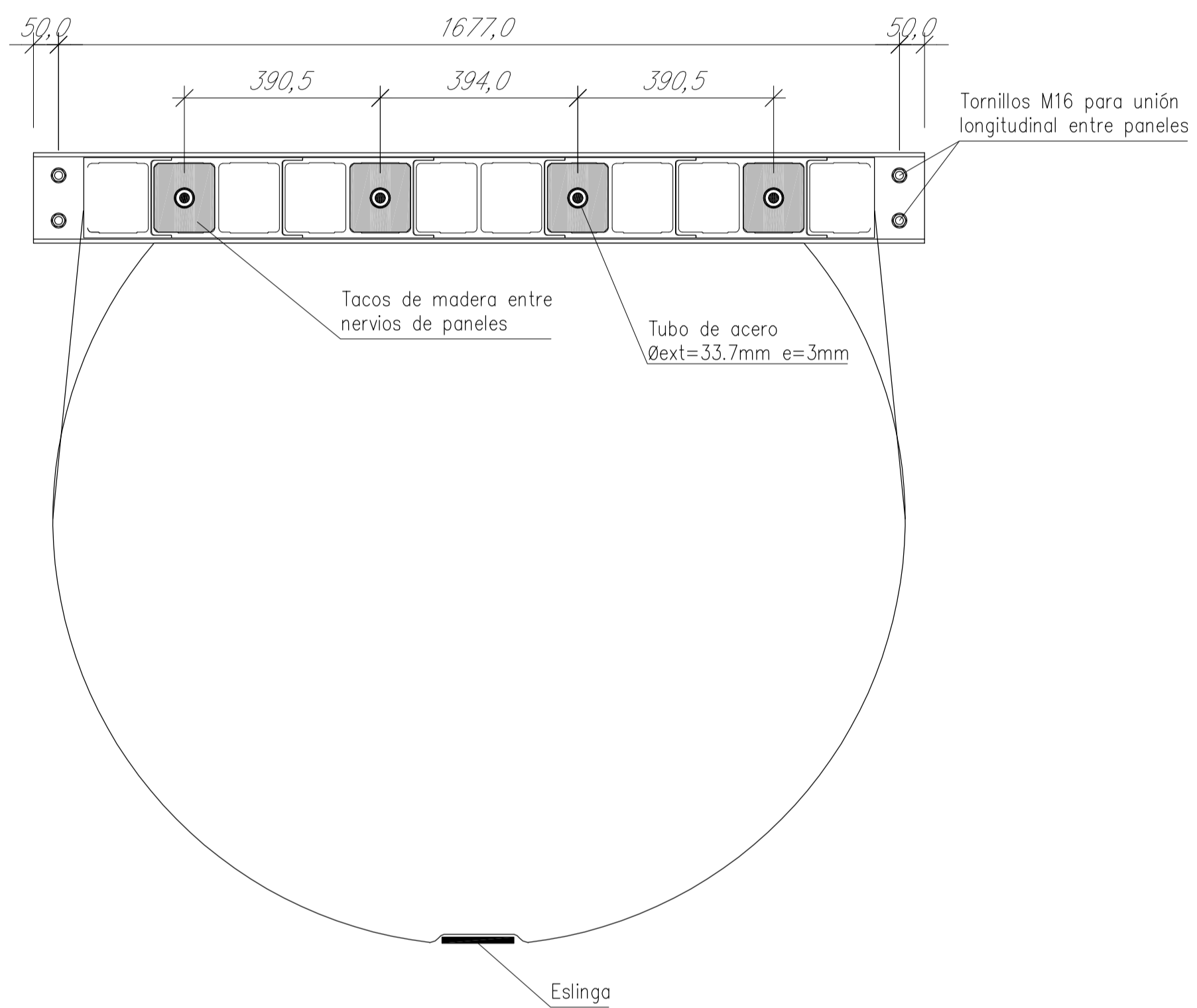
Consultar en los planos de arquitectura y reglamento la posición y/o forma de los elementos representados en este documento. En este plano sólo se acotan las medidas invariantes de los elementos estructurales.

