Taller experimental 1

Construir y Romper Estructuras

Décima edición

1

POLITÉCNICA http://www.facebook.com/ticre/

Construir y romper estructuras

Una semana cargando estructuras hasta su fallo

alla maniera di Leonardo da Vinci

Si el lenguaje no es correcto, entonces no se dice lo que se quiere decir; si lo que se dice no es lo que se quiere decir, entonces no se hará lo que debe hacer; si lo que se tenía que hacer hasta queda sin hacerse, entonces la moral y el arte se deterioran; si la justicia se extravía, reina la confusión. Por eso no debe haber arbitrariedad en lo que se dice. Esto es lo más importante de todo.

CONFUCIO

—¿Pero por qué, entonces, no medimos el conocimiento de la misma manera?

—Y cómo? ¿Con cuestionarios? ¡No lo quiera Dios! ¡Habrá que darles notas más altas al estudiante que pueda contestar las preguntas de mayor amplitud? ¿O tendría que haber distintas clases de notas para cada tipo diferente de preguntas?

—¡Ah! ¡Muy bien! Haríamos así, y luego sumamos todas las notas y hago...

—¡Sí!... ¿No podemos sumarlas? Podríamos multiplicarlas o dividir una clase de nota por otra, pero no podemos sumarlas.

—¿Y por qué no, papá?

—Porque... ¿porque no podríamos? No me extraña que no te guste la aritmética si no te enseñan estas cosas en la escuela... ¿Qué demonios te enseñan entonces? ¿Para qué creerán tus maestros que sirve la aritmética?

—¿Y para qué sirve, papá?

—La aritmética es un conjunto de trucos para pensar con claridad, y la única gracia que tiene es la claridad. Y lo primero que hay que hacer para ser claro es no mezclar ideas que son realmente diferentes unas de otras. La idea de dos manzanas es realmente diferente de la idea de dos kilómetros. Y si las sumas, lo único que obtendría es una bruma en tu cabeza.

GREGORY BATESON, 1953

Cuando la precisión numérica entra por la puerta, el rigor conceptual huye por la ventana.

EDSAGER DIJKSTRA

ORGANIZA giau+s(UPM) PATROCINA giau+s(UPM)

http://hablemos.aq.upm.es/?departamento=ficha&id=1 http://hablemos.aq.upm.es/p/ http://www.youtube.com/ http://www.youtube.com/

2

POLITÉCNICA http://www.facebook.com/ticre/

Construcción

La arquitectura abarca como en un círculo todos los saberes
Todos los hombres y no sólo los arquitectos están en condiciones de juzgar lo bueno

VITRUVIO

La composición arquitectónica se basa en el factor del tiempo, tanto para las funciones físicas como para la experiencia psicológica. Con el tiempo como principal factor, la arquitectura podría definirse como *expresión espacial de la vida humana y de su experiencia en el tiempo.*

El equilibrio de masas es un arte complejo. Presenta un aspecto físico e igualmente un aspecto visual. Y cualquier atributo de uno de los dos aspectos influirá en el estado del otro. El principio básico del equilibrio físico parece ser la provisión de una amplia resistencia contra las posibles cargas.

Una sección sólida en una pieza implica tensión, el canto sugiere una mejor resistencia a la flexión, y las dos piezas que actúan sobre una junta pueden significar una única fuerza. En resumen sabemos que la construcción no es únicamente estructura. La *construcción* no tangible pero no necesariamente no lo que aparenta. La *estructura* es intangible y nunca se hace completamente manifiesta.

La investigación de la estructura por contraposición a la de la construcción nos mostrará que básicamente la creación de todas las construcciones arquitectónicas existentes está basada en un simple principio: la provisión del mínimo material disponible a fin de resistir el máximo de cargas posibles. Mientras que los métodos de construcción cambian, los principios estructurales siguen siendo los mismos.

El espacio fáctico apela a un fac-tor de seguridad en la estructura. Todas las juntas, todas las luces, y todos los edificios están diseñados sobre esa base. La previsión para lo intangible y las cargas imprevistas en la estructura física están casi siempre exageradas pero el ser humano cuenta con esa provisión de reserva de manera que pueda vivir en el espacio sin temor.

Dándose cuenta de que el destino final de lo rígido es la fragilidad, Lao-Zi es consciente del no-ser de las cosas.

AMOS IN TAO CHANG, *El Dao de la Arquitectura*, 1956.

