

Tecnología de pasarelas con estructura de membrana *Structural membrane technology for footbridges*

Juan Murcia Vela*

RESUMEN

El artículo presenta esta tecnología, que responde a la idea inicial del autor de utilizar las ventajas de la tracción en pasarelas. Comienza con un breve análisis de las estructuras de membrana y los retos que supone esta nueva aplicación.

Destaca en ello una investigación asociada al proyecto, la construcción y las pruebas de una pasarela con estructura de membrana en Callús (Barcelona). Su objetivo global fue hacer real la idea, materializando una sobre el terreno, y comprobar su aptitud funcional y su viabilidad estructural y constructiva. Hubo también objetivos parciales de análisis estructural (cálculo adecuado de forma de membrana y cables de borde), proyecto, proceso constructivo, implantación en el entorno y comportamiento en uso, para extraer conclusiones específicas.

Por supuesto, tal investigación (realizada por acuerdo entre el CSIC, la FECYT y el Ayuntamiento de Callús) es descrita con cierto detalle en todas sus etapas:

1. Proyecto de la pasarela (especialmente, la estructura de membrana).
2. Construcción de la pasarela en Callús.
3. Pruebas en la pasarela.

Los resultados fueron satisfactorios y el prototipo cumplió su misión de hacer real una idea. Con tal base de partida, se concluyó proseguir el estudio de esta tecnología de membranas para pasarelas (cosa nada obvia antes de Callús).

En fin, tras efectuar una valoración de la tecnología, se habla de la continuidad y la proyección futura de esta línea de trabajo; apuntando ahí la perspectiva de poder llegar con dicha tecnología, muy perfeccionada, a vanos de gran luz.

564-36

Palabras clave: pasarela, estructura, membrana, búsqueda de forma, proyecto, construcción

SUMMARY

The paper presents this technology, that responds to the author's initial idea of using tension advantages in footbridges. It begins with a brief analysis of the membrane structures and the challenges associated to this new application.

Emphasis is made on a research project associated to the design, construction and testing of a membrane footbridge in Callús (Barcelona). Its global objective was making real the idea, materialising such a footbridge on the ground and thus verifying its functional, structural and constructive aptitude. There were also partial objectives linked to structural analysis (suitable formfinding method for membrane and edge cables), design, construction process, environmental impact and serviceability behaviour, so leaving to specific conclusions.

Of course, such research (due to an agreement between CSIC, FECYT and the Council of Callús) is described with some detail in all its stages:

- 1, Footbridge design (mainly, the structural membrane).*
- 2, Footbridge construction at Callús.*
- 3, Footbridge testing.*

The results were positive and the prototype fulfilled its mission of making real an idea. Starting from it, the main conclusion was to continue the study of this membrane technology (something not at all obvious before the Callús project).

Finally, after an evaluation of the technology, a brief discussion about continuity and prospective of such a work line is presented. In this way, the perspective of reaching long spans by using this technology (much improved) is pointed out.

Keywords: footbridge, structure, membrane, formfinding, design, construction.

*Profesor de investigación, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC)
Persona de contacto/Corresponding author: murcia@ietcc.csic.es (Juan Murcia Vela)

1. ORIGEN DE LA TECNOLOGÍA

La tecnología responde a una idea inicial del autor de este trabajo, basada en utilizar en aplicaciones portantes las ventajas de las estructuras a tracción (1), que son las que mejor aprovechan su material y, por tanto, las más ligeras (2).

Así, además de cables y similares (elementos unidimensionales, 1D), usados hoy día como parte de la estructura en muchas obras, están las membranas (bidimensionales, 2D), empleadas en su gran mayoría para cubiertas (3, 4, 5).

Esta idea inicial fue madurando poco a poco hasta abrirse ya a una nueva línea de investigación, planteada de modo explícito hacia 2000, con vertientes básica (análisis estructural) y tecnológica, orientada en principio a pasarelas (figura 1).

Por su novedad, en el sentido de juventud e innovación, la línea no ha podido aún fructificar mucho. Se ha optado más bien por consolidar los hitos básicos iniciales. Así, sobre todo, en la rama básica, una tesis sobre análisis estructural matemático (6) y, en la tecnológica, una patente (7) y la investigación asociada a la construcción de una pasarela que se describe más adelante.

2. ANTECEDENTES

Las membranas a tracción, estructuras de mínimo espesor sin rigidez a flexión (los objetos materiales que más se aproximan a las superficies geométricas), se caracterizan por su gran ligereza y versatilidad de despliegue, con todo lo que ello lleva consigo. Son estructuras pretensadas (tracciones previas a su entrada en servicio) para que alcancen cierta rigidez (al menos, evitar arrugas).

Las membranas abiertas (con bordes) requieren elementos que equilibren las tracciones, cerrando el conjunto, o las transmitan al terreno. Las cerradas aprovechan el efecto neumático, equilibrando las tracciones por la continuidad de la estructura y la presión interna de un fluido (que produce el pretensado).