LISTADO DE REVISIONES			
Nº	FECHA	COMENTARIOS	CTR
1	26/10/2012		B
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			

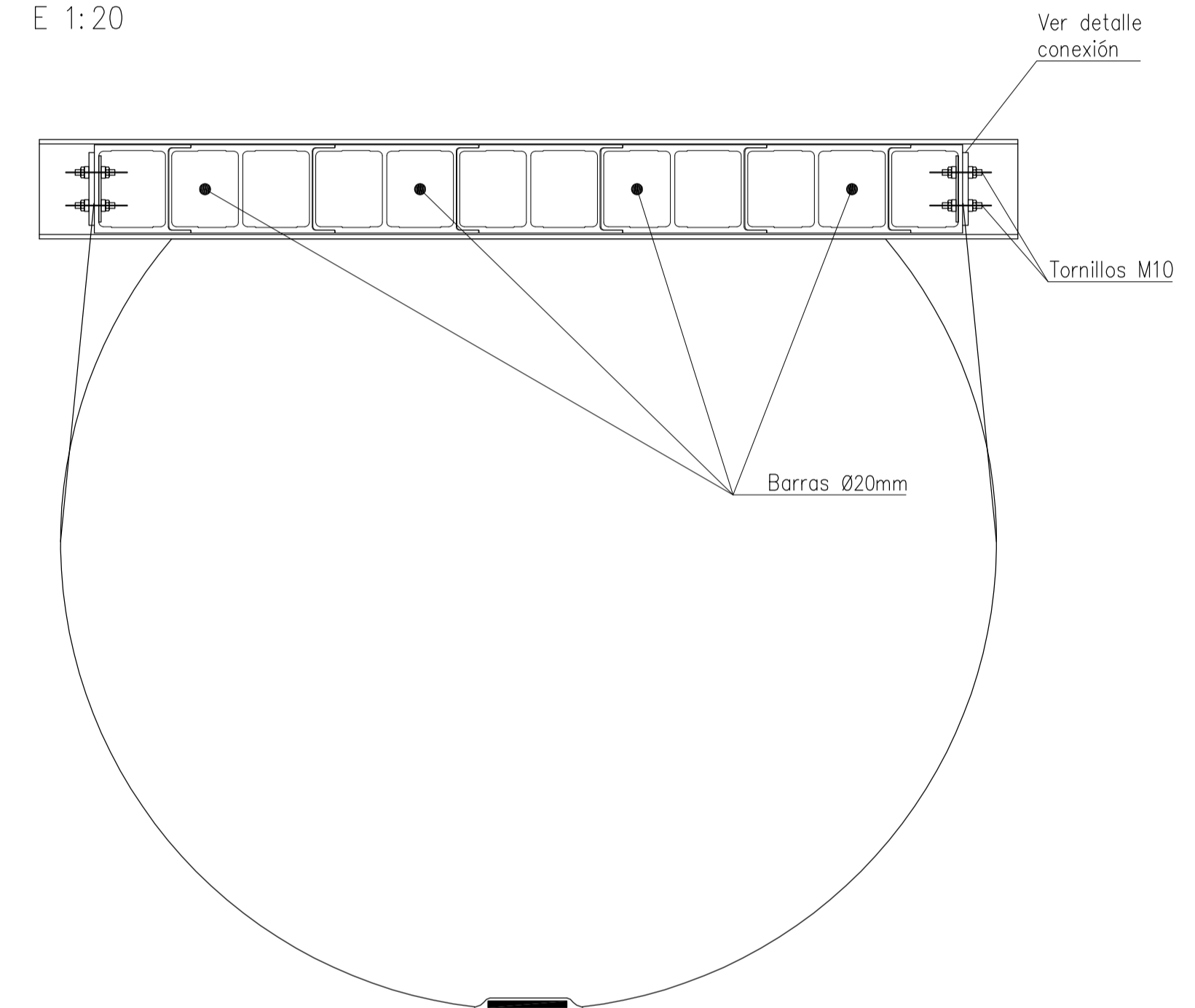
DOCUMENTOS RELACIONADOS	
Nº	Nombre de los documentos
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	