ORGANIZA giau+s(UPM) PATROCINA giau+s(UPM)

http://hablemos.aq.upm.es/?departamento=ficha&id=1 http://hablemos.aq.upm.es/p/ http://www.youtube.com/ http://www.youtube.com/

3

POLITÉCNICA http://www.facebook.com/ticre/

Estructura

Marco Polo describe un puente pénlela a pédra.
Pero, ¿cuál es la piedra que sostiene el puente? —pregunta Kublai Kan.
El puente no está sostenido por esta o aquélla piedra, —responde Marco— sino por la línea del arco que forman.
Kublai Kan queda silencioso, reflexionando. De repente, dice:—¿Por qué me hablas entonces de las piedras? Es sólo el arco lo que me importa.
Polo responde:— Sin piedras no habría arco.

ITALO CALVINO

Para entender el comportamiento estructural el primer paso es conocer qué problemas intentamos resolver. Son muchos, pero hay tres básicos.

Resistencia

Los objetos deben poder resistir sin romperse los fenómenos físicos que resultan del uso previsto. El suelo de un cine no debe hundirse cuando la "peli" tiene éxito y la sala se llena.

Rígidez

Pero no basta con que el artefacto resista: *tiene que parecer que lo hace*, y que lo va a hacer ante futuras contingencias, sin causar duda alguna a las personas que lo usan. El criterio fundamental aquí es que el objeto no se deforme, que preserve su identidad formal. Pero *¿qué* como muestran las estructuras llevadas al colapso, para resistir las cargas tienen que deformarse. Es una paradoja aun. Como no podemos evitar toda deformación (la segunda ley de la termodinámica también rige aquí), en los edificios nos contentamos con que la deformación sea imperceptible para las personas que los habitan.
Las estructuras "pedagógicas", aquellas que resisten pero con deformaciones apreciables, sirven sobre todo para ver que la resistencia exige deformación y que la rigidez exige deformación imperceptible. Estas estructuras sirven para dar clase, no para construir edificios

Estabilidad

Puesto que la perfección no existe, los dos requisitos anteriores deben cumplirse incluso si se dan finalmente pequeñas variaciones respecto de las previsiones del proyecto: si la columna no quedó totalmente vertical, ... si la viga no quedó totalmente recta, y presenta ligeríssimas alabeos, ... si los vientos se hacen algo más fuertes por la mayor energía que almacena la atmósfera en estos tiempos, ... etc, la estructura debe seguir lejos de la rotura, y seguir aparentando que es forma sigue siendo la del primer día. (Como sistema físico, la estructura de un edificio debe evitar que se comparte de un modo caótico, mecánicamente debe tratarse de algo previsible. Al revés que muchos divertidos juguetes.)

ORGANIZA giau+s(UPM) PATROCINA giau+s(UPM)

http://hablemos.aq.upm.es/?departamento=ficha&id=1 http://hablemos.aq.upm.es/p/ http://www.youtube.com/ http://www.youtube.com/

4

POLITÉCNICA http://www.facebook.com/ticre/

DolmenD

DolmenD fue sugerido por los dólmenes de cualquier época, o como el de Dali en plaza en Madrid (amque su diseño—el de la figura— era más atrevido y los "técnicos" pusieron las columnas verticales, tal y como las de DolmenD). Dólmen en lectón significa gran mesa de piedra).

El puente no está sostenido por esta o aquélla piedra, —responde Marco— sino por la línea del arco que forman.

Kublai Kan queda silencioso, reflexionando. De repente, dice:—¿Por qué me hablas entonces de las piedras? Es sólo el arco lo que me importa.

Polo responde:— Sin piedras no habría arco.

ITALO CALVINO

Geometría para la construcción del dolmen. Incluye las columnas a cargar (amarillas), más tres columnas de seguridad (azules) para evitar la caída de las pesas cuando se produzca el fallo...

Capitel de las columnas: un trozo de tubo abierto mediante un corte y pegado con cola blanca y cinta de pintor al baste.

Basa de las columnas: dos trozos de tubo abiertos mediante un corte y pegados con cola blanca. Los cortes están diametralmente opuestos.

La mesa (o losa de cubierta): en ella se apoyarán las pesas para aumentar la carga: el dintel o losa del dólmen.

El apoyo para la prueba de carga es "mejor: estructura que DolmenD: está arriostrada por planos verticales. Los dólmenes tradicionales se arriostraban inclinando los soportes e hincándolos en el suelo.
Prueba inicial. En equilibrio bajo el peso de 30kg adicionales. Las columnas se apoyan sobre la base, y la mesa de carga se apoya sobre las columnas. No se usó adhesivo. Una plomada permite asegurar que la carga está centrada.
DolmenD expresoto: La masa total es de 4,58kg, de la que solo 0,37kg corresponde a las columnas, siendo la masa más importante la de la losa (lo normal). El apoyo solo empezará a soportar carga cuando el dólmen se mueva del orden del centímetro, ya sea en vertical como en horizontal, momento en el que se considera que la estructura ha fallado (es decir, no puede seguir resistiendo sola nuevas cargas). ¿Aguantará la estructura el peso de los 600kg de que disponemos en forma de pesas de acero? O ¿fallará antes la ligera mesa metálica que sirve de "suelo" al conjunto? Veremos.

