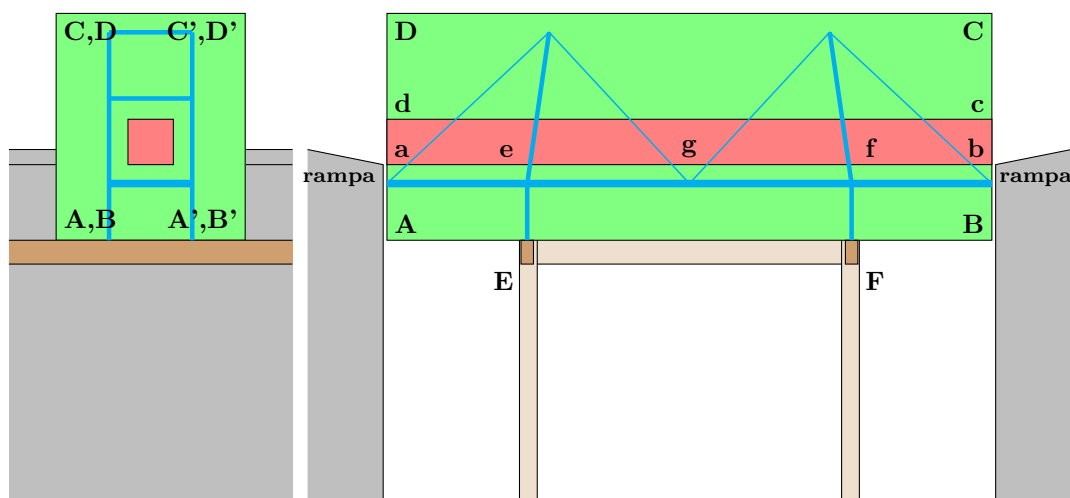


1^{er} CyR_m: Atirantados puentes

Material(es): cartón ondulado y otros
Rotura: En el aula YG2, el 11-10-2017

Objetivo: Construir un puente atirantado de 1,6 m de longitud total y no más de 2 kg, apoyado en dos líneas separadas a unos 0,86 m, definiendo un **tablero** (plano horizontal de apoyo) para sostener un “tren” de cargas iguales (de 120 mm de ancho y 120 mm de alto) cuyo valor útil (o característico) es de 1,2 kN/m²; salvo los tirantes y los materiales para realizar uniones, el resto de piezas será de cartón ondulado (de la “basura” de Sancer o similar).



La posición de los apoyos, línea **AB**, es fija, con su cara superior a 695 mm sobre el suelo. La estructura puede ocupar en su totalidad el espacio verde (**ABCD**), pero dejando libre el espacio del tren de carga (en rojo, **abcd**), y obviamente puede ser más pequeña—pero no más grande! El diseño de las columnas (pilastras, pilones, ...) es libre: pueden ser verticales o inclinadas, rectas o curvas, pero tienen que acabar apoyándose en **E** y **F**. Las dimensiones básicas son:

$$aD \leq 400 \text{ mm} \quad AB = 1600 \text{ mm} \quad AA' \leq 2 \times 250 \text{ mm} \quad \text{ancho de } E = 33 \text{ mm}; \quad \text{vano entre } E \text{ y } F = 825 \text{ mm}$$

Nótese que la cimentación de los soportes (pilas, pilones, columnas, etc) debe estar por encima de **AB**, **AA'** y **BB'**. Nótese también que la dimensión **aA** es libre, aunque se recomienda que sea la mínima posible, capaz de alojar la estructura diseñada para el tablero y para el apoyo de los soportes.

El espacio gris a ambos lados de la estructura son las rampas auxiliares por las que circula el tren de carga antes de atravesar el puente. Habrá una holgura de 2 mm entre las rampas y la estructura, es decir, la estructura bajo la acción de su propio peso debe estar construida de tal forma que la distancia **ab** sea de 1,6 m y, al instalar las rampas auxiliares, se dejará la holgura citada, cualquiera que sea la distancia **ab** real. De esta forma, el tablero no podrá apoyarse sobre las rampas.

En **cyan**, se muestran las líneas principales de un boceto que cumple con las condiciones indicadas; no se dibujan gruesos, solo el trazado de ejes de piezas muy esquemáticamente, así como la inclinación de los tirantes extremos de cada grupo; en particular no está dibujado como el tablero materializa el plano **ab**.

La puesta en carga se realizará por hileras de pesas que se introducirán en el paso para el “tren” de carga (en rojo), desde cada rampa, una pesa por cada lado alternativamente, hasta ocupar toda su longitud (**ab**). Las pesas entrarán con cierta velocidad, al dejarlas caer por las rampas inclinadas. Encima de cada hilera se introducirá otra, y así hasta la rotura. Las pesas son cilindros de acero de 20 mm de diámetro y 110 mm de longitud. La carga útil equivale a una hilera de cilindros que ocupa toda la longitud **ab**.

Un defecto habitual es que los vuelos del tablero **ab** (tramos **ae** y **fb**) cedan con la llegada de las primeras pesas, y siendo estas cilíndricas, rueden hacia los extremos, saliendo del tablero del puente y cayendo al vacío. Si así ocurre, el diseño incumplirá el requisito de rigidez habitual en edificios. Para evitar esta falla “temprana”, se admitirá inclinar esos tramos, de forma que tanto **a** como **b** queden ligeramente por encima de **ef**. La pendiente máxima admitida si se emplea este recurso será del 5%.