### AIR-BRIDGE - PLAN 4: SECTION VIEW OF THE AIR-BEAM

SECCIÓN A-A  
E 1:20



SECCIÓN B-B  
E 1:20



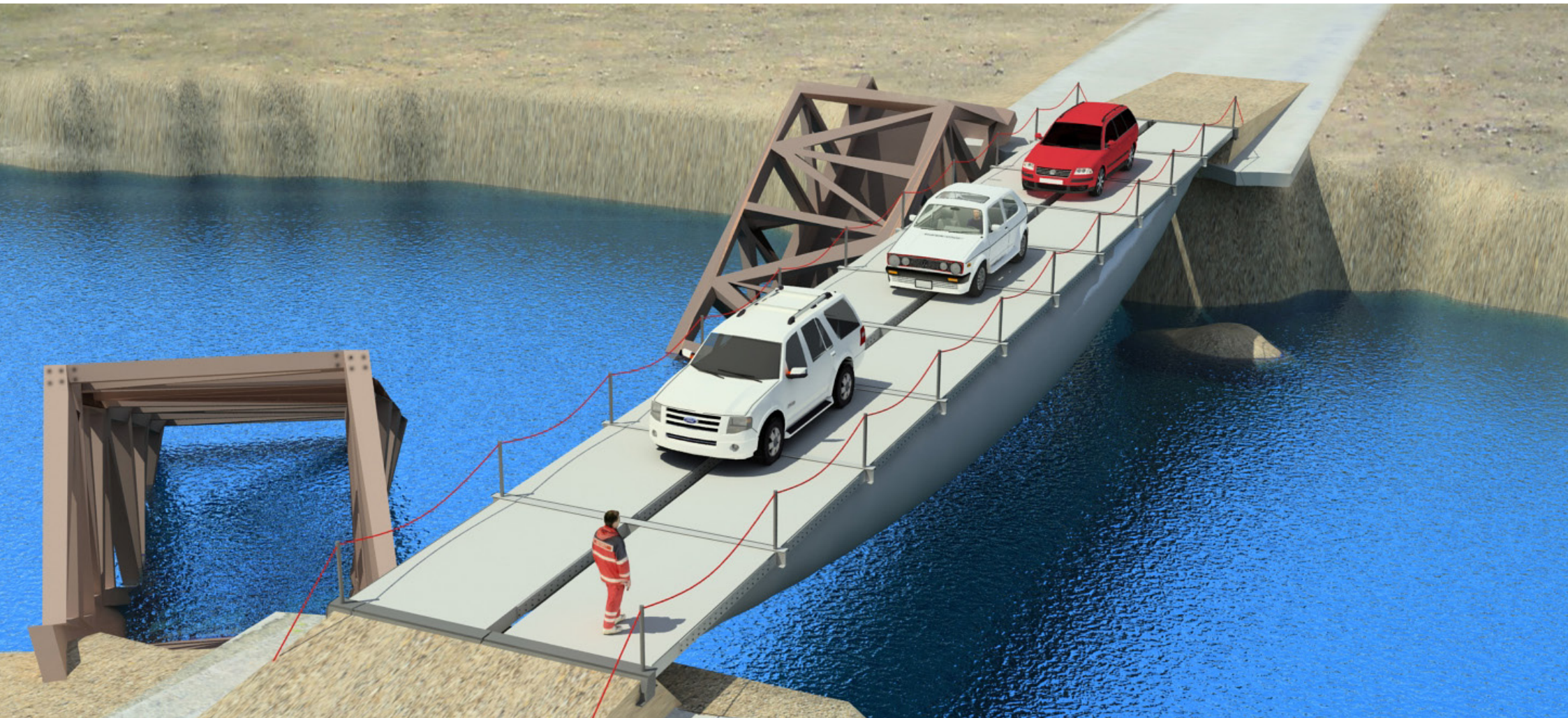
Apéndice D

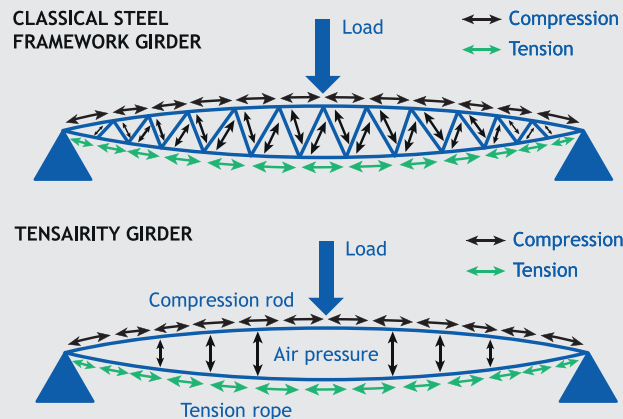
Folleto Air-Bridge

# AIR-BRIDGE

Programa PROVA'T (2012-13)

Development, validation and transfer to market of a prototype of Air-Bridge for surface transport vehicles





### CAT

Pont inflable ultralleuger de desplegament ràpid per al transport en superfície de vehicles, que utilitza com a element bàsic estructural per a sostenir càrregues bigues inflades amb aire a baixa pressió.

**TENSAIRITY = TENSION + AIR + INTEGRITY**

EL SISTEMA MÉS LLEUGER DEL MERCAT!

### APLICACIÓ

Tasques d'evacuació en emergències i restabliment de comunicacions en zones devastades per desastres naturals

### EN

Inflatable ultra-lightweight fast-deployable bridge for surface transport vehicles, which utilizes low-pressure air-filled beams as the primary load-bearing structural spanning members.

**TENSAIRITY = TENSION + AIR + INTEGRITY**

THE LIGHTEST SYSTEM IN THE MARKET!

### APPLICATION

Facilitate emergency evacuation tasks and communication reestablishment of devastated areas due to natural disasters.

### ESP

Puente hinchable ultraligero de despliegue rápido para el transporte en superficie de vehículos, que utiliza como elemento básico estructural para aguantar carga vigas hinchadas con aire a baja presión.

**TENSAIRITY = TENSION + AIR + INTEGRITY**

¡EL SISTEMA MÁS LIGERO DEL MERCADO!

### APLICACIÓN

Tareas de evacuación en emergencias y restablecimiento de comunicaciones en áreas devastadas por desastres naturales

<b>Dimensions</b>	Longitud 14 m Amplada 3,5 m	Similar a altres alternatives
<b>Pressió inflat</b>	175 mbar	12 cops menys pressió que una roda d'un vehicle
<b>Pes</b>	5 tn	Fins a 7 cops menor que alternatives
<b>Pes/m2</b>	100 kg/m <sup>2</sup>	Fins a 7 cops menor que alternatives
<b>Càrrega vehicles</b>	30 tn	Proporció càrrega/pes de 7 a 1
<b>Volum empaquetat</b>	12 m <sup>3</sup>	Fins a 5 cops menor que alternatives
<b>Volum desplegat</b>	78 m <sup>3</sup>	Proporció respecte al volum empaquetat de 6,5 a 1
<b>Mida major element</b>	2,00 x 1,80 x 0,20 m <sup>3</sup>	Pes 185 kg
<b>Esforç de muntatge</b>	8 operaris / 8 h	Fins a 5 cops menor que alternatives
<b>Ús de maquinària pesada</b>	No requerida	Necessari sempre en altres alternatives

<b>Dimensions</b>	Length 14 m Width 3,5 m	Similar to other alternatives
<b>Inflation pressure</b>	175 mbar	12 times less pressure than a vehicle wheel
<b>Weight</b>	5 tn	Up to 7 times lighter than alternatives
<b>Weight/m2</b>	100 kg/m <sup>2</sup>	Up to 7 times lighter than alternatives
<b>Vehicle load</b>	30 tn	Ratio load/weight of 7 to 1
<b>Storage volume</b>	12 m <sup>3</sup>	Up to 5 times smaller than alternatives
<b>Deployed volume</b>	78 m <sup>3</sup>	Ratio deployed/storage volume of 6,5 to 1
<b>Larger element</b>	2,00 x 1,80 x 0,20 m <sup>3</sup>	Weight 185 kg
<b>Set-up effort</b>	8 workers / 8 h	Up to 5 times smaller than alternatives
<b>Use of heavy machinery</b>	Not required	Always required in other alternatives

<b>Dimensiones</b>	Longitud 14 m Anchura 3,5 m	Similar a otras alternativas
<b>Presión hinchado</b>	175 mbar	12 veces menos presión que una rueda de un vehículo
<b>Peso</b>	5 tn	Hasta 7 veces menor que alternativas
<b>Peso/m2</b>	100 kg/m <sup>2</sup>	Hasta 7 veces menor que alternativas
<b>Carga vehículos</b>	30 tn	Proporción carga/peso de 7 a 1
<b>Volumen empaquetado</b>	12 m <sup>3</sup>	Hasta 5 veces menor que alternativas
<b>Volumen desplegado</b>	78 m <sup>3</sup>	Proporción respecto volumen empaquetado de 6,5 a 1
<b>Tamaño mayor elemento</b>	2,00 x 1,80 x 0,20 m <sup>3</sup>	Peso 185 kg
<b>Esfuerzo de montaje</b>	8 operarios / 8 h	Hasta 5 veces menor que alternativas
<b>Uso de maquinaria pesada</b>	No requerido	Necesario siempre en otras alternativas

## Apéndice E

### Artículos y recortes de prensa



# Recerca que busca un lloc al mercat

En un entorn competitiu i d'intens progrés tecnològic, cada vegada són més freqüents les recerques que busquen l'aplicació al teixit productiu i s'intensifiquen les relacions entre el laboratori i les empreses per minimitzar el temps d'arribada al mercat. És el cas de tres grans projectes de centres vinculats a la UPC els resultats dels quals auguren un gran impacte: el disseny d'un innovador pont inflable, un monitor d'hemodinàmica i un sistema de mesura de vies.