Desde otro punto de vista, puede decirse que las membranas, que conforman superficies en el espacio, son de algún modo pura geometría. En efecto, las implicaciones de la geometría de la estructura alcanzan aquí su máximo grado; de modo que la forma influye sobre todo en su propia respuesta, pero también en ciertas acciones sobre la estructura (viento); además de afectar a factores no estrictamente estructurales, pero no menos importantes, como el impacto visual

de la estructura o su propia funcionalidad. Así pues, en las membranas confluyen e interaccionan muchos factores a través de la geometría.

Una característica específica de las membranas es que no toda forma puede trabajar como estructura: se requiere siempre algún tipo de búsqueda de forma.

Las membranas abiertas, las aquí tratadas, tienen curvatura de Gauss negativa (curvaturas de sentido opuesto en dos direcciones ortogonales). Esto obedece, en principio, a un motivo estructural claro: si no fuera así, el pretensado de la membrana (tracciones en todas direcciones) no podría estar en equilibrio.

Esta línea considera membranas portantes, hechas para soportar cargas de uso, aparte de las asociadas a su propio despliegue (peso propio, pretensado, viento y, eventualmente, nieve), propias de las no portantes empleadas hasta hoy. Ello implica, con respecto a éstas, la existencia de tracciones más altas.

Pero las aplicaciones específicamente contempladas aquí, las pasarelas, requieren por razones funcionales superficies de pendientes suaves (al menos en la zona de paso).

Por tanto, deben emplearse membranas rebajadas; por lo que el salto cuantitativo en cuanto a esfuerzos (tracciones) es todavía mayor.

Además las tracciones son aún mayores porque debe haber mayor pretensado.

En efecto, el pretensado de la membrana tiene aquí básicamente dos misiones: 1) contrarrestar las compresiones debidas a las cargas en sentido de los arcos (figura 1), de no existir pretensado, para que sólo haya tracción; 2) proporcionar suficiente rigidez, por motivos funcionales (limitación de flechas de uso).

Ambas misiones requieren un pretensado mayor: 1) hay que contrarrestar compresiones mayores; 2) hay que conseguir mayor rigidez, considerando todo lo dicho (funcionalidad, existencia de cargas de uso, membrana rebajada, etc.).

Por tanto, el pretensado de la membrana alcanza un valor significativo, juega un papel muy importante y debe ser un dato básico de proyecto.

Así, en la búsqueda de forma, hay que partir de un pretensado adecuado. Pero además,

por lo mismo, es muy importante reproducirlo fielmente en construcción.

El salto cuantitativo en cargas, pretensado y forma no sólo implica el reto de tener que aquilatar los métodos de cálculo y construcción de la estructura, por la mayor responsabilidad asociada a su uso.

Por encima de todo, se da ya aquí un salto cualitativo de carácter tecnológico con respecto a la realidad actual.

3. UN HITO FUNDAMENTAL: LA PASARELA DE CALLÚS

Tras la presentación de la citada patente sobre esta tecnología (7) en 2002 (luego publicada y con informe PCT), se quiso ir más allá y pasar a la realidad.

3.1. Objetivos planteados

Se planteó un proyecto de investigación, colaboración del CSIC, la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT) y el Ayuntamiento de Callús.

El objetivo fundamental y global fue hacer realidad la idea de estas pasarelas, materializando una completamente (para la presentación de la patente, previa a este trabajo, esto no era imprescindible) en condiciones reales sobre el terreno, no en laboratorio.

Además, por supuesto, se pretendió sobre todo comprobar su aptitud funcional así como su viabilidad estructural y constructiva.

Asimismo, existían otros objetivos específicos ligados al desarrollo del trabajo:

1. Búsqueda de la forma de la membrana y de sus cables laterales de borde con criterios de proyecto adecuados:

- estructurales (tratando a la estructura como membrana, esto es, como una estructura 2D curva en el espacio y no como una red de cables inscrita);
- funcionales (limitación de pendientes en la zona de paso);
- mixtos, estructural-funcionales (pretensado adecuado para lograr rigidez suficiente de la membrana en servicio, limitando las flechas en dicha fase).

2. Proyecto con criterios constructivos, para lograr un proceso constructivo que combinara sencillez y adecuación al comportamiento estructural previsto para



Figura 1. Maqueta de pasarela con membrana (tres vanos).

la membrana (en particular, a la correcta introducción del pretensado).

3. Proceso constructivo.

4. Implantación en el entorno (aunque no pudiera ser prioritario en el diseño).

5. Comportamiento en servicio, tanto estructural como funcional.

6. Extracción de conclusiones prácticas de todo el proceso (proyecto, construcción y servicio) sobre las pautas seguidas para el proyecto, la construcción y los materiales empleados (particularmente el de la membrana).

