

CONSTRUID Y RAJAD

ESTRUCTURA 1: PUENTE ATIRANTADO

25/10/2017



DESARROLLO DEL PROYECTO

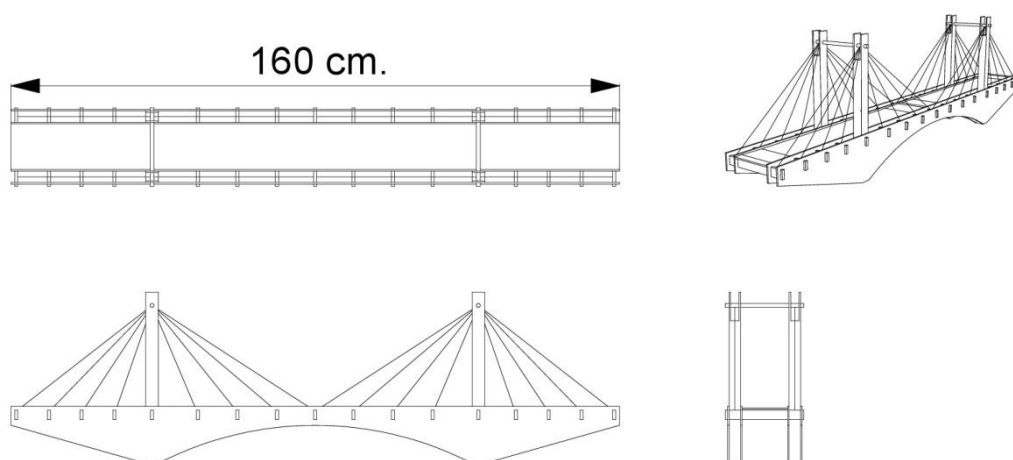
La primera estructura del taller “Construir y romper”, de la ETSAM, consistía en un puente atirantado, cuyas características habían sido establecidas en un comité por los alumnos del taller, y recogidas en el enunciado por el profesor.

En apenas una semana debíamos presentar un primer boceto para debatir las ventajas y los inconvenientes en clase. Disponíamos de dos semanas para construir el puente, que tenía que realizarse enteramente de cartón. Tan solo podía utilizarse otro material en las uniones y los tirantes. Nuestros conocimientos sobre estructuras eran bastante limitados, por lo que el diseño propuesto se basaba más en el sentido común que en unos cálculos rigurosos.

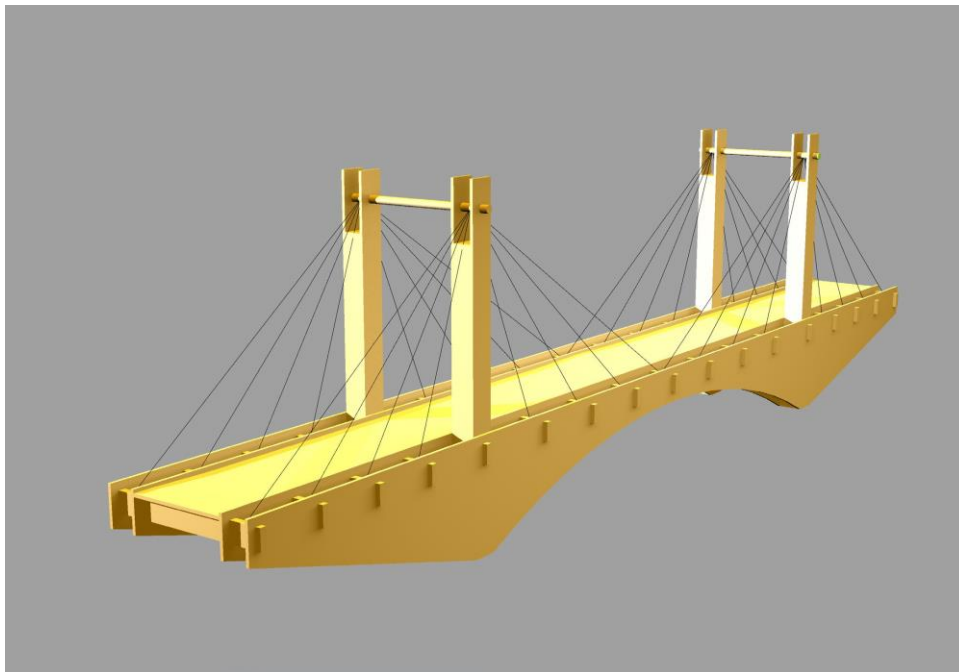
En primer lugar, decidimos que debíamos reforzar el tablero sobre el que apoyaría el peso, pues desconocíamos la capacidad de resistencia de los tirantes. Para asegurarnos de que soportaría una primera capa de cilindros, diseñamos una serie de piezas con forma de arco que se conectaban en medio con una viga. Entre las dos piezas situaríamos los pilares. Para unir todo el entramado, utilizaríamos una serie de vigas que atravesarían transversalmente el puente, y sobre las que apoyaríamos el tablero. Tanto los arcos como el tablero estaban contruidos con cartón más resistente, pues eran los que más peso debían soportar.