**FOTO 1** El tipus de pont que dissenya el CIMNE, que podrà aguantar fins a 20 tones de pes, serà útil en situacions extremes.

Els projectes de l'Institut de Ciències Fotòniques (ICFO) busquen resultats d'impacte i alhora incrementar el potencial comercial de les tecnologies creades. L'equip liderat per Turgut Durduran treballa juntament amb l'investigador Udo Weigel per dissenyar un monitor òptic transcranial no invasiu. L'objectiu d'aquest aparell és mesurar l'hemodinàmica cerebral dels pacients, amb paràmetres que facilitaran el diagnòstic mèdic precoç com ara el flux sanguini microvascular, l'oxigenació o el volum sanguini. També servirà per diagnosticar el contingut aquós del cervell dels nadons en el cas dels naixements prematurs. Actualment ja hi ha diverses tècniques per conèixer aquests paràmetres, però l'objectiu de Durduran és aglutinar-les totes en un mateix aparell de dimensions reduïdes que es pugui transportar còmodament en les instal·lacions sanitàries. Davant d'un ictus, per exemple, el temps d'actuació és clau per determinar

la gravetat dels danys que se'n poden derivar per al pacient, que en molts casos poden ser irreversibles. Un aparell d'aquestes característiques, per tant, tindrà un alt impacte en la qualitat de vida

## L'aparell mesurarà l'hemodinàmica cerebral dels pacients

dels pacients de cures neurointensives. El prototip està basat en una nova tecnologia que es desenvolupa a l'ICFO, l'espectroscòpia de correlació difusa (DCS), que bàsicament estudia la quantitat i les fluctuacions de fotons que travessen els òrgans, en aquest cas, el cervell. A aquesta tècnica s'hi sumaran coneixements de l'espectroscòpia òptica difusa de domini de freqüència (FDDOS) per aconseguir totes les dades d'una forma no invasiva.

"Tot aquest progrés —assegura l'investigador de l'ICFO— no té cap sentit si, a l'hora d'aplicar-lo, els metges no saben explotar-ne totes les possibilitats o si troben l'aparell poc pràctic en casos d'emergències mèdiques." Per aquest motiu, Durduran està treballant braç a braç amb l'equip mèdic de la Unitat de Neurologia de l'Hospital de la Santa Creu i de Sant Pau de Barcelona. "L'ús d'un llenguatge comú és imprescindible perquè professionals de formació tan diversa com la fotònica i l'oncologia puguem convergir el nostre coneixement en un resultat tangible", sentència Durduran.

## Comercialització

Els primers resultats es presentaran abans del 2014. Això no obstant, fins que no s'ajusti a les homologacions sanitàries i l'ètica professional, incloent-hi la interacció amb el pacient i la confidencialitat de les dades emmagatzemades, l'aparell de Durduran no es podrà



## Oñate: "El baix pes i la temporalitat són factors clau per comercialitzar els ponts inflables"

llençar al mercat. Com a part del projecte, i a través d'una intensa col·laboració amb la unitat de transferència tecnològica de l'IFCO, l'equip estudiarà diferents opcions de comercialització, com ara crear una companyia pròpia o vendre el producte final a una empresa ja existent. Qui té molt clar quin és el pla comercial del seu projecte és Eugenio Oñate. El director del Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE) lidera un projecte per dissenyar un sistema de ponts inflables que puguin ser útils en casos d'emergència. Les empreses que s'encarregaran d'explorar-ho seran CIMNE Tecnologia, SA i Build Air, SA, totes dues empreses *spin off* sorgides d'aquest centre de recerca. Aquesta última, a més, també s'ocuparà de la fabricació del prototip.

El model de pont inflable que es vol validar es compon de dues bigues inflables, de 15 metres de llargada, sobre les quals se situarà un tauler que podrà aguantar fins a 20 tones de pes. L'èxit depèn de la resistència a la tracció i a la compressió dels elements que l'integren: una tira de material compost, dues varetes metàl·liques o la mateixa biga inflable, feta a partir de poliamides resistents al

foc i a perforacions d'intensitat mitjana. La idea parteix de Tensairity, una patent de l'empresa suïssa amb la qual Build Air, SA col·labora i que el CIMNE intentarà adaptar a unes necessitats molt més específiques. Per fer-ho, els científics treballaran en col·laboració amb el Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metal·lúrgica i el Departament d'Enginyeria de la Construcció de la UPC. La lleugeresa de tots aquests materials, juntament amb la facilitat de desplegament de l'estructura, fan que aquest tipus de pont que dissenya el CIMNE pugui ser útil en situacions extremes causades per catàstrofes naturals, com ara terratrèmols o inundacions.

Aquestes passarel·les temporals facilitaran les tasques de rescat dels diferents agents d'emergències, protecció civil o unitats de logística militar, que són els principals clients potencials d'aquestes estructures. Si bé Oñate reconeix que el producte resultant serà una mica més car que un pont convencional, alguns trets distintius com ara un pes inferior o la temporalitat seran factors clau per comercialitzar-lo.

El muntatge dels ponts està força definit i, a més, seran plegables i transportables, de manera que, una vegada plegats, es podrien llançar fins i tot subjectats a un paracaigudes. "Un dels molts aspectes que hem de tenir en compte és l'autonomia d'aquestes estructures. Estem estudiant incorporar l'ús d'energia fotovoltaica per alimentar un motor de dimensions reduïdes que controla el flux d'aire necessari per a l'inflament i el manteniment de l'estructura", explica Oñate.