3.2. Desarrollo del proyecto de investigación

La investigación, llevada a cabo en 2003, se resume en las siguientes fases:

1. Proyecto de la obra (membrana, sobre todo; estructura auxiliar; cimentación).
2. Construcción de la pasarela en Callús.
3. Pruebas en la pasarela.

3.2.1. Proyecto de la obra

Estudio de formas y análisis estructural de la membrana y sus bordes

De entrada, existían muchas formas y disposiciones posibles para la membrana. Así, por ejemplo, una membrana de tres vanos sobre cuatro mástiles, como la de la maqueta de muestra que aparece en la figura 1 (2).

Era importante adoptar un diseño que implicara una estructura sencilla, segura (en pruebas), económica y accesible desde cualquier lugar (no sólo en su uso como pasarela), por tratarse de un prototipo.

Todo ello implicaba que alcanzase poca altura sobre el terreno y, por tanto, no pasara sobre ningún cauce o vía.

Así, la concepción de la estructura se basó en una membrana de un solo vano y doble

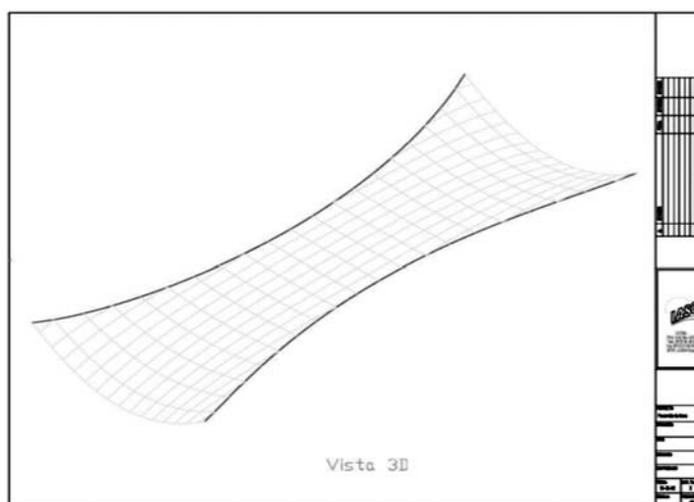


Figura 2. Esquema adoptado para la membrana (un vano).

simetría, esquematizada en la figura 2, con luz de: vano de 10 metros y anchuras máxima y mínima de 4 y 2 metros, respectivamente (todas en planta). Por otra parte, la membrana se apoyaba sobre estribos (bordes longitudinales, rectos en planta) y disponía de cables laterales anclados en los estribos. Las figuras 1 y 2 muestran que la superficie de la membrana tiene la propiedad, ya citada, de que su curvatura de Gauss es negativa (forma de silla de montar).

La elección de forma se basó en el análisis estructural del equilibrio en la fase de pretensado (en realidad, debería ser pretensado más peso propio; pero éste no se consideró por ser muy pequeño) en la membrana y los cables de borde. El análisis fue riguroso, tomando la membrana como estructura 2D (superficie) y los cables como 1D (curvas), todas ellas en el espacio.

Las condiciones, que se expresan de modo natural en función de los esfuerzos proyectados (sobre el plano x-y), divididas entre las de equilibrio en el plano y en el espacio, son:

- equilibrio de la membrana (plano; espacial: relación entre esfuerzos y forma);
- interacción membrana-cable (los esfuerzos de la membrana en el borde, por acción y reacción, son las cargas sobre el cable, en equilibrio con su forma y su tracción; además, condición geométrica en el espacio: el plano tangente de la primera coincide en el borde con el plano osculador de la curva del segundo);
- equilibrio del cable (cargas originadas por los esfuerzos de la membrana).

Las anteriores se plasman en diversas ecuaciones diferenciales y en derivadas parciales.

Destacan aquí los esfuerzos de membrana (reales o proyectados) como variables en el continuo; mientras que, en la habitual búsqueda de forma (8) por red, sólo hay tracciones de cable, no bien asimilables a los primeros. Aunque no se encontró solución analítica explícita de superficie y cables, que satisfaga todas las ecuaciones, se obtuvo una aproximada (aún mejor en este caso de membrana rebajada).

Esta solución $z(x, y)$, referida al centro de la superficie, fue un polinomio con términos pares en x e y (por la doble simetría). Los cables de borde fueron de planta parabólica, intermedia entre una elíptica y una hipérbolica (formas aproximadas asociadas, respectivamente, al equilibrio plano con los esfuerzos de la membrana y a la condición geométrica espacial).

Los esfuerzos de pretensado, casi constantes en cada dirección, fueron 4 kN/m transversalmente y 10 kN/m longitudinalmente en el centro de la membrana. La tracción de los cables de borde resultante descendía desde el centro, con valor de 55 kN, a los extremos; lo que implicaba una cierta secuencia de pretensado. Se llegó así a una forma de la membrana, y de sus bordes laterales (cables), que dejaba aún un parámetro libre. Este parámetro fue definido de modo que no se superara una pendiente máxima admisible, por motivos funcionales, en los accesos a la pasarela (extremos del eje longitudinal de la membrana). Por supuesto, la membrana y los cables así obtenidos eran muy rebajados. Una vez definida la forma de referencia de la membrana, esto es, la asociada a la fase de pretensado, se procedió al proyecto de los diferentes elementos.