Aunque en el diseño inicial el tablero se constituía de una única pieza, finalmente decidimos unir dos piezas iguales con cola blanca y cinta adhesiva. Nuestro primer boceto también consideraba construir un gran arco en medio del tablero con una pieza continua, para dar resistencia a la estructura, pero en el último momento descartamos la idea, considerando que el puente excedería el peso del enunciado. El último pesaje nos demostraría que estábamos equivocados.

Por otro lado, todo el puente se concibió como dos estructuras simétricas, salvo por el tablero, para que cupiesen en la taquilla. Pero con el trascurso de los días decidimos almacenar la estructura en otro lugar. Por ello, el puente se compone de dos partes. Si desde un primer momento hubiésemos sido conscientes de que no se iba a guardar en la taquilla, el modelo hubiera sido completamente distinto, ganando mayor resistencia en la parte central, y evitándonos nuestro mayor problema estructural.



Vistas del puente



Renderizado

El trabajo más laborioso fue agujerear los arcos para insertar las vigas sobre las que apoyaría el tablero. En ello invertimos la mayor parte de nuestro tiempo, que podríamos habernos ahorrado si hubiésemos cortado todas las piezas al mismo tiempo. Además, las distintas interpretaciones de los miembros del equipo sobre el proceso constructivo tuvieron como consecuencia un desajuste notable entre las piezas, lo que nos obligó a construir cuñas y ampliar algunos agujeros, perdiendo masa de cartón, y por lo tanto, resistencia.

Esto nos lleva a nuestra primera conclusión: el proceso constructivo debe ser minucioso para tener los resultados esperados. Por ello, es obligación del diseñador especificar en qué consiste ese proceso y de los miembros del equipo comunicarse constantemente para no cometer errores.



Arcos



Vigas y pilares

Se escogió el nailon como el material con el que construiríamos los tirantes. La elección se basaba en distintos aspectos: se trata de un material fácilmente pretensible, resistente y que teníamos a nuestra disposición. Para evitar que rajase las vigas de cartón a las que estaba atado, las forramos con cinta adhesiva. Los tirantes se ataban en el otro extremo a una viga que conectaba los dos pilares de las torres del puente. Esta viga presentó serias dificultades a la hora de

construirse, pues decidimos que debía ser cilíndrica (para evitar que se rasgase y porque el cartón con esa disposición es muy resistente), pero enrollar cartón y comprimirlo resultó ser una labor más difícil de lo que imaginamos.

Los pilares del puente tenían forma de prisma cuadrangular, huecos (aunque al final decidimos insertar una pieza rectangular en el interior con la anchura del pilar para evitar que se colapsase) y unidos a los arcos con cola blanca.

La construcción del puente nos llevó un par de días más de los previstos (3 semanas), por lo que pudimos ser testigos de la primera ruptura sin todavía haber terminado el puente. Y de esa ruptura sacamos tres ideas que aplicaríamos a nuestro diseño:

- En primer lugar, para aumentar la superficie sobre la que debía recaer el peso, decidimos conectar los pilares por debajo con una serie de piezas rectangulares pegadas con cola una sobre otra, creando una especie de “colchón” sobre el que apoyaría el puente.
- En segundo lugar, para evitar que los pilares se abriesen, los unimos por debajo con dos tirantes de cuerda atados a esa base acolchada que habíamos puesto a última hora.
- Por último, con la idea de evitar que todos los cilindros se acumulasen en la parte central del puente, la parte más débil e inestable, ondeamos el tablero, situando los valles de la onda bajo los pilares (la parte más resistente del puente) y elevando ligeramente el borde del tablero. Todas estas modificaciones resultarían acertadas a largo plazo.