ORGANIZA giau+s(UPM) PATROCINA giau+s(UPM)

http://hablemos.aq.upm.es/?departamento=ficha&id=1 http://hablemos.aq.upm.es/p/ http://www.youtube.com/ http://www.youtube.com/

5

POLITÉCNICA http://www.facebook.com/ticre/

CerchaTQ

1896 Leonardo Torres Quevedo, un Spanish engineer, patenta a system for an aerial cableway.
1904 Anthony George Maldon Mitchell, an Australian engineer, publishes the article titled "The Limits of Economy of Material in Frame-structures", now considered a milestone of the theory of optimal structural design.
1907 Torres Quevedo designs and builds the Monte Ulia aerial tramway in San Sebastián.
1914 Torres Quevedo designs and builds the Spanish Aerocar, over the Niagara River, with a very similar solution to that of San Sebastián. It is in operation since 1916 with no mishap.
1956 The work of Michell, unnoticed since its publication, becomes is be known thanks to the works of R. L. Cox and W. S. Hemp.

CARGA MÁXIMA: Structural efficiency variation with the problem size in some building problems. 2005, PhD Thesis

Intentamos emular el esquema del cuerpo del Spanish Aerocar, una estructura de doble cuerda y satisfactoria instalación. Para simplificar hemos reducido el número de tirantes a seis.

Unión arco/tirante: ejercicio ¿por qué y cómo se ha tenido es manifiestamente mejorable?

Detalle del apoyo (que no es ejemplo de buen diseño)

Cast todas las piezas recortadas y preparadas

El anillo de carga acabado.

Sin acabar, bajo un peso: peso (4N) y una carga útil de 10N: se aunevo

Vista lateral a falta de terminar el anillo de carga

Los contendores de la ET-SAM son una fuente de inagotables recursos (se recuerran de sin en día). En este caso, hemos ido a por un tetra cuando de la mas ma lus (agua) que muestra CerchaTQ. Cada una tiene una masa de 313g, frente a los 577g de cartón, cola blanca y un peso de fosas de CerchaTQ. ¿Cual resistirá más carga antes de fallar?

ORGANIZA giau+s(UPM) PATROCINA giau+s(UPM)

http://hablemos.aq.upm.es/?departamento=ficha&id=1 http://hablemos.aq.upm.es/p/ http://www.youtube.com/ http://www.youtube.com/

6

POLITÉCNICA http://www.facebook.com/ticre/

CerchaCO

"Llevaba varios días pensando en algo que se pudiera hacer con papel para el taller de estructuras de primero, y esta mañana he hecho una primera pequeña cercha de papel recortando simplemente de un A4 el dibujo que os mando."

"Sé que no es gran cosa, pero para ser tan ligera ha soportado un peso importante para ella. Os mando una foto. Creíla que es interesante preparar cosas así para el taller?"

Con dos de ellas y un poco de cinta adhesiva se fabricó este modelo 3D. En la imagen, equilibrando la mayor carga que pudo soportar antes de "escaparse". Gracias a ello puede verse en la mesa de "estructuras variadas".

Los apoyos estaban mal concebidos y ejecutados...

Con las lecciones aprendidas de la experiencia se fabricó esta segunda versión, CerchaCO

ORGANIZA giau+s(UPM) PATROCINA giau+s(UPM)

http://hablemos.aq.upm.es/?departamento=ficha&id=1 http://hablemos.aq.upm.es/p/ http://www.youtube.com/ http://www.youtube.com/

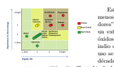
7

POLITÉCNICA http://www.facebook.com/ticre/

Materia (I)

La resistencia y la rigidez dependen de dos aspectos que pueden, hasta cierto punto, estudiarse por separado al ser complementarios: los materiales estructurales empleados y las formas que construimos con ellos.
Por muy resistente o rígido que sea un material, una forma estructural inadecuada dará lugar a un fallo mecánico o a un quebranto económico (debido a que será necesario complementar la ineptitud de la forma con una mayor cantidad de material). Y por muy dúfil que sea un material siempre puede idearse alguna forma de construir un objeto resistente, incluso llegando a gastar energía durante su uso", como en las estructuras neumáticas, sostenidas por un aire interior a "altas presiones".
Aquí hemos empleado en casi todos los casos materiales de desecho, sin procuparnos siquiera de saber algo de su resistencia (que en algún caso hemos medido después). Copiamos esta actitud de la arquitectura vernácula que, en definitiva, siempre ha sido la arquitectura de lo disponible en cada espacio y tiempo. Este recurso no mira sin embargo al pasado, sino a la resolución de los problemas presentes y futuros de escasez de minerales dúfiles (la sociedad actual se sustenta en su extracción —exponencialmente creciente— y, en consecuencia, provocará su escasez e ingrediría su uso).