En primer lugar, se ha de hablar de la forma de confección de la membrana. La misma,

$z^*(x^*, y^*)$, va asociada a esfuerzos nulos y se obtiene desde la forma de pretensado, descontando de ella la deformación debida al propio pretensado. En este caso, como la membrana era muy rebajada, dicho análisis se realizó mediante una aproximación bastante ajustada, suponiendo que al pretensar (esfuerzos casi horizontales) sólo se producían desplazamientos horizontales.

Con tales desplazamientos en la membrana, su doble simetría y esfuerzos casi constantes en cada dirección, la superficie mantiene su expresión con cambio de coordenadas: $z^*(x^*, y^*)=z(x^*(1+\epsilon_x), y^*(1+\epsilon_y))$, siendo ϵ_x y ϵ_y las deformaciones. Así, la forma es como la de pretensado, pero con curvaturas un poco mayores. Con esta nueva forma $z^*(x^*, y^*)$ se confeccionó la membrana.

Proyecto de la pasarela

Esta etapa implicó una importante labor de gestión de proyecto, coordinando las tareas de distintos agentes (ligados a membrana, estribos y cimentación).

El pretensado de la membrana desde sus bordes se basó en los siguientes elementos: 1) transversalmente, cables laterales tensados y anclados en los estribos; 2) longitudinalmente, tensores entre los estribos y una barra de borde de la membrana (para repartir en ésta las cargas puntuales de los tensores).

En cuanto a los estribos, es evidente la relación geométrica entre su forma y la del extremo de la membrana. Por supuesto, para el diseño de los estribos, la forma de referencia de la membrana fue la de pretensado, no la de confección.

A partir de lo anterior, los estribos fueron proyectados en estructura metálica tubular, como celosías en prolongación de la membrana (y, así, ni planas ni siquiera cilíndricas), dispuesta para recoger sus tracciones longitudinales y, en particular, las de pretensado.

Para las tracciones de los cables de borde anclados en los estribos, esto es, dos cargas concentradas, una a cada lado, se colocaron tubos inclinados de mayor diámetro (figuras 3 y 4). La cimentación fue concebida básicamente como sendas zapatas de hormigón armado para los estribos.

Por razones constructivas, sobre la base rectangular de la zapata se dispuso una plataforma, con planta en forma de artesa, para el anclaje del estribo metálico, insertando en la armadura de dicha plataforma (hormigonada en una fase posterior a la de la



Figura 3. Estribo durante la colocación de las barras de anclaje.



Figura 4. Estribo ya montado (con las barras insertadas en la armadura).

base) unas barras o varillas con doble rosca, unidas a las placas que remataban las diferentes patas del estribo. Se decidió colocar asimismo tres riostras de hormigón armado, del mismo canto que las bases de las zapatas, y a su mismo nivel, para darles unión.

3.2.2. Construcción de la pasarela en Callús

La construcción de la pasarela tuvo diversas fases, resumidas a continuación.



Figura 5. Membrana extendida y, en primer término, cable de borde.



Figura 6. Barra de reparto en el borde longitudinal y piezas para los tensores.

- Confección de la membrana y fabricación de accesorios (cables, barras, etc.).

La confección de la membrana implica una serie de etapas, desde el patronaje a la unión de las piezas. Además, hay que preparar sus bordes, que aquí se dispusieron doblando la membrana sobre sí misma, para insertar los cables de modo continuo en los laterales e igual con las barras de reparto, pero dejando escotes cada cierta distancia para los tenso-

res, en los longitudinales (figura 7). Todo se llevó a cabo en taller. El material fue un tejido estructural de fibras de poliéster con recubrimiento de PVC (1,5 mm de espesor y 15 N/m² de peso).

Los cables de acero laterales se montaron en taller, con sus elementos de anclaje. Las barras de reparto, de fibra de vidrio, venían cortadas a medida. Los tensores, formados por dos barras roscadas que se cerraban mediante un perfil U fijo y otro igual desmontable (figura 7), se fabricaron asimismo en taller.

- Fabricación de los estribos, con los elementos de anclaje

Los estribos fueron estructuras metálicas tubulares fabricadas en taller, incluyendo en sus esquinas unos tubos cortos para anclar los cables (figura 6).