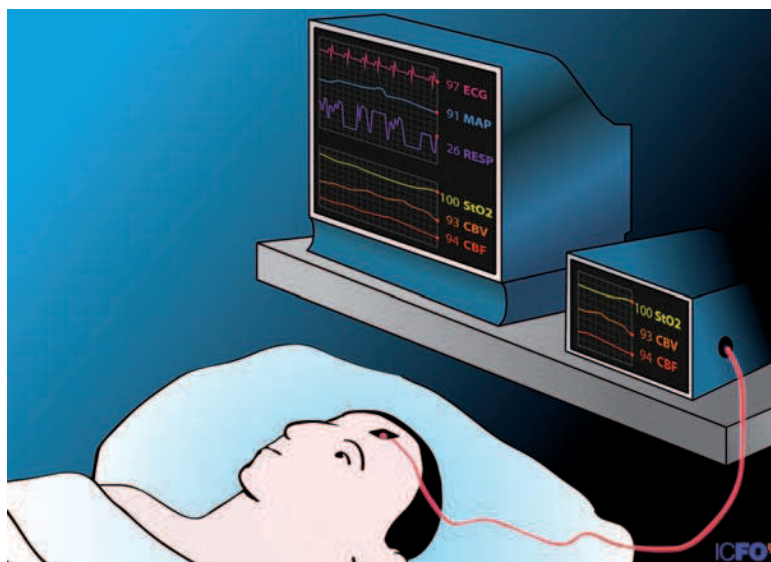
## Durduran: "El monitor òptic millorarà la vida dels pacients de cures neurointensives"

Fins ara s'ha comprovat la viabilitat del projecte amb ponts de tres metres de llargada i es preveu que el prototip final estarà gairebé enllestit abans de l'estiu. Oñate reconeix que en la recerca d'estructures lleugeres hi ha molta expectació però poques realitats i per això creu que les subvencions a la recerca poden ser una bona manera de potenciar-ne la sortida industrial.

**FOTO 2** Eugenio Oñate, director del Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria.

**FOTO 3** Turgut Durduran, investigador de l'Institut de Ciències Fotòniques.

**FOTO 4** El monitor òptic no invasiu oferirà als metges una visió de la fisiologia del cervell, així com la pressió sanguínia i el ritme cardíac.



**NOM** Eugenio Oñate  
**E-MAIL** onate@cimne.upc.edu  
**WEB** www.cimne.com  
**TEL.** 93 205 70 16

**NOM** Ismael Colomina  
**E-MAIL** ismael.colomina@ideg.es  
**WEB** www.ideg.es  
**TEL.** 93 556 92 80

**NOM** Turgut Durduran  
**E-MAIL** turgut.durduran@ifco.es  
**WEB** www.ifco.eu  
**TEL.** 93 553 41 51

**CONTACTES**



## DE LA CIENCIA AL MERCADO

INGENIERÍA

# Un puente con una base muy científica

Buildair, una empresa surgida del CIMNE, desarrolla una estructura inflable, ligera y de fácil montaje



nuestro trabajo fueron tan positivos que acabamos construyendo el hangar hinchable más grande del mundo, instalado en Getafe para Cassidian, una empresa del grupo Airbus”, describe el director de Cimne.

“En uno de los congresos sobre estructuras de tubos hinchables que organiza Cimne en colaboración con la Universidad de Stuttgart (Alemania) conocimos a un grupo de Suiza que proponía el uso de esta tecnología en la construcción de puentes y la idea nos pareció muy atractiva, pero no pudimos trabajar a fondo en este proyecto hasta que conseguimos el apoyo de la Generalitat a través del programa Prova’t”, indica Eugenio Oñate.

Con esta decisiva ayuda de la Generalitat, el proyecto se hizo realidad en pocos meses. El puente Air-Bridge, presentado públicamente el pasado mes de mayo, está formado por una superficie de material compuesto ligera y dos tubos inflables en forma de vigas situados en la parte inferior. “Los elementos clave del puente son el tablero de composite que hay en la parte superior y el cable o tira de alta resistencia que se encuentra en la parte inferior del tubo inflable”, señala el profesor Oñate. La combinación entre elementos de compresión, cables y



El puente Air-Bridge está formado por una superficie de material compuesto ligera y por dos tubos inflables en forma de vigas situados en la parte inferior

ARCHIVO

### Joaquim Elcacho

**A**ir-Bridge tiene vigas inflables pero no es un puente flotante. Es decir, la capacidad de esta estructura para resistir el paso de cargas de hasta 20 toneladas no se basa en la flotación sobre el agua de sus vigas llenas de aire sino en el diseño innovador del conjunto. El primer modelo de 14 metros de longitud del Air-Bridge ha sido presentado esta primavera en Barcelona y los responsables del proyecto piensan ya en un puente de 25 metros.

Air-Brigde es el invento más reciente de Buildair Ingeniería y Arquitectura SA, un *spin-off* del Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (Cimne) especializado en la aplicación de nuevas tecnologías de cálculo y diseño de estructuras inflables.

“Cimne empezó a trabajar hace unos 15 años en el diseño, ingeniería y fabricación de carpas hinchables a partir de su colaboración con EADS CASA Espacio en el proyecto europeo

Inflast, dedicado a la utilización de estructuras hinchables en la ingeniería civil, la aeronáutica y el espacio”, recuerda Eugenio Oñate, fundador, vicepresidente ejecutivo y director de Cimne, un centro nacido como consorcio entre la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) y la Generalitat de Catalunya.

Una de las primeras aplicaciones prácticas de esta línea de trabajo fue la construcción del Pabellón Hinchable Cimne, utilizado en el Congreso Europeo de Méto-

dos Informáticos en las Ciencias Aplicadas y la Ingeniería que se celebró el año 2000 en el World Trade Center de Barcelona. Los buenos resultados de este trabajo y las posibilidades de transferir los conocimientos de los expertos de Cimne al mundo empresarial animaron la constitución en el 2001 de Buildair. En la actualidad, además, Cimne es accionista de Buildair a través de Cimne Tecnología SA.

