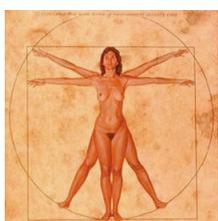




# Construir y romper estructuras

Una semana cargando estructuras hasta su fallo  
*alla manera di Leonardo da Vinci*



Vitruvius Woman



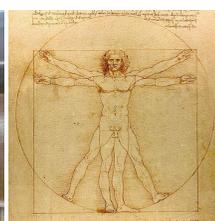
DolmenD



CerchaC0



CerchaTQ



Vitruvius Man

*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 pretende, entonces no se hace lo que se tenía que haber hecho; si lo que se tenía que haber hecho 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 pregunta?

—¡Ah! ¡Muy bien!. Hagámoslo así, y luego sumemos todas las notas y luego...

—¡No!... ¡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 crearán 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 naranjas es realmente diferente de la idea de dos kilómetros. Y si las sumas, lo único que obtendrás es una bruma en tu cabeza.

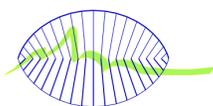
GREGORY BATESON, 1953

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

ENRIQUE ESPÍ, 1992

ORGANIZA

PATROCINAN



giau+s<sub>(UPM)</sub>



<http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/>

<http://habitat.aq.upm.es/gi/>

<http://www.cervezalamorena.com/>



Construcción



Rotura





# 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 ente compuesto. 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* es tangible pero no necesariamente es 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 físico apela a un factor 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.

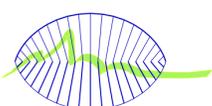
Dándose cuenta de que el destino final de lo rígido es la fragilidad, Lao-Zi es consciente del no-ser de las cosas.

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

Lotus Riverside (Sanghai, 2009)



ORGANIZA



<http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/>

PATROCINAN



giâu+s<sub>(UPM)</sub>

<http://habitat.aq.upm.es/gi/>



<http://www.cervezalamorena.com/>





# Estructura

Marco Polo describe un puente piedra a piedra.

Pero, ¿cuál es la piedra que sostiene el puente? —pregunta Kublai Kan.

El puente no está sostenido por esta o aquella 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 “pelí” tiene éxito y la sala se llena.

## Rigidez

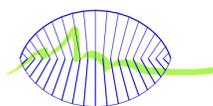
Pero no basta con que el artefacto resista: *tiene que parecer que lo hace*, y que lo va a hacer ante futuras contingencias, sin causar duda alguna a las personas que lo usan. El criterio fundamental aquí es que el objeto no se deforme, que conserve su identidad formal. Pero ¡ay! como muestran las estructuras llevadas al colapso, para resistir las cargas tienen que deformarse. Es una paradoja *zen*. 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 ligerísimos 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 su forma sigue siendo la del primer día. (Como sistema físico, la estructura de un edificio debe evitar que se comporte de un modo caótico, mecánicamente debe tratarse de algo previsible. Al revés que muchos divertidos juguetes.)

ORGANIZA



<http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/>



PATROCINAN

giau+s<sub>(UPM)</sub>

<http://habitat.aq.upm.es/gi/>



<http://www.cervezalamorena.com/>



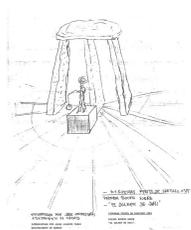
4



POLITÉCNICA

<http://www.facebook.com/t1cre/>

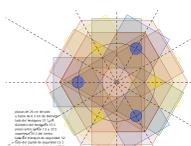

## DolmenD



DolmenD fue sugerido por los dólmenes de cualquier época, o como el de Dalí en su plaza en Madrid (aunque su diseño—el de la figura— era más atrevido y los “técnicos” pusieron las columnas verticales, tal y como las de DolmenD). Dolmen en bretón significa gran mesa de piedra).



La idea inicial: tres portaplanos soportando una *adoba* como losa. Ciertamente es una estructura inestable: cualquier pequeño desplazamiento horizontal de la losa hubiera desequilibrado el conjunto.



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 fuste.



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 dolmen.



El apeo 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.

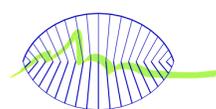


Prueba inicial. En equilibrio bajo el peso de 30kg adicionales. Las columnas se apoyan sobre la base, y la mesa de carga se apoya sobre las columnas. No se usó adhesivo. Una plomada permite asegurar que la carga está centrada.



DolmenD expuesto: 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 apeo sólo empezará a soportar carga cuando el dolmen 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 esta 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


<http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/>

PATROCINAN

giau+s<sub>(UPM)</sub>
<http://habitat.aq.upm.es/gi/>

<http://www.cervezalamorena.com/>




## CerchaTQ

1896 Leonardo Torres Quevedo, an Spanish engineer, patents a system for an aerial cableway.

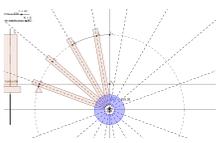
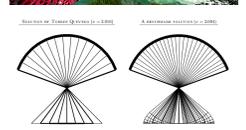
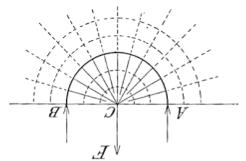
1904 Anthony George Maldon Michell, an Australian engineer, publishes the article titled "The Limits of Economy of Material in Frame-structures", now considered a milestone of the theory of optimal structural design.

1907 Torres Quevedo designs and builds the Monte Ulía aerial tramway in San Sebastián.

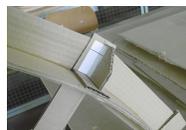
1914 Torres Quevedo designs and builds the Spanish Aerocar, over the Niagara River, with a very similar solution to that of San Sebastián. It is in operation since 1916 with no mishap.

1958 The work of Michell, unnoticed since its publication, becomes to be known thanks to the works of H. L. Cox and W. S. Hemp.