El día de la ruptura, a pesar nuestro puente descubrimos asombrados que tan solo pesaba 1100g, muy por debajo de lo que habíamos previsto. Si hubiésemos dispuesto de más tiempo, hubiéramos reforzado la pieza central. Pese a ello, el diseño, a simple vista atirantado, demostró ser bastante eficaz.



Situación final del puente

DOCUMENTACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN



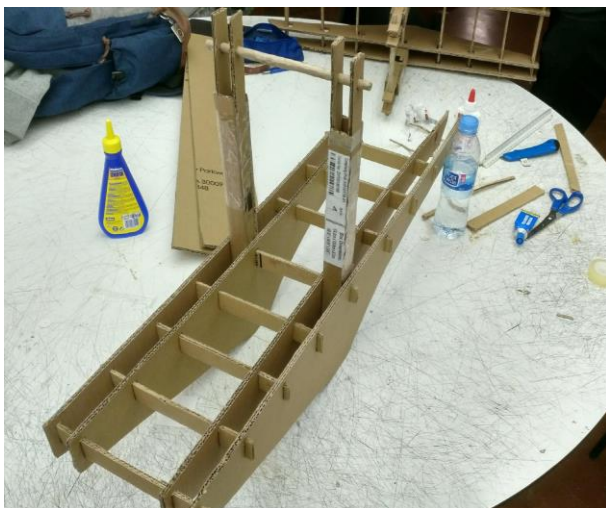
Detalle de la inserción de la viga en el arco



Vista del tablero y los arcos



Secciones del puente antes de unirse



Sección del puente



Situación del puente previa ruptura

REFLEXIONES Y MEJORAS

El puente aguantó sin deformarse las primeras tres capas de rodillos de acero, pero al comenzar la cuarta fila de cargas, empezaron a aparecer los primeros signos de pandeo en los tramos de cartón que formaban el arco. Esto se debe principalmente a que la distancia que había entre cada viga era demasiada para el ancho de ese cartón. Tras una primera reflexión, hemos llegado a dos posibles soluciones:

- Añadir unas tiras longitudinales de cartón doble de dimensiones (1.6m x 0.05m) con los correspondientes orificios para que las vigas pasasen a través de éstas. De esta forma, el arco ofrecería mayor resistencia al pandeo y la estructura aumentaría ligeramente su peso. Además se daría mayor rigidez a la unión de las dos partes del puente.
- Otra opción hubiese sido reducir el espacio entre vigas y poniendo una estructura triangulada entre los pares de arcos para evitar el pandeo de la estructura. El peso de la estructura apenas se vería modificado.

Cualquiera de estas dos soluciones hubiese aumentado la rigidez de la unión, haciendo que el puente aguantase mucho más peso. A esto anterior, hay que añadirle el problema que tuvimos al hacer las piezas del arco antes mencionado (por los agujeros coincidían con sus opuestos), que se hubiese solucionado creando una pieza arco plantilla con sus respectivos agujeros y a partir de esa plantilla sacar las siguientes piezas, siendo copias lo más exactas posibles de la anterior. De esta forma la estructura no se hubiese debilitado tanto con los agujeros extras que quedaron sin rellenar.

Otra observación que hicimos es que los tirantes al ser de nailon y no estar bien pretensados debido a su dificultad, no realizaron la función para lo que estaban diseñados y toda la carga fue soportada por el arco. Únicamente cuatro tirantes, los cuatro tirantes que unían los pilares con la viga central, se llegaron a tensar pero solo fue cuando se llegó a la cuarta capa de carga. Para poder haber evitado esa situación podríamos haber utilizado otro material como tirante y de otra manera, por ejemplo: cuerda trenzada o el mismo nailon trenzado. De esta manera los tirantes hubiesen soportado parte de la carga, trasladándola así a los pilares y evitando que todo el arco soportase el peso, al tratarse de una estructura mixta.