“Buildair se ha especializado en la aplicación de nuevas tec-

nologías de cálculo y diseño de estructuras inflables, consolidándose a escala internacional en la ingeniería neumática y construyendo desde carpas y pabellones inflables, hasta hangares de aeropuertos”, indica el profesor Oñate.

“Cuando recibimos el encargo de construir un hangar hinchable para el aeropuerto de Santiago de Chile nos enfrentamos al reto de desarrollar una tecnología con tubos inflables más grandes y resistentes, y los resultados de

tubos inflados a baja presión (175 milibares, diez veces menor que la presión de la rueda de un turismo) crean una estructura ligera pero muy estable y resistente.

Además, el puente destaca porque pesa solamente cuatro toneladas –menos de la mitad de lo que pesaría un puente metálico de prestaciones similares– resiste el paso de vehículos de hasta 20 toneladas y es de fácil montaje y transporte.

Para desarrollar el proyecto Air-Bridge, Cimne y Buildair tienen un acuerdo para la utilización de la tecnología neumática Tensairity patentada por la empresa suiza Airlight Ltd.

El trabajo que todavía falta por completar antes de poder llevar el nuevo puente al mercado incluye, “la mejora del proceso de despliegue del puente sobre el terreno, el transporte y la seguridad lateral del puente, que no tiene barandillas”, explica Eugenio Oñate. Para realizar este trabajo final, Buildair y Cimne contarán con la colaboración de especialistas en cálculo de estructuras de la Universidad de Nueva York y la cátedra de puentes de la Academia Militar de West Point en Estados Unidos.

Air-Bridge será una solución útil en múltiples circunstancias pero es evidente que podría convertirse en un puente muy efectivo en situación de emergencia. “Cuando se produce una catástrofe se necesitan no sólo alimentos sino también hábitculos e infraestructuras que se puedan montar fácilmente, y este tipo de puentes hinchables podrían incluirse en ese stock de elementos de construcción rápida a tener a disposición para hacer llegar rápidamente a cualquier parte del mundo”, propone Eugenio Oñate.

## Un proyecto con el aval del programa Prova't

El proyecto Air-Bridge, presentado por el Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (Cimne), fue una de las siete iniciativas aprobadas en la convocatoria de ayudas del programa Prova't, destinado a apoyo a la obtención de prototipos y a la valorización y transferencias de la investigación de los centros de investigación de Catalunya.

El programa Prova't fue convocado en el 2011 con un presupuesto máxi-

mo total de 1,5 millones de euros, cofinanciados por el programa europeo Feder.

Junto a Air-Bridge, fueron aceptados los proyectos del Institut de Gematologia de construcción de un sistema de revisión y evaluación de vías y otras estructuras lineales; del Institut d'Oncologia Vall d'Hebrón en colaboración con el Institut de Recerca Biomèdica de nueva estrategia terapéutica para el glioblastoma; del Institut Cata-

là de Nanotecnologia para una nueva generación de desinfectantes; del Institut d'Investigacions Biomèdiques August Pi i Sunyer para un dispositivo de imagen espectral para estudio de la esclerosis múltiple; del Institut de Ciències Fotòniques para un prototipo de monitor óptico transcranial; y del Centre de Regulació Genòmica para la mejora de los inhibidores en el tratamiento de la osteoporosis y el cáncer de mama.

[BTV](#)

## A LA CARTA

### CERCA UN PROGRAMA

Cerca paraula



Nom programa

### PROGRAMES A LA CARTA - CONNEXIÓ BARCELONA



En directe al 'Connexió':  
Un pont inflable al Born  
28.04.2014



El pont pesa 5 tones, i pot carregar-ne 20



Bcn de nit al 'Connexió':  
Loquillo  
02.05.2014



Reportatge al 'Connexió':  
Torneig Internacional de  
Polo  
02.05.2014



De visita al 'Connexió':  
Hotel Vincci Gala  
02.05.2014



Els fogons de la Lali al  
'Connexió': restaurant  
Pacifico y Sur  
02.05.2014





# MIGDIA

AMB RUTH JIMÉNEZ

Segueix-no

De dilluns a divendres, de 12 h a 14 h a 8tv

Inici

Participa

Videos

L'equip

Programes

Premsa

Cerca

Per trobar el  
escriu aquí le

Google™ Cer



Científics catalans creen el pont inflable més lleuger del món



Migdia

**Damià Puig**

Pot resultar molt útil! Cal seguir investigant!!!

## ARXIU

2014

Gener

2013

Febrer

Març

**Abril**

Maig



**els matins**

Els matins | T'agraden les plantes? | Vídeos | Facebook | Twitter | El programa | L'equip

28/04/2014 5.39

### Un pont inflable i desmuntable, al Born

directe BARCELONA

El pont inflable desplegable més lleuger del món, al Born

PUBLICITAT

Més vídeos del pro

[3.24.cat](#)

EL PORTAL INFORMATIU DE  **CATALUNYA**   
Diumenge 4/5/2014 TELEVISIÓ DE CATALUNYA RADIO catalunya informació

**324**

Actualitat | Esports | El temps

Catalunya | Societat | Política | Món | Economia | Tecnologia | Oci i cultura | Anàlisi

Vídeos

Avui destaquem



## Societat // Ciència i Tecnologia

Barcelona

# Uns investigadors catalans dissenyen un pont desplegable que pot resistir fins a 20 tones

Redacció - 28/04/2014 - 15.31h.





