

## Del laboratorio más simple al cyberorigami. PaperLab BlueBarcelona+Elisava, Noviembre 2009

Realmente está bien puesto el nombre: PaperLab.

Para quien no esté familiarizado, cuando se quiere probar un elemento estructural, por ejemplo de hormigón, se necesita un laboratorio que cueste mucho dinero y cuyo proceso suele demorarse meses entre una idea y el resultado experimental, y tan solo para analizar piezas sueltas. PaperLab ha demostrado resultar un magnífico laboratorio de ensayo, no solo para el material papel, sino de estructuras con él formadas a escalas muy interesantes, de una inmediatez entre la intuición de una forma y su materialización, solo entorpecida por la falta de práctica en el arte del origami.

Repasemos algunos de los resultados que se pueden concluir de los intensos cinco días de trabajo. Todos ellos son reflexiones abiertas. Abiertas a otras respuestas, pero más abiertas a nuevas preguntas.

### Nudos a compresión y a tracción

Muchos grupos han conseguido fabricar nudos que trabajan a compresión, y sin embargo ninguno ha sido capaz de materializar una unión que responda correctamente a esfuerzos de tracción.

El papel ordinario (sobre 80 gramos/m<sup>2</sup>) presenta una gran resistencia a la tracción en su plano. Es muy fácil realizar una prueba de tracción, pero queda limitado su alcance al método de unión: se necesita una hoja de papel y dos personas: una de ellas agarra la hoja de manera firme con ambas manos. La otra persona hace lo mismo por el extremo opuesto y tira de ella hacia arriba. En este punto, da la impresión de que la hoja va a soportar la carga (casi tracción pura) hasta que la hoja se rompa. Pero rápidamente se comprueba que pueden pasar dos cosas: si las personas que participan no son capaces de **agarrar** los extremos del papel de forma suficientemente firme, éste se **escurre** y no hay final de la prueba satisfactorio. Para una pareja de buenos agarradores, lo que sucede es que el papel se quiebra por alguno de los puntos en los que agarran los dedos, lo cual únicamente pone de manifiesto que ha habido una acumulación de tensiones localizadas en una mala unión.

Este resultado no abarca el límite de tracción que se puede esperar del papel. Lo que ha ocurrido es que se ha producido una grieta en la cual la superficie para repartir una determinada tensión tendió a ser infinitamente grande.

En este sentido, es interesante la experiencia del grupo que intentó construir una tela para realizar carpas u otras estructuras tensadas. Al principio del taller ya habían definido un prototipo de nudo, el cual no evolucionó casi nada en los siguientes días, con el único objetivo de conseguir que tuviese una buena resistencia a tracción: el elemento que construían era una malla de cuadrados simples de papel plano unidos por este nudo, de manera que la capacidad a tracción del papel no se aprovecha por estar limitada a la de los nudos.

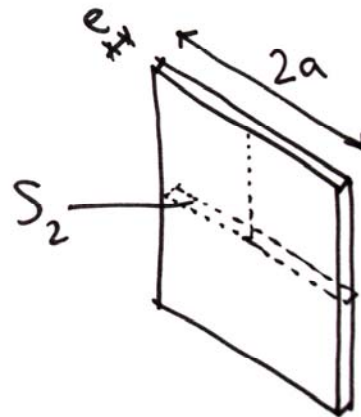
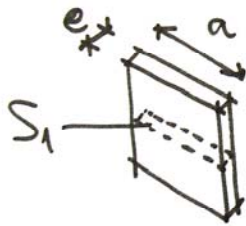
## El tamaño sí importa

Enunció Galileo Galilei en el siglo XVI: “La resistencia de cualquier estructura que puede hundirse por rotura de sus materiales no puede predecirse a partir de modelos o variando la escala de estructuras experimentadas perviamente”.

Según dicha ley, cuando el tamaño (volumen) crece al cuadrado, las tensiones (fuerza por unidad de superficie, la cual ha crecido sólo al cuadrado), lo hacen al cubo, pues la masa (fuerza) ha crecido al cubo.