"Ahora hay puentes colgantes con "aire acondicionado" a fin de evitar grandes alargamientos de sus catenarias, debidos simultáneamente a un gran tamaño y a la variación de temperatura— que se producirá en acondicionamiento activo. Hacia el siglo XIX, las estructuras habían sido los elementos pasivos por antonomasia. Veremos que nos depara el futuro.



Esta tendencia hacia el agotamiento surge donde menos se espera. Por ejemplo, las nuevas y "permanentes" panelles fotovoltaicas de película fina demuestran un extraordinario rendimiento pero han de recurrir a ónidos y compuestos de substancias tan raras como el indio o el galio, de manera que la generalización de su uso se topará con un "fin de las existencias" en pocas décadas. "If photovoltaic technology is going to become more competitive, it will need to be based on the more abundant elements, such as silicon and iron sulphide (pyrite)" (Valero & Valero, Thanatia: the destiny of the Earth's mineral resources: a thermodynamic cradle-to-cradle assessment, 2014). Lo mismo cabe decir de los nuevos modelos de aerogeneradores basados en imanes permanentes, cuya fabricación requiere la extracción de minerales más raros aún ("neodymium-iron-boron with dysprosium, or other rare earths (REE) like praseodymium ($Nd_2Fe_{14}B$ as basic formula)", op. cit.).
La comparación entre las estructuras CerchaTQ y YigaT mostera que el mismo problema puede resolverse con acero (cada tirante [y el cinc, como el cobre y otras substancias, es otro de los metales cuyo suministro será problemático a corto plazo, sin llegar a ser crítico como es el caso del galio o el tiofeno, op. cit., p. 19], pero también con cartón. Habrá que averiguar, usefir, cuánto más cartón hará falta para alcanzar la misma carga que con acero (si es el caso, lo veremos). Pero en la ETSAM, con el cierre en marcha, se tiran a la basura buenas cartones, aptos para construir estructuras, los martes y los jueves de tarde. También hay bambú —que hay que conseguir y secar con tiempo por delante...

ORGANIZA giau+s(UPM) PATROCINA giau+s(UPM)

http://hablemos.aq.upm.es/?departamento=ficha&id=1 http://hablemos.aq.upm.es/p/ http://www.youtube.com/ http://www.youtube.com/

8

POLITÉCNICA http://www.facebook.com/ticre/

Materia (II)

Como cabe esperar que el anterior argumento sea considerado "alarmista" por aquello del reciclaje, conviene aclarar que el reciclaje en marcha es "más de lo mismo": reciclar requiere energía, nuestras fuentes de energía siguen consumiéndose minerales, por tanto reciclando seguiremos aumentando su consumo. En la imagen puede verse a un hombre sosteniendo el mismo la hamaca en la que reposa, en obvio para cualquiera que se trata de una fantasía, que la segunda ley de la termodinámica prohíbe tal cosa. Si esto es obvio en el caso de las estructuras, ¿por qué no resulta obvio a cualquiera que resolver los actuales problemas ecológicos sin cambiar nuestra organización económica y social también es imposible por la misma razón? Un materio de difícil solución. Puede esbozarse un intento de respuesta.

En el fondo, se trata de nuestra voluntad. De nuestra implicación. No puede construirse un mundo diferente con una sociedad indiferente.

Con los dones de Atenea y Hefesto, recibió el ser humano la solidaria necesaria para conservar su vida: pero no recibió la solidaria política, para ésta se hallaba en poder de Zeus, a cuya acrópolis no tuvo acceso Prometeo. Por ello, cuando los hombres trataron de vivir unidos pues no eso amajedados por los fieros, comenzaron a ultrajarse entre sí, y a punto estuvieron de ser exterminados por falta de la política necesaria para vivir en ciudades. Zeus temeroso de que perecieran, ordenó a Hermes que entregara a los hombres la vergüenza y la justicia.

Aidós y Díke—el sentido de la vergüenza y el de la justicia—son el fundamento de la mara virtud imprescindible para la convivencia de la polis: la virtud política.

Díke, la Justicia, es una fuerza interna y externa a la vez, una voluntad que trata de imponerse sobre el abuso y la desigualdad, una violencia que hay que ejercer sobre otros o sobre uno mismo para dar a cada cual lo que merece.