- Construcción in situ de la cimentación, en Callús, con sus enlaces a estribos

Ya se ha descrito cómo era la cimentación. Tras la excavación, se colocó toda la ferralla (de zapatas y riostras) en su lugar. Más adelante, en una primera fase, se procedió a hormigonar las bases de las zapatas y las riostras, dejando a la vista la armadura de las plataformas. Tras insertar en ella las barras de anclaje de los estribos (figura 4) y ajustar bien la posición de éstos (con medidas directas y topográficas, ya que se deforman), como se insiste más abajo, se procedió al hormigonado de ambas plataformas

- Transporte a Callús de los estribos, la membrana, los cables y los accesorios

En primer lugar, se transportaron ambos estribos a Callús en un camión. En la figura 3 se observa uno, colgado de la grúa del camión, mientras se colocan las barras de anclaje (con doble rosca y pieza de apoyo) en las placas de base. Más adelante, se transportó la membrana ya confeccionada, junto con los cables y accesorios, en una furgoneta (figura 5).

- Montaje de los estribos (sobre cimentación) y la membrana (sobre estribos)

Como se sabe, se montaron los estribos sobre las bases de zapatas y se ajustó su posición, afinada después con la doble rosca de las barras. Tras hormigonar las plataformas, se fijaron los estribos con mortero bajo sus placas de base.

Transcurridos unos días desde la última fase de hormigonado (plataformas), se procedió al montaje de la membrana, los cables y

los accesorios. La figura 5 muestra la membrana extendida sobre un plástico protector encima del terreno, entre los estribos, así como uno de los cables de borde aún en forma de rollo.

Los cables de acero se enfilaron en los bordes laterales doblados de la membrana. A continuación, se insertaron sus extremos en los tubos de anclaje dispuestos en las esquinas de los estribos, como refleja la figura 6.

Tras anclar los cables mediante tuercas, se insertaron las barras de reparto en los bordes longitudinales, colocando a la vez unos casquillos con lengüeta en los escotes de estos bordes, para poder aplicar los tensores (figura 6).

Después se colocaron los tensores, aún abiertos. Por último, se cerraron los tensores en los estribos, como se ve en la figura 7.

Al finalizar el montaje, esto es, una vez colocado todo en su lugar definitivo, la membrana ya estaba algo traccionada, pero aún quedaba un poco arrugada en ciertas zonas; lo cual se aprecia con claridad, por ejemplo, en la figura 7. Por ello, se pretensó un poco hasta quedar del todo tersa (pretenso de montaje).

En la figura 8 puede contemplarse de cerca la obra casi terminada, aún sin pretensar. Se observa que la membrana es bastante rebajada (pendientes muy pequeñas, salvo en zonas de esquina, que no son de paso).

En dicha figura se aprecia asimismo la baja altura de la membrana respecto al terreno, por los motivos indicados al principio, mermando sus posibilidades estéticas: la estructura aparece como poco airosa; lo que quizá resulta más claro al compararla con la solución de la figura 1, que alcanza mayor altura.

Como comentario final, y prosiguiendo la comparación de este tipo de pasarela con otras posibles soluciones para ella, pero ya sin membrana, como sería por ejemplo una de tipo atirantado, puede decirse que la membrana desempeña al mismo tiempo, y sin solución de continuidad, las funciones de tablero y tirantes.

Tras los comentarios, hay que volver a la situación de la obra, casi acabada.

De forma inmediata, se llevó entonces a cabo la primera prueba de carga. Como es natural, con un pretensado mínimo, la membrana se deformó bastante, apuntándose algo en la zona de carga.



Figura 7. Tensores longitudinales cerrados sobre un estribo.



- Pretensado de la membrana

Figura 8. Vista inferior, desde un estribo, de la obra casi acabada.

Finalmente, se realizó el pretensado de la membrana. Su secuencia, como se dijo, era importante (adecuación a los esfuerzos previstos).

Así, se comenzó por tensar los cables laterales (contra estribos) mediante las tuercas extremas, de manera paulatina y por turno en los cuatro puntos; más tarde se apretaron del mismo modo los tensores longitudinales. Los

tesados se ajustaron midiendo desplazamientos, previamente calculados para obtener las fuerzas necesarias.

3.2.3. Pruebas en la pasarela

En este apartado conviene hacer algunas matizaciones previas.

Para el buen acceso peatonal a la membrana era precisa la existencia de una superficie continua de paso sobre los estribos, cuyas estructuras de celosía no proporcionan tal continuidad. La solución fue el uso de dos planchas metálicas ligeras, fijando cada una a un estribo por encima de su zona central, que quedaban un poco en voladizo sobre la membrana, muy cerca de ella pero sin llegar a tocarla. Estas planchas no aparecen en las fotografías mostradas.

Las pruebas fueron muy limitadas, ya que los reducidos fondos disponibles (no era realista pedir más para un prototipo) se concentraron en la construcción.

Pruebas de carga

Construida la pasarela, y aún con pretensado de montaje en la membrana, se hicieron pruebas de carga mediante el paso de personas, con disposiciones diversas en planta. El resultado fue satisfactorio (como prueba de resistencia; no de funcionalidad: la membrana, tal como se esperaba, se deformó mucho).

Después de pretensar la membrana, se realizaron pruebas de carga similares, con igual resultado (en el sentido ya indicado; pero se deformó mucho menos).