 M'agrada 61

 Tweet 24

 +1 0

rtve.es

Noticias TV Radio Deportes

A la Carta | Archivo | Programación | TD en 4' | Mundo | España | Autonomías | Economía | Cultura

Noticias > Ciencia y tecnología [Imprimir](#)

## El puente inflable más ligero del mundo aguanta 20 toneladas

- Mide 14 metros, pesa 5 toneladas y está hecho con elementos textiles
- Un tubo con presión de aire sustituye los elementos metálicos
- Tras una investigación de dos años, llegará al mercado en ocho meses
- Será útil y fácil de montar en situaciones de emergencia



Ampliar foto



**B** **BTV** notícies .cat

**BTV.cat**

SOCIETAT   MOBILITAT   POLÍTICA   ECONOMIA   TECNO

Et pot interessar   Entrevistes   Interactius   Enquestes   Infos Idiomes   Mapa

Districtes   Ciutat Vella   Eixample   Sants – Montjuïc   Les Corts   Sarrià – Sant Gervasi   Gràcia

**PORTADA > TECNOLOGIA**

## Un pont inflable i ultraresistent a les portes d'El Born Centre Cultural

 Tweet 3    Recomana-ho 2   





POR INVESTIGADORES CATALANES

## Desarrollado el puente inflable más ligero del mundo que resiste 20 toneladas

La construcción, diseñada para casos de inundaciones y emergencias, mide 14 metros y pesa 5.000 kilos

Vida | 28/04/2014 - 13:18h | Última actualización: 28/04/2014 - 13:44h



Investigadores catalanes desarrollan el puente inflable desplegable más ligero del mundo ACN / Gerard Aleña



● Notificar error ● Tengo más información



A A

**ENCUENTRO** [Charle ya con el escritor Enrique Vila-Matas, que presenta 'Kassel no invita a la lógica'.](#)

## El puente hinchable desplegable más ligero del mundo

- El CIMNE dispone de una empresa 100% participada para no dejar de concentrarse en lo que les hace avanzar: la ciencia básica



# ABC TECNOLOGÍA

[portada](#) [informática](#) [móviles](#) [electrónica](#) [redes](#) [videojuegos](#) [blogs](#) [cons](#)

TECNOLOGÍA

## Crean el puente hinchable más ligero

INNOVA+/EFE | Día 18/05/2014 - 08.38h

- Investigadores de Cataluña han desarrollado un puente a base de textiles capaz de salvar 14 metros, soportar 20 toneladas, y de instalarse entre 8 personas.

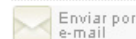
Un equipo de científicos del CIMNE y la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) han presentado el que, aseguran, es el puente hinchable más ligero del mundo. Según Javier Marcipar, fundador de Build Air – una compañía especializada en infraestructuras inflables–, su último desarrollo pesa cinco toneladas –«tres veces menos que otro puente de similares características»–, es capaz de soportar cuatro veces más – veinte toneladas–, está fabricado a partir de textiles y es permite salvar distancias de 14 metros.

La estructura ha sido construida gracias a la eliminación de «todo lo que sea acero de un puente y que se pueda reemplazar por elementos textiles, como un tubo inflado con presión de aire que sustituye los

► [COMENTARIOS](#)

► [IMPRIMIR](#)

COMPARTIR



EN VÍDEO

► [Toda la actualidad de](#)

INGENIERÍA PUENTE

Twitter 27 Me gusta 33 g+1

## Ingenieros españoles desarrollan un puente inflable que resiste veinte toneladas

Investigadores del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), un consorcio entre la Generalitat y la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), han desarrollado un puente inflable que puede cargar hasta 20 toneladas y que se despliega en sólo 8 horas, cinco veces más rápido que infraestructuras similares.

EFEFUTURO BARCELONA | DOMINGO 27.04.2014

**AIR-BRIDGE: Development, validation and transfer to market of a prototype of AIR-BRIDGE for surface transport vehicles**



## Matí a 4 bandes-RNE

rtve.es
Otras secciones en RTVE.es

A la carta
Regístrate | Entrar con su cuenta

Radio
Ràdio 4
Matí a 4 bandes
Matí a 4 Bandes - Avui amb el Francis
Buscar en A la Carta

TVE
TV en directo
Canales
Series
Informativos
Documentales
Programas
RNE
Radio en directo
Cadenas
Música
Programas

**★ Programas favoritos**

Puede añadir aquí sus programas favoritos, usando el botón ★

**+ Ver/Escuchar luego**

Puede añadir aquí vídeos y audios para reproducir más tarde, usando el botón +

**🕒 Histórico**

- Matí a 4 Band...
- Matí a 4 Band...
- Wonderland - ...
- Matí a 4 Band...
- Tertulia Cien...

### Matí a 4 bandes

De dilluns a divendres a les 08.00 hores. De dimarts a divendres a les 00.00 hores (Repetició)

ràdio 4

**Matí a 4 Bandes - Avui amb el Francis Casado 'Build Air'. L'Andreu Martín ens presenta 3 Mossos que escriuen** 28 maig 2014

Avui amb el Francis Casado hem conegut l'empresa d'infraestructures inflables. Carles Estruch, enginyer. Creador del pont inflable més gran del món. Responsable d'I+D de l'empresa 'Build Air' i Iñaki Araúzo, cap de Fàbrica i muntatges de 'Build Air'. L'Andreu Martín ens presenta 3 Mossos que escriuen. Són la MIRIAM-NOEMÍ BAÑOS, del Servei d'Assessorament Jurídic de la Regió Policial Metropolitana Nord, guanyadora amb el relat "No marxis mai del meu costat"; JOAN CARLES ELVIRA, agent de l'Oficina de Relacions amb la Comunitat de la comissaria d'Igualada, en segon lloc amb el relat "36 anys" i en SEBASTIÀ RUBIA, inspector de la Unitat Regional de Reacció i Dispositius de la Regió Policial Metropolitana Nord,

... veure més sobre "Matí a 4 Bandes - Avui amb el Francis Casado 'Build Air'. L'Andreu Martín ens presenta 3 Mossos que escriuen"