En cambio, *Aidós*, la Vergüenza, es una fuerza únicamente interna, el compromiso ético que cada individuo guarda con el bien.

La idea de que el sentido de la justicia y de la ética fueron repartidos a todos para que todos pudieran acometer a alcanzar la felicidad (lo fundamental al ser humano) es el origen de la democracia: la única forma de organización política que se ajusta a la naturaleza del conjunto de la sociedad compuesta en portada. Pero, ¿es de tal solución? No es otra cosa que el cultivo adecuado de uno dos—la virtud política—a través de un proceso voluntarioso, imperioso, constante, individual y colectivo que los griegos dieron en llamar paideia.

La paideia—traducciónado por 'educación'—no es una simple instrucción para salir adelante en la vida, sino una formación profunda para alcanzar a distinguir lo bueno, lo justo, lo que da sentido, lo que justifica nuestro esfuerzo.

FERMÍN OLAZA, *Gaceta en el aire*, 2015.

Si volvemos al presente, y observamos como la publicidad —el engaño y la mentira almadas a la categoría de un arte legalmente permitido y consentido, cuando no promocionado con fondos públicos— ha ido penetrando en todas las esferas, incluyendo la universitaria vía el "Pacto de Bolonia", quizás podamos llegar a entender como la Desvergüenza y la Injusticia se han generalizado, impidiendo en tantos casos distinguir lo que es posible de lo que no, impidiéndonos simplemente ver lo obvio.

ORGANIZA giau+s(UPM) PATROCINA giau+s(UPM)

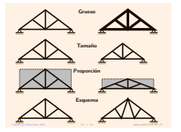
http://hablemos.aq.upm.es/?departamento=ficha&id=1 http://hablemos.aq.upm.es/p/ http://www.youtube.com/ http://www.youtube.com/

9

POLITÉCNICA http://www.facebook.com/ticre/

Forma

Aunque algunas propiedades de una forma se describen mejor con un geometría, y otras con un topología, para analizar todas la eficacia como un rendimiento en cuanto forma de una estructura, trae cuenta en considerarla compuesta de cuatro propiedades: tamaño, proporción, esquema, y grueso.



tamaño: al comparar formas semejantes, variando la escala de sus respectivos dibujos, pueden superponerse. Lo único que las diferencia es algunas longitud fundamental, como la luz de las vigas o la altura de las torres. Esa longitud es el **tamaño**.

proporción: mediante transformaciones afines en la dirección perpendicular que nulo el **tamaño**, obtenemos formas afines de igual **tamaño**, pero no semejantes, que podemos diferenciar por la diferente proporción de los rectángulos en que podemos inscribirlas. Esa **proporción** se denomina indistintamente **esbeltez**.

esquema: al mediante transformaciones afines tanto en la dirección del **tamaño**, como en la dirección perpendicular podemos hacer coincidir dos formas distintas, decimos que tienen el mismo **esquema**.

grueso: dada una forma con **tamaño**, **proporción** y **esquema** definidos, solo tenemos de ella un dibujo de puntos y líneas. Para *materializar* una estructura y construirla asignaremos un volumen material a puntos y líneas. Según mesmos más o menos volumen, tendremos una estructura más o menos **gruesa**. (La definición del grueso estructural o dimensionado o, peor, *dimensionamiento*, ocupa la mayor parte de los currículo de enseñanza de la teoría de estructuras. Sin embargo, con un buen esquema, proporción y tamaño, el grueso es una propiedad de poca importancia, cuya variación tan sólo permite variar casi-proporcionalmente la capacidad de carga de la estructura, pero apenas influye en su rendimiento, dando por supuesto que es eficaz.)

ORGANIZA giau+s(UPM) PATROCINA giau+s(UPM)

http://hablemos.aq.upm.es/?departamento=ficha&id=1 http://hablemos.aq.upm.es/p/ http://www.youtube.com/ http://www.youtube.com/

10

POLITÉCNICA http://www.facebook.com/ticre/

Tamaño

GALILEO en su *Diálogo* de dos nuevas ciencias publicado en 1638 para poner en cuestión las reglas de proporción utilizadas en construcción, hace la observación de que el aumento de tamaño hace crecer las secciones y por tanto la resistencia con el cuadrado de la razón de semejanza, mientras que el volumen, y por tanto la masa crece con el cubo, razón por la cual "los gigantes no pueden haber existido" (en términos actuales decimos que las tensiones debidas a la propia masa varían linealmente con el tamaño).

Está claro que la ley de los cubos y los cuadrados pone un límite superior al tamaño de cualquier ente animado o inanimado, pero ¿qué pasa cuando reducimos en lugar de aumentar?

