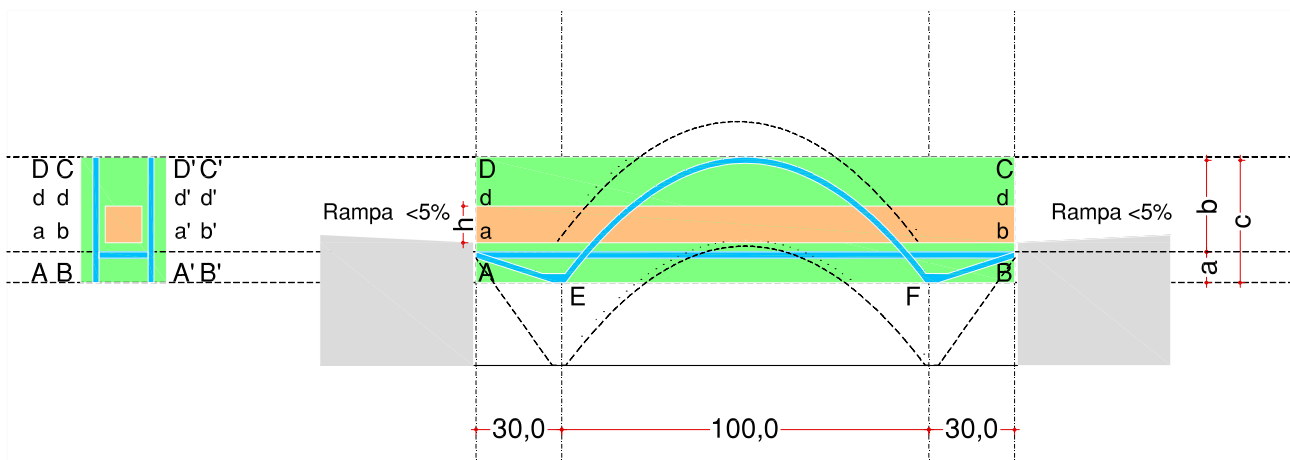


## 1<sup>er</sup> CyR<sub>t</sub>: Puentes y arcos

Material(es): cartón ondulado

Rotura: En el aula YG2, el 9-10-2017

Objetivo: Construir un puente en arco de 1,6 m de longitud apoyado en dos líneas separadas 1,0 m, para soportar un tablero que permita sostener un tren de cargas iguales cuyo valor útil es de 1,2 kN/m<sup>2</sup>; el diseño deberá permitir el paso de las cargas por un hueco de 120 mm de ancho y 120 mm de alto. todo el material del arco deberá ser de cartón ondulado, con la única excepción de los tirantes, en caso de que se utilicen y el material para realizar las uniones.



La separación entre los apoyos **EF** será de 1000,0 mm. La estructura podrá ocupar la totalidad del espacio verde **ABCD** y **A'B'C'D'**, dejando siempre libre el paso **abcd** para el tren de carga, pero en ningún caso deberá superar esas dimensiones. La posición relativa del tablero **ab** respecto al nivel de los apoyos **EF** puede variar, con la única limitación de que la suma de las cotas **a** y **b** tiene que sumar como máximo **c**. Las dimensiones son las siguientes:

$$c = AD \leq 450 \text{ mm} \quad AB = 1600 \text{ mm} \quad AA' \leq 2 \times 250 \text{ mm}$$

Nótese que los soportes (pilas, pilones, columnas, etc) debe estar por debajo de **EF**. Nótese también que la relación entre las dimensiones **a** y **b** es libre, con la única limitación de que su suma sea **AD**.

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 1600 mm 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 apoyar 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; 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, 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  $2 \text{ N/m}^2$ , 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.

### 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 proyecto 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 ello pueden emplearse cilindros de acero como cargas (que representan  $1,23 \text{ kN/m}^2$  tumbados en una capa; o  $6,78 \text{ kN/m}^2$ , verticales en cuadrícula de 20 mm). Esto es *highly recommended* en el estudio de las uniones de tirantes con el tablero.

3. Presentación pública del proyecto y crítica en asamblea (10' por equipo, 2h)
4. Construcción del diseño según las especificaciones del proyecto (8h+homework)
5. Rotura de la estructura construida (el tiempo que haga falta)
6. Entrega final en PDF

### Pistas

- **Las pesas son cilindros de acero.** 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 fueras 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: una par de cilindros podrían significar un problema “peor” por una posición asimétrica que muchos simétricamente dispuestos.
- **El tablero.** A parte de transmitir la carga de los cilindros hasta sus puntos de suspensión por los tirantes, tiene que resistir compresiones horizontales, precisamente, para que los tirantes puedan transmitir oblicuamente fuerzas iguales a los pesos. 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.
- **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.

Una posible fuente de inspiración será examinar diseños reales de puentes en arco 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).