▶ Reproduir 00:00 / 52:41

Subscriu-me a Podcast

Descarregar audio:  
Botó dret > Guardar com

+ A la meva llista
★ Als meus favorits
↕ Envieu
◀ Embeber
Recomendar
0
Twttear
0

## Catalunya Ràdio (Catalunya Migdia)

Inicia sessió Registat

En directe Àudios Vídeos Programes Programació Participa

INICI > ÀUDIOS > CATALUNYA MIGDIA > EL PROJECTE D'UN PONT INFLABLE

### El projecte d'un pont inflable

28/04/2014 Catalunya migdia

El pont inflable, desenvolupat per investigadors catalans de la Universitat Politècnica de Catalunya, pot resistir més de vint tones i es munta només en vuit hores. Pot tenir múltiples aplicacions i, de moment, ja s'hi ha interessat l'acadèmia militar de West Point, als Estats Units.



- Afegeix-lo als Meus Àudios
- Descarrega-te'l
- Escolta'l en pop-up
- Podcast del programa
- iTunes

M'agrada 0 Tweet 0 g+ 0 + 0

Enllaç  Embed

### Àudios a la carta



## [Gencat](#)



Generalitat de Catalunya  
gencat.cat

[Temes](#) | [Serveis](#) | [Contacte](#)

## Sala de premsa

### Continguts

- ▶ Notes de premsa
- ▶ **Convocatòries**
- ▶ Acords de govern
- ▶ Agenda
- ▼ Fotos i vídeos
  - Emissions en directe
  - Rodes de premsa
  - Galeries de fotos i vídeos

### Departaments

- ▶ Presidència
- ▶ Governació i Relacions Institucionals
- ▶ Economia i Coneixement
- ▶ Ensenyament
- ▶ Salut
- ▶ Interior
- ▶ Territori i Sostenibilitat
- ▶ Cultura
- ▶ Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural
- ▶ Benestar Social i Família
- ▶ Empresa i Ocupació
- ▶ Justícia
- ▶ Delegacions a Catalunya
- ▶ Delegació a Madrid

[Inici](#) > [Convocatòries](#) > El Secretari d'Universitats i Recerca ...

[Enllaçar](#) | [Enviar](#) | [Imprimir](#)



25-04-2014 11.26

### **El Secretari d'Universitats i Recerca inaugura dilluns la primera Conferència CERCA, que mostrarà l'activitat científica de 47 centres de recerca de Catalunya**

**El Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE) desplegarà el pont inflable més lleuger del món a l'exterior del Born Centre Cultural**

El secretari d'Universitats i Recerca, Antoni Castellà, i el director de I-CERCA, Lluís Rovira, inauguraran dilluns 28 d'abril la primera Conferència CERCA, que mostrarà l'activitat científica dels centres de recerca de Catalunya integrats en la xarxa CERCA.

La jornada –que se celebrarà durant tot el matí al Born Centre Cultural– comptarà amb la intervenció d'investigadors destacats que explicaran alguns projectes dels centres CERCA, que es caracteritzen per un model de gestió autònom i implementen una cultura d'avaluació amb conseqüències que es tradueix en el desenvolupament d'una activitat científica d'alt nivell.

La jornada també inclourà intervencions sobre Tecnologia Catalana, la marca CERCA per definir el pas de convertir la recerca en productes o serveis gràcies a experiències com el Programa Prova't, que impulsa el Govern de la Generalitat i que permet afavorir la comercialització d'idees innovadores.

Un dels projectes del Programa Prova't és el pont inflable desplegable més lleuger del món que han desenvolupat els investigadors del Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE). Abans de l'inici de la conferència, el secretari d'Universitats i Recerca visitarà el pont que aquest centre CERCA exhibirà a l'exterior del Born Centre Cultural. El director del CIMNE, Eugenio Oñate, i el director de la



[UPC](#)



[inici](#) [mapa del web](#) [contacte](#) [identifica't](#)  [CERCA](#)

## Centre de Transferència de Tecnologia de la UPC



[English](#) [Español](#)

[EL CENTRE](#)

> **Sou a:** [Inici](#) » [Notícies](#) » Ingenieros de la UPC desarrollan un puente inflable que resiste 20 toneladas

### NOTÍCIES

- > [Las muestras recogidas por Curiosity confirman la presencia de agua en Marte](#)
- > [Por qué la inmunoterapia contra el cáncer es el avance científico del año](#)
- > [Rice scientists create a super antioxidant](#)
- > ["El odio es limpio y la fuente"](#)

## Ingenieros de la UPC desarrollan un puente inflable que resiste 20 toneladas

Comparteix [Twitter](#) [Facebook](#) [Email](#) [+](#)

Investigadores del Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), un consorcio entre la Generalitat y la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC), han desarrollado un puente inflable que puede cargar hasta 20 toneladas y que se despliega en sólo 8 horas, cinco veces más rápido que infraestructuras similares.

Fuente: [La Vanguardia.com](#)

<http://www.lavanguardia.com/vida/20140427/54407294813/ingenieros-de-la-upc-desarrollan-un-puente-inflable-que-resiste-20-toneladas.html>



# blog de lluis.gil@upc.edu

Inici

About

Publications

Teaching

Research

dimarts, 20 maig de 2014

## El pont inflable de Buildair i el nostre granet de sorra



Presentació del pont a Barcelona

L'empresa Buildair i el CIMNE han desenvolupat un pont inflable desmuntable. El pont està basat en el concepte de bigues unidireccionals formades per membranes inflades a no molt alta pressió. El tauler connectat amb les bigues dóna prou rigidesa al sistema per

### Dades personals



 Lluís Gil

 Segueix

19

Dr. Civil Engineer. Assoc. Professor  
@ Technical University of Catalonia  
(UPC) BarcelonaTech

[Visualitza el meu perfil complet](#)

 0

### Follow me by Email