La masa disminuye más deprisa que la resistencia, lo que proporciona un excelente de dida. marce en cuanto mayor sea el factor de reducción.

Galileo probó que los gigantes no podían haber existido [al menos atenéndose a la descripción popular de su aspecto], pero ¿y los enanos? La pista del tamaño nos la proporciona la canción ... Soy siete veces más fuerte que tú ... es decir, un factor de reducción 7 (unos 25cm. de estatura) produce un hormiguito capaz de cargar con 7 veces su propio peso, pero podemos ir no, poco más lejos en determinar su capacidad atlética.

El impulso que proporcionan los músculos depende no de su sección sino de su volumen, por lo que guardaría la misma proporción con su masa que la de un ser humano, por lo que el gnomo podría correr y saltar a la mismas velocidades que una persona normal, lo que dado su tamaño produciría una impresión duradera a cualquier observador.

La extraordinaria fuerza unida a la desmedida agilidad son las características que el folclore atribuye a los gnomos, y dado que el análisis dimensional no está entre las disciplinas de la sabiduría popular, es más probable que las cualidades atribuidas a los gnomos sean consecuencia de observaciones reales que una invención, por lo que podríamos completar la frase de Galileo:

Los gigantes no pueden haber existido pero los gnomos no sólo pueden sino que probablemente existen

El rico de serie 3 y/o de gérnes fantásticos ha dado algunos ejemplares de gnomos, como el que se ve en la Ascensión Mendoza Mata (1957), en el que el manguardo protagonista, el conservar su proporción y esquema general, no habiera tenido mayor problema en desenfundar su espada ante cualquier amenaza y terrorífico asalto, al ecoo de lo que ha sido el destino.
The Amazing Colossal Man se estiró y quiso ser más ancho que alto, y de nuevo ignoró el portrabajo de Galileo. Pero, ¿qué pasa cuando reducimos en lugar de aumentar? ¿Aparte con una forma proporcional a la nuez, [y con la misma agilidad que una persona corriente.
Lo que pasa es que, al reducir, aumenta la tensión superficial, ¿por qué habría de cumplir con los portrabajo de la Gal Cocoro? This is just *cine!*

RICARDO ARCOS, 2016

ORGANIZA giau+s(UPM) PATROCINA giau+s(UPM)

http://hablemos.aq.upm.es/?departamento=ficha&id=1 http://hablemos.aq.upm.es/p/ http://www.youtube.com/ http://www.youtube.com/

11

POLITÉCNICA http://www.facebook.com/ticre/

Proporción

La proporción es, junto con el esquema, el aspecto de la forma más influyente en su comportamiento, siendo esa influencia no lineal.

Consideremos la cerchas palladianas de la figura de proporción 2:3, en la que cada ángulo recto se divide en tres (puede hacerse en dos, o cuatro, cinco, etc). Usualmente, este tipo estructural recibe cargas en las uniones superiores, y se apoya en los extremos inferiores, con o sin vuelo (pues apoye sin alero, por ejemplo).

Considerando un esquema, y que, para cada proporción, el grueso de las piezas es el estrictamente necesario para soportar las cargas con margen, las puede variciar, tras algunos cálculos, como varía la deformación obtenida con la proporción o esbeltez. Cualquier otra solución, más gruesa, se deformará menos si se trata de las mismas cargas.

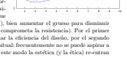
Recuérdese que el requisito de rígidez exige que esa deformación sea pequeña, apenas perceptible por el ojo humano. Comparando en cada caso la deformación obtenida con la máxima que puede tolerarse, podemos decidir en que margen de proporciones el esquema planteado suministra diseños seguros, rígidos y estéticos (con la menor cantidad posible de material).

En la gráfica inferior se representa todo eso. La horizontal verde representa la máxima deformación tolerable (en el eje de ordenadas). La esbeltez queda representada en el eje de abacisas. Las gráficas roja y azul representan la deformación para cada esbeltez en el caso del acero y la madera corrientes.

Con una esbeltez 2 (una estructura el doble de larga que alta) se obtiene la máxima deformación. Mirando hacia la derecha de ese óptimo, ambas gráficas se van pareciendo a una recta cuanto más a la derecha: para esbelteces grandes, la deformación crece proporcionalmente a la esbeltez (agrea).

Pero *¿qué?* Si para disminuir la deformación reducimos la esbeltez, acabaremos por pasar a la izquierda del óptimo, con deformaciones crecientes según la esbeltez disminuye.