La masa de la estructura está limitada a 2 kg.

Salvo en el caso de que algún equipo presente un argumento muy fuerte, no se admitirá en las piezas otro tipo de cartón que el indicado. Los materiales para uniones son libres: cola blanca, cola de pescado, pegamento universal UHU, costuras de hilo, grapas metálicas, etc. Pero **en ningún caso** se admitirán piezas que en toda su longitud estén **dopadas** con otros materiales. Para los tirantes puede emplearse cualquier material (por supuesto también cartón): no se recomienda el uso de materiales mucho más resistentes que el propio cartón.

Data: El cartón ondulado corriente tiene un alcance estructural de 2 km aproximadamente. Sabiendo el gramaje del cartón es fácil saber la resistencia esperable por unidad de longitud de sección. Por ejemplo, un cartón de gramaje 200, tendrá un peso específico de 2 N/m^2 , y una resistencia de $2000 \text{ m} \times 2 \text{ N/m}^2 = 4 \text{ kN/m}$: una tira vertical de 10 cm de ancho aguantaría el peso de unos 40 kg.

El acopio del cartón ondulado, de gramaje 400 o mayor, de tres o cinco papeles, corre a cuenta de cada equipo: en la basura es abundante; en la escuela: principalmente, trasera de Sancer y/o contenedor de papel al lado de las pistas deportivas; y en muchos otros lugares: taller de maquetas, papeleras y contenedores en pasillos y aulas, etc.



Las patas de mesa que actuarán como apoyos de los puentes. El tubo de cartón encima de las patas muestra como se pondrán los puentes para el ensayo de carga.

Fases de realización

Este ejercicio se realizará en fases, con entregas parciales en alguna de ellas:

1. Lectura colectiva del enunciado y, en su caso, discusión y aprobación de enmiendas (1h)
2. Redacción de un proyecto¹ de la solución ideada. Se entregará un PDF con la información suficiente *como para que otro equipo (distinto del redactor) pudiera o pudiese acometer la construcción del diseño ideado*. Aunque se trata de un PDF, la confección del original puede realizarse tanto digitalmente (programa de dibujo) como manualmente (croquis a mano alzada convenientemente acotados y textos manuscritos, escaneados), o por cualquier hibridación de los dos métodos anteriores. (4h+homework)

Para la redacción del proyecto pueden hacerse pruebas con modelos a escala en cartón, papel o cartulina. Para medida de resistencias y fuerzas, pueden emplearse pesacartas o pesas, cilindros o esferas de acero. Esto es *highly recommended* en el estudio de las uniones de los tirantes con tablero y soportes.

3. Presentación pública del proyecto y crítica en asamblea (10m por equipo, 2h)
4. Construcción del diseño según las especificaciones del proyecto, modificado si fuera el caso (8h+homework). Para la manipulación hasta el momento del ensayo, puede resultar útil construir el puente en dos mitades, habiendo diseñado previamente una pieza de unión (en el punto **g**), de tal forma que sea sencillo y eficaz unir las dos mitades en el momento del ensayo.
5. Rotura de la estructura construida (el tiempo que haga falta)
6. Entrega final en PDF

¹“3. m. Conjunto de escritos, cálculos y dibujos que se hacen para dar idea de cómo ha de ser y lo que ha de costar una obra de arquitectura o de ingeniería.” (DRAE)

Pistas

- **Las pesas son cilindros de acero**, de las dimensiones antedichas. Indeformables en comparación con el cartón. Puede usarse este hecho, y el de que la posición de las pesas es conocida *a priori*, para disminuir la cantidad de estructura necesaria en el tablero. (El tablero podría ser concebido de muy distinta forma si, por ejemplo, las pesas fueran esferas de acero de igual diámetro.)
- **Estados de carga.** El puente no debe fallar hasta que se haya completado su carga con al menos una hilera completa de cilindros a lo largo de toda su longitud. Eso significa que hasta completar una hilera la carga será asimétrica, y el puente debe estar preparado para ello: un par de cilindros podrían significar un problema “peor” (por una posición asimétrica) que muchos pero simétricamente dispuestos.
- **El tablero.** Aparte de transmitir la carga de los cilindros hasta sus puntos de suspensión por los tirantes, el tablero tiene que resistir compresiones horizontales, precisamente, para que los tirantes puedan transmitir oblicuamente fuerzas iguales a los pesos (verticales). Además debe compensar la asimetría de la carga si los tirantes están pensados para soportar grandes cargas *simétricas*.
- **Los soportes.** Piezas usualmente comprimidas sujetas a fenómenos de inestabilidad o pandeo, si no tienen suficiente rigidez a la flexión y/o presentan imperfecciones iniciales respecto a su trazo teórico. Cargas asimétricas pueden solicitarlos a flexión. Depende de la rigidez relativa del tablero.
- **Los tirantes.** Fáciles de imaginar y trazar, pero con dos dificultades: como unirlos al tablero y a los soportes sin desgarrar a estos, y como asegurar que no tarden en entrar en tensión por estar flácidos bajo la acción exclusiva del peso propio del puente (al inicio del ensayo).

Una posible fuente de inspiración será examinar diseños reales de puentes atirantados no muy grandes, a ser posible con tableros de acero (los tableros de hormigón armado no dejan “ver” como es su interior, salvo que se cuente con planos del proyecto original).