Situación del puente previa ruptura

Además cuando los tirantes fueron cortados para comprobar su utilidad, el puente tuvo una ruptura brusca y espontánea, no como la de los anteriores puentes que habían sido mediante una dobladura lenta del tablero. Si los tirantes no hubiesen sido cortados, la rotura del puente hubiese sido mucho más lenta y controlada, ya que las dos mitades del puente no se hubiesen separado al estar unidas por los tirantes que unían la viga central con sus respectivos pilares.



Puente sin tirantes



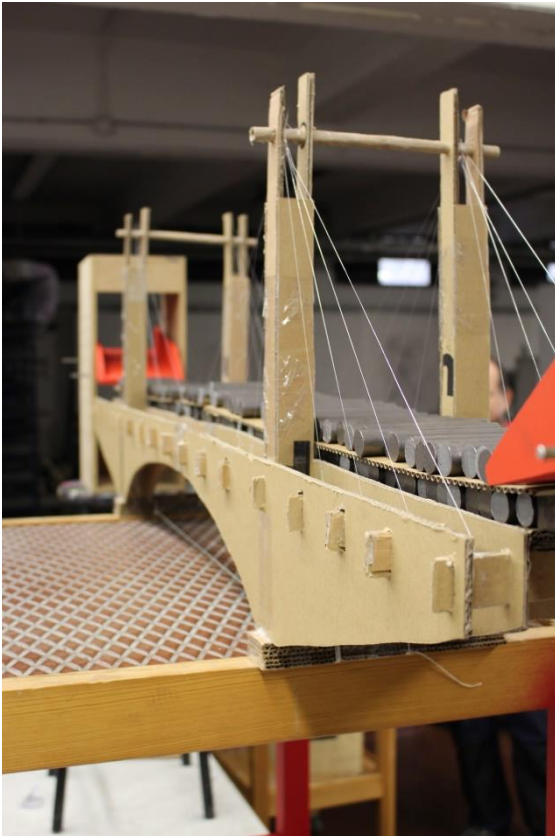
Detalle de la viga central



Apoyos del arco

En conclusión, la estructura fue un éxito ya que aguantó la carga útil que tenía que aguantar con un coeficiente de seguridad de 4; cumplía todas restricciones pensando aproximadamente 0,9 kg, menos que el límite; las dimensiones de la longitud del vano, el apoyo, la altura máxima y el espacio de carga fueron cumplidas; el comité antidoping no puso ninguna objeción; y por último, obtuvo un rendimiento del 98.7%. Esto nos permite resaltar la importancia de las estructuras mixtas que con menos material, pueden llegar a aguantar más peso que estructuras, en este caso, únicamente atirantadas.

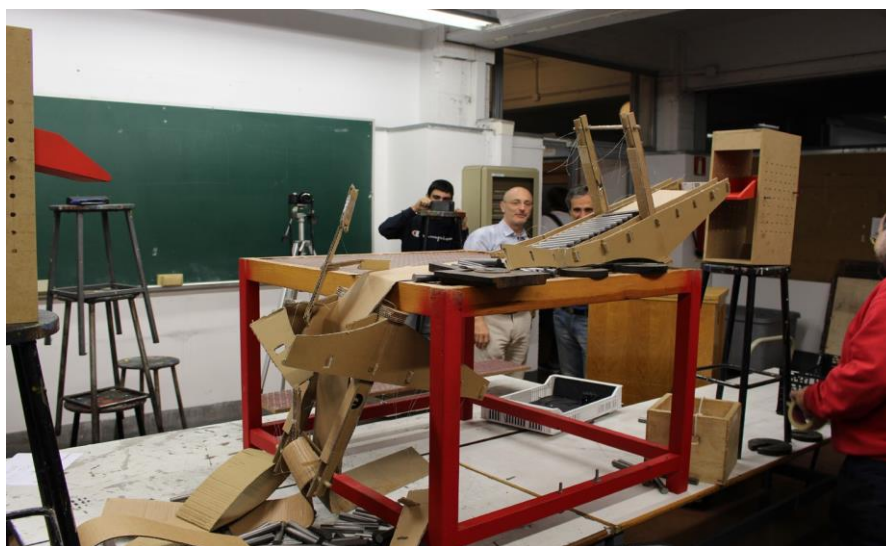
Para consultar videos de la ruptura: <https://www.youtube.com/watch?v= VbzOYQuIVl>



Pandeo de los vuelos



Ruptura frontal



Ruptura lateral