Los buenos diseños, por tanto, se encuentran para esbelteces modernadas: como entre 1 (la cercha se inscribe en un cuadrado) y 4 (la altura es la cuarta parte del tamaño). Y es eso lo que ha conseguido la ingeniería, para asegurar también la rígidez.



¿Debera prohibirse las esbelteces mayores que 4 o menores que 1? No es imprescindible. Si se quiere una estructura con proporción "fuera de la razonable" caben dos posibilidades adicías: bien buscar un esquema que funcione mejor (variar la forma estructural), bien aumentar el grueso para disminuir la deformación (siempre que con eso no aumente la esbeltez). Por el primer camino se conseguirá normalmente aumentar la eficiencia del diseño, por el segundo disminuirla. Este conflicto es tradicio de hablitual: frecuentemente no se puede mejorar a tener lo mejor de todo. Hay que elegir, y de este modo la estética (y la ética) re-entran en algo que parecía "puro cálculo".

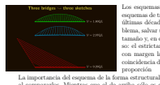
ORGANIZA giau+s(UPM) PATROCINA giau+s(UPM)

http://hablemos.aq.upm.es/?departamento=ficha&id=1 http://hablemos.aq.upm.es/p/ http://www.youtube.com/ http://www.youtube.com/

12

POLITÉCNICA http://www.facebook.com/ticre/

Esquema y proporción



La importancia del esquema de la forma estructural puede ponerse de manifiesto al compararlos. Mientras que el de arriba solo es capaz de soportar 5 veces su propio peso (siendo el más esbelto), el de abajo sólo es capaz de soportar ¡**20 veces de su propio peso!** (a pesar de ser el menos esbelto de los tres)".

Los esquemas de la figura representan los esquemas de tres puentes construidos en las últimas décadas. Resuelven el mismo problema, salvar un "abismo", tienen el mismo tamaño y, en cierto sentido, el mismo grueso: el estrictamente necesario para resistir con margen las cargas previstas. Se da la coincidencia de que tienen también distinta proporción

Pero si comparamos el rendimiento de estos puentes parece que pueden ser muy distintos. Mientras que el de arriba solo es capaz de soportar 5 veces su propio peso (siendo el más esbelto), el de abajo sólo es capaz de soportar ¡**20 veces de su propio peso!** (a pesar de ser el menos esbelto de los tres)".

Bridge:	Scale:	L: Esquema:	Proportion:
Tiers:	3 tiers	2 tiers	3 tiers
Original design:			
Maximum span (m):	3.81	2.79	1.16
Model's number (°/ 12):	0.40	0.29	0.12
Model's scale factor:	1:9.53	1:9.61	1:9.67
Station one (j-jaragua):			
Maximum span (m):	2.57	1.47	15.1
Inflaggy, (°/ 12):	0.57	0.0	15.1
Optimum slenderness design:			
Maximum span (m):	1.99	1.37	5.60
Model's number (°/ 12):	0.44	1.95	1.0
Model's scale factor:	1:9.53	1:9.61	1:9.67
Station one (j-jaragua):			
Maximum span (m):	2.57	1.24	2.87
Inflaggy, (°/ 12):	0.57	1.0	1.87

Los esquemas de la figura representan los esquemas de tres puentes construidos en las últimas décadas. Resuelven el mismo problema, salvar un "abismo", tienen el mismo tamaño y, en cierto sentido, el mismo grueso: el estrictamente necesario para resistir con margen las cargas previstas. Se da la coincidencia de que tienen también distinta proporción

La proporción del esquema de la forma estructural puede ponerse de manifiesto al compararlos. Mientras que el de arriba solo es capaz de soportar 5 veces su propio peso (siendo el más esbelto), el de abajo sólo es capaz de soportar ¡**20 veces de su propio peso!** (a pesar de ser el menos esbelto de los tres)".
En realidad, ninguno de los tres tiene la mejor de las proporciones. El de arriba, con un buen esquema de partida, al mejorar la proporción pasa a poder soportar 10 veces su propio peso, pero su altura debería multiplicarse por tres. Si esto parece un inconveniente notable, paciencia. El de abajo, al mejorar su proporción, sería capaz ahora de aguantar la mitad de su propio peso, pero a costa de cuadriplicar su altura.
Con las proporciones óptimas, el de arriba ¡Es realidad, ninguno de los tres tiene la mejor de las proporciones. El de arriba, con un buen esquema de partida, al mejorar la proporción pasa a poder soportar 10 veces su propio peso, pero su altura debería multiplicarse por tres. Si esto parece un inconveniente notable, paciencia. El de abajo, al mejorar su proporción, sería capaz ahora de aguantar la mitad de su propio peso, pero a costa de cuadriplicar su altura.
Con las proporciones óptimas, el de arriba ¡Es realidad, ninguno de los tres tiene, siendo a la vez resistente y rígido.
¿Qué hace tan bueno un esquema y tan malo a otro? El transporte. Se puede ver que las líneas del esquema de arriba llevan las cargas a los apoyos lo más directamente posible. En el de abajo, parte de la carga parece solo poder ir muy al interior de la orilla opuesta, para tener que desandar camino y llegar a su apoyo en una misma orilla.