En cuanto al comportamiento estructural, además de estas comprobaciones de resistencia, particularmente de la membrana, hubo ocasión de realizar otras, que vinieron a confirmar en conjunto los efectos previstos.

En este sentido, ha de citarse en primer lugar el efecto de la fluencia del material de la membrana: la fluencia es la deformación que experimenta un material, a lo largo del tiempo, bajo carga mantenida.

Asimismo, debe hablarse de los efectos debidos a la deformación del material de la membrana por cambios de temperatura.

El efecto de la fluencia bajo tracción, al tratar de alargarse el material en el tiempo, es la paulatina relajación de esa tracción, hasta un límite. Con el descenso de las tracciones de la membrana, ésta va perdiendo rigidez. Al mismo tiempo, un aumento de la temperatura del material origina una deformación de alargamiento, con el mismo efecto estructural.

Como las temperaturas subieron entre la primavera y el verano, además de manera especialmente acusada ese año (2003), y no sólo en Callús, los dos efectos se sumaron y todo ello derivó en una clara pérdida de rigidez de la membrana.

Otro factor estructural, con el que se contaba, fue el rozamiento entre la membrana y el cable, causante de variaciones de tensión en éste. Se constató la conveniencia de tenerlo en cuenta de manera más precisa en el cálculo, evaluando el coeficiente de rozamiento en el borde (varía con su disposición, continua o no, y aparentemente también con los propios esfuerzos).

Pruebas funcionales

Al mismo tiempo, el paso de personas sirvió para hacer pruebas funcionales de la pasarela, asimismo cualitativas. En este sentido, se comprobó que, para las pendientes existentes, con la membrana seca no se producía deslizamiento al emplear calzado normal (plano); pero existía algún riesgo si estaba mojada.

Otro aspecto importante es la comodidad de paso ligada a la rigidez, muy variable según el grado de pretensado (la membrana, que se deformó mucho para pretensado de montaje, como se ha indicado, va deformándose menos según aumenta el pretensado). Si bien el nivel de esta comodidad es, claro está, algo un tanto subjetivo, puede afirmarse que, justo tras el pretensado de la membrana, resultaba aceptable; pero, según lo dicho, la membrana fue perdiendo rigidez con el tiempo y, con ella, comodidad de paso.

Por otro lado, dada la posición de la membrana (tablero de la pasarela) respecto al terreno, no hubo necesidad de colocar barandillas en la pasarela. No obstante, el examen del prototipo confirmó la posibilidad de disponer barandillas empleando estructuras sencillas, formadas por mallas de cables sujetas a unos elementos adicionales, en los extremos, y a los cables laterales (Figura 9).

3.3. Resultados obtenidos

Lo primero que cabe indicar, como evaluación global, es que los resultados fueron satisfactorios con relación a los objetivos planteados. Así, de entrada, se pudo materializar la idea de una pasarela con estructura de membrana, comprobando su aptitud funcional y su viabilidad estructural y constructiva.

Al lado de esto, es importante destacar que, al abordar la construcción de un primer



Figura 9. Vista de la pasarela de Callús en su entorno.

prototipo, con una disposición sencilla y cercana al terreno (por motivos económicos y de seguridad en las pruebas), la tecnología constructiva fue relativamente sencilla pero suficiente para asegurar un pretensado significativo.

Por otra parte, como se ha indicado, se procedió a la búsqueda de forma de la membrana y los cables de borde con un análisis de membrana propiamente dicho (aproximación analítica considerando el equilibrio de la membrana y de los cables, y la interacción membrana-cable), limitando la pendiente en la zona de paso e introduciendo un pretensado adecuado a la rigidez en servicio.

Además, se constató la adecuación de los criterios de proyecto (de búsqueda de forma y constructivos) y el proceso constructivo de la pasarela respondió a las expectativas, resultando preciso (ajustes entre elementos) y económico.

A pesar de ello, la gestión de proyecto y la de construcción, previsiblemente complejas aunque se tratara de una obra muy pequeña, por los citados ajustes precisos entre sus partes y la cantidad de agentes implicados, lo fueron aún más (considerando que tuvieron que ser asumidas por el propio investigador).

El comportamiento en servicio de la pasarela fue similar al previsto, estructural y funcionalmente. En efecto, el acceso (mediante las planchas citadas como plataformas) y la marcha sobre la pasarela mostraron ser adecuados. Las flechas fueron bajas. Sólo había algún peligro de deslizamiento con superficie mojada (de fácil resolución, mediante tiras pegadas o algo similar que lo evite).

Una faceta crucial de esta tecnología es la relativa al material de la membrana. Hay que indicar al respecto que, en este caso, dicho material fue el tejido más resistente de la gama disponible por el fabricante para su empleo en cubiertas.

En el comportamiento del material de la membrana destaca su conocida vulnerabilidad frente al vandalismo, especialmente importante al considerar que aquí la membrana es, en esencia, accesible (incluso en las cubiertas, con zonas que con frecuencia están al alcance, esto continúa siendo un problema).