En la totalidad de los grupos, hemos topado con estas limitaciones, comprobando que se acota la posibilidad de escalar sin límite cualquier modelo con cualquier material, y por eso lo que funcionaba en modelos pequeños, colapsaba al multiplicar su tamaño.

Veamos un ejemplo simple para el caso de una pieza de papel escalada al doble manteniendo el espesor constante ( $e$ ) y densidad constante ( $\gamma$ ).



Las tensiones para ambos casos serán:

$$\sigma_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{a \times a/2 \times e \times \gamma}{a \times e} = \frac{a \times \gamma}{2}$$

$$\sigma_2 = \frac{P_2}{S_2} = \frac{2a \times a \times e \times \gamma}{2a \times e} = a \times \gamma$$

Se comprueba que al aumentar la dimensión al doble, la tensión unitaria en el papel no se mantiene constante, sino que crece, en este caso al doble. Se puede verificar fácilmente que el aumento de la tensión en función de las dimensiones crece linealmente, confirmando la sentencia de Galileo y limitando la validez proporcional del estudio de modelos escalados.

## **Fatiga y fluencia**

Una constatación marginal es la aparición de la fatiga del material por manipulación: si para realizar una misma pieza la persona que lo hace se pasa más tiempo haciendo y deshaciendo pliegues, el papel se resiente superficialmente perdiendo rigidez en su plano.

La fluencia asomó tímidamente... la humedad del ambiente.

## **Hiperestabilidad o isostatismo de los modelos**

Cuando se construyen estructuras más o menos complejas, la relación entre los distintos elementos permite que el conjunto funcione de una o varias maneras: a esto se llama hiperestatismo. Isostatismo es cuando la estructura únicamente tiene una forma de responder a las solicitaciones.

Existe una máxima en la ciencia de las estructuras: cada elemento aguanta lo que puede aguantar. Parece una perogrullada, pero esconde el concepto de funcionamiento hiperestático.

## **Manipulando la rigidez**

El punto clave en lo que se refiere a análisis de comportamiento estructural, es la modificación de la rigidez de las piezas de papel. Es el ejercicio que se ha estado haciendo la mayor parte del taller.

Una simple hoja de papel solamente ofrece buena rigidez sobre su propio plano, con las limitaciones que ya hemos visto referentes a la dificultad de materializar las uniones sobre las que se transmiten las acciones y reacciones de esa tracción. Pero tanto a compresión como a flexión, el papel sin más manipulación, en su plano no ofrece ninguna rigidez. Por eso está muy bien contar con el pliegue, y el arte del origami nos sirve de guía en las vastas posibilidades del pliegue del papel.

Este pliegue se convierte en la estrategia para buscar, desde la intuición, la mejora de la rigidez. Es la principal herramienta de trabajo del laboratorio.

En este punto, es conveniente recordar que, de una forma simplificada, podemos hablar de distintos tipos de rigideces: axial, a flexión, a torsión. En caso del cortante para el papel es especial, y en el tipo de modelos con los que hemos estado trabajando, se manifiesta principalmente en el cortante que rompe una pieza en un punto de la unión por concentración de tensiones.

Ahora bien, este camino, dada la versatilidad de la realización de distintos modelos, debe ser experimental mediante el método del ensayo-error, a través de intuiciones que se van madurando para converger en una solución satisfactoria con una serie más o menos extensa de modelos. Al tratarse de elementos de geometrías complejas una vez se han realizado varios pliegues, desarrollar un modelo de cálculo manual resulta del todo inviable en un tiempo razonable. Modelizarlo con un programa de cálculo,

mientras no se invente un elemento que plasme las intuiciones en modelos numéricos, también resulta intratable en poco tiempo. Tan solo se me ocurre lógico un programa que modelice utilizando un papel virtual que vamos plegando como si de un cyberorigami se tratara.

Ante tanta complicación, démonos cuenta del valor añadido de este taller: un atajo entre la intuición y la modelización física.