"Si el puente en China lo encuentra a algunos en España, está en lo cierto. En China se copió el puente de El Alamillo de Sevilla (CALATRAVA, 1992) décadas después de que dicho ladrero tendo que ser reparado ¡**dos veces, dos!** No se trataba de copiar el puente, se copiaba el modelo de negocio: un puente menos eficiente se atraque más caro y se vea a ponerarlo en tu comisión. ... pues eso.

ORGANIZA giau+s(UPM) PATROCINA giau+s(UPM)

http://hablemos.aq.upm.es/?departamento=ficha&id=1 http://hablemos.aq.upm.es/p/ http://www.youtube.com/ http://www.youtube.com/

13

POLITÉCNICA http://www.facebook.com/ticre/

Rendimiento en carga

Hay muchos aspectos importantes a considerar en una ciudad, un edificio, una construcción, ... y en la estructura que los sostiene. Pero hay dos, que aún ser siempre los más importantes, son por los que hay que empezar, tanto cuando se proyecta una estructura como cuando se sometc a juicio estético.
Una estructura tiene que cumplir su cometido, tiene que ser eficaz. Si no es el caso, cualquier otra consideración o cálculo, por sofisticados que sean, carece de sentido. **"Resistencia, rigidez, estabilidad!"** es el mantra aquí.
Una estructura tiene que ser eficiente, es decir, ser eficaz sin un coste—físico, se entiende, ¡nada de euros aquí!"— desorbitado.
Siguiendo la definición del rendimiento energético de la termodinámica, suele usarse como medida de la eficiencia o rendimiento el siguiente cociente:

$$\text{rendimiento en carga} = \frac{\text{carga útil soportada}}{\text{carga propia de la estructura + carga útil soportada}}$$

El inverso del rendimiento es, simplemente, el coste. El rendimiento *siempre* es menor que la unidad—algo que siempre pasa, en cualquier faceta de la vida, si las cuentas están bien hechas: no existe el móvil de movimiento perpetuo—, y el coste mayor que ella.
Cada tamaño requiere un gasto mínimo para resolver cualquier problema estructural—que sea resoluble, claro—. Cualquier estructura costará más que eso—¡la perfección no existe!— Ésa ocasiones, aspectos no estructurales pueden justificar incrementar el coste de una solución a fin de alcanzar otros objetivos. En general, incluso en este último caso, el diseñador puede especular con cambios de esquema y/o proporción, de manera que el coste no se dispare. Por ello, en general y para tamaños menores que la dichosa pared del tamaño inmoperable del postulado de GALILEO, una buena estructura nunca requiere costes superiores a 2, es decir, al menos será capaz de soportar una carga de uso superior a dos veces su propio peso. Siempre hay excepciones: por ejemplo el *David* de MIGUEL ÁNGEL sólo se soporta a sí mismo (y con problemillas), pero ¿se trata del *David* y de MIGUEL ÁNGEL?

"Ninguna unidad monetaria fijaría entre aquellas del Sistema Internacional de Unidades, si se empeva que lo hagan nunca: hay quien con ellas pretende medir algunas cosas, pero de trata de pseudomagnitudes, pues las que no existe protocolo de medida.

ORGANIZA giau+s(UPM) PATROCINA giau+s(UPM)

http://hablemos.aq.upm.es/?departamento=ficha&id=1 http://hablemos.aq.upm.es/p/ http://www.youtube.com/ http://www.youtube.com/

14

POLITÉCNICA http://www.facebook.com/ticre/

¡Hagan sus apuestas!

Muchas de las situaciones reales son tan complicadas que no pueden ser representadas completamente por un modelo matemático. De la misma manera, en las estructuras existen a menudo varias posibles formas de rotura. Naturalmente, la estructura rompe de la forma *en la que nadie había pensado, por muchísimo número que se hagan hacho*.

J. E. GORDON, Structures or Why things don't fall down, 1978

En una esquina de la "ciudad probilda" de esta exposición hay ejemplares del boleto de apuestas, incluyendo las condiciones legales. Se trata de adivinar de qué modo y con cuánta carga adicíos nal fallarán algunas de las estructuras expuestas. **El boleto es gratuito y puede hacerse una nueva apuesta tras cada nuevo ciclo de carga.**
Una estrategia, que no es pólima, cons