Además, como ya se ha indicado, los efectos estructurales de la fluencia y de la deformación por temperatura del material de la membrana, que estaban previstos, fueron perfectamente confirmados en las pruebas de la pasarela.

Según lo explicado más arriba, un factor que muestra tener aquí una cierta importancia es el rozamiento existente en el borde de la membrana entre ésta y el cable, para poder evaluar las variaciones de la tracción del mismo.

Pues bien, entre los datos del material de la membrana suministrados por el fabricante no figuraban ni la fluencia ni el coeficiente de deformación por temperatura; y, mucho menos, coeficientes de rozamiento con cables u otros posibles dispositivos de borde.

Todo ello es en sí mismo muy indicativo de la práctica y de los requisitos habituales en el ámbito de las membranas para cubiertas, con relación a los que se muestran necesarios para pasarelas. La implantación en el entorno de la pasarela resultó armoniosa y agradable (figura 9), considerando que, como se dijo, en este caso se sacrificaron las posibilidades estéticas

de las estructuras de membrana a la seguridad y a la economía (la estructura no puede ser airosa, al quedar muy pegada al terreno).

A modo de resumen, puede afirmarse que el proceso seguido resultó, en su conjunto, adecuado al tipo de estructura tomado y a sus condiciones.

3.4. Conclusiones

Ya se ha indicado que los objetivos del proyecto fueron alcanzados con éxito. El prototipo cumplió su misión de plasmar una idea en la realidad, para poder seguir avanzando a partir de la confirmación práctica de cuestiones previstas, la corrección o matización de otras y, sobre todo quizá, la irrupción o aparición de ciertas cuestiones imprevistas. Todo ello gracias a disponer del mismo.

Por tanto, la primera conclusión, general y práctica, fue continuar avanzando en el estudio de esta tecnología de membranas para pasarelas. Esto, que tal vez suene ahora a obviedad, no lo era en absoluto al abordar la investigación.

Por otro lado, y más en particular, dada la importancia del pretensado para el comportamiento estructural (sobre todo, para la rigidez en servicio), se constató la adecuación del método de cálculo empleado (que es propiamente de membrana y permite además imponer los esfuerzos de pretensado como datos directos) y de la parte del proceso constructivo asociada al mismo.

De cara al uso práctico de estas pasarelas, las cuestiones que mostraron ser más urgentes afectan a la tecnología de materiales.

Se trata, en suma, de adecuar las propiedades del material de la membrana frente al vandalismo, reduciendo su vulnerabilidad al punzonamiento y al corte (existen ya tejidos reforzados con hilos de acero, pero parece que habría que ir más allá), y en cuanto al comportamiento estructural; sobre todo disminuyendo la fluencia. En cuanto al análisis estructural y al proyecto de la membrana, se concluyó la conveniencia de conocer y tener en cuenta el rozamiento entre cables de borde y membrana, para evaluar de modo aún mejor las tracciones de pretensado en todos ellos; y, cuando convenga, estudiar y aplicar medidas para reducirlo.

4. RELEVANCIA DE LA TECNOLOGÍA

Relevancia técnica y científica

Callús es una primicia absoluta de pasarela real con estructura de membrana, en que ésta

hace de tablero (plataforma de paso). Esto se fue confirmando, en particular, a lo largo del proceso seguido por la patente desde su solicitud (7).

El trabajo, desde su novedad, la acción concreta desarrollada y la experiencia obtenida, resultó una investigación en toda regla, con aspectos en los que fue más incipiente, pero significando siempre un paso para nuevas investigaciones. Ejemplo de un aspecto de la investigación fue el análisis estructural para definir la forma de membrana y los cables de borde, considerando la membrana como superficie (estructura 2D) y los cables como curvas (1D) en el espacio.

Como se dijo, se constató que no hay solución explícita de superficie y bordes (que sean cables) que satisfaga analíticamente todas las ecuaciones de equilibrio (membrana, cable e interacción entre los mismos). Pero se obtuvo una solución analítica aproximada (más aún en este caso de membrana muy rebajada).

Precisamente este asunto del equilibrio en estructuras de membrana fue abordado como problema matemático en la investigación de tesis doctoral (6) que entonces comenzaba y que concluyó en 2006 (leída en la UPC en 2007).

En términos generales, los propios retos asociados a la tecnología le otorgan ya tal relevancia. Si en Callús ello afectó sobre todo al proyecto y, quizá no tanto, a la construcción, en el futuro parece enlazar con la mayor adecuación de las propiedades del material de la membrana y con el proceso constructivo.

Relevancia económica y social

Ventajas básicas de estas pasarelas son su gran ligereza (crucial para luces crecientes, como se verá) y rapidez de construcción, y aptitud para el montaje y el desmontaje. Asimismo, sus amplias posibilidades estéticas de encaje en el entorno y el impacto de su originalidad y novedad con relación a lo existente.

Entre las aplicaciones previsibles cabe citar las que siguen:

- Pasarelas en entornos de exposición, eventos singulares y ocio (recintos feriales, parques temáticos, otros parques, etc.).
- Pasarelas en situaciones de emergencia.
- Estructuras de carácter emblemático.

Como usuarios potenciales se cuentan los siguientes:

- Organizadores de exposiciones y eventos singulares.

- Servicios de respuesta a situaciones de emergencia (protección civil, etc.).
- Ayuntamientos, diputaciones y otras administraciones públicas.

5. CONTINUIDAD DE LA LÍNEA

Tras Callús las actividades en esta línea prosiguieron, debiendo centrarse en la rama básica, en especial la tesis doctoral citada (6). En la tecnológica se ha hecho una labor de difusión en España (9), sobre todo mediante conferencias. Los puntos de conclusiones de Callús (# 3.4) marcan pautas de continuidad en la vertiente tecnológica de la línea de investigación; pero también en la básica.

Así, en cuanto a la vertiente tecnológica, se contempla emplear la parte fija de la pasarela (cimentación y estribos) como base o banco de pruebas para otras membranas con materiales de propiedades más adecuadas según los puntos indicados, realizando pruebas estructurales y funcionales cuantitativas.

Hacia un futuro más lejano, cabe aquí mencionar algo fundamental. Se trata de la adecuación de las estructuras ligeras, como éstas, a los vanos de gran luz, porque el peso propio va gravando de modo muy progresivo la estructura y se alcanza un límite de luz inviable, especialmente en las estructuras a flexión (los esfuerzos, y con ellos la capacidad resistente, aumentan con el cuadrado de la luz). Aquí la tracción tiene gran ventaja porque aprovecha al máximo el material y reduce el peso propio, y los esfuerzos aumentan en proporción a la luz.

Pensar en llegar con esta tecnología, perfeccionada por supuesto, a pasarelas de luces de cierta importancia, y no digamos ya a puentes, es soñar. Pero de los sueños nacen todas las creaciones humanas y, desde luego, en 2000 era aún un sueño materializar unas ideas en algo parecido a la pasarela de Callús.

En fin, desde la perspectiva actual se sigue apostando por la línea, revisándola para que derive en innovación tecnológica plena con el mayor alcance posible.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la FECYT y al Ayuntamiento el apoyo ofrecido en Callús, aún más relevante por tratarse de una investigación asociada a una nueva línea. Se agradece asimismo la colaboración en Callús, de forma desinteresada o con un tratamiento económico especial, de otras entidades:

- PEDELTA, S. L. (proyecto de la cimentación y los estribos metálicos)
- IASO, S. A. (confección de la membrana, fabricación de accesorios y montaje)
- FERRARI, S. A. (material de la membrana)
- HORFASA Grupo Empresarial, S. L. (fabricación y montaje de los estribos)
- BENJUMEA Contratas y Obras, S. A. (construcción de la cimentación)
- FUNDACIÓ APLICACIÓ, Callús (apoyo diverso durante la construcción)
- FERROCARRILS DE LA GENERALITAT DE CATALUNYA (uso de parcela).

La tesis doctoral fue posible gracias a una beca CSIC-MEC (4 años) en Unidades Asociadas.

REFERENCIAS

- (1) Leonard, J. W. *Tension Structures*. McGraw-Hill. New York, 1988.
- (2) Murcia, J. *Tecnología estructural de membranas para aplicaciones de ingeniería civil*. I Jornadas Nacionales sobre Innovación y Nuevas Tecnologías en Ingeniería Civil. Madrid, 2002.
- (3) Monjo, J. *Introducción a la arquitectura textil. Cubiertas colgadas*. COAM. Madrid, 1991.
- (4) Ishii, K. *Membrane Structures in Japan*. SPS Publishing Company. Tokyo, 1995.
- (5) Ishii, K. *Membrane Designs and Structures in the World* (english-japanese edition). Shinken-chiku-sha. Tokyo, 1999.
- (6) Viglialoro, G. *Análisis matemático del equilibrio en estructuras de membrana con bordes rígidos y cables. Pasarelas: forma y pretensado*. Tesis doctoral (director: J. Murcia). Programa de Doctorado Ingeniería Civil (E. T. S. Ing. Caminos, Canales y Puertos), UPC. Barcelona, 2006.
- (7) CSIC / Murcia, J. *Estructura portante para pasarela o puente*. Patente. OEPM, 2005.
- (8) Linkwitz, K. *Formfinding by the "Direct Approach" and Pertinent Strategies for the Conceptual Design of Prestressed and Hanging Structures*. Int.Journal Space Structures, 14, 2 (1999) 73-87.
- (9) Murcia, J. *Prototipo de pasarela con estructura de membrana*. IV Congreso Nacional de la Ingeniería Civil. Madrid, 2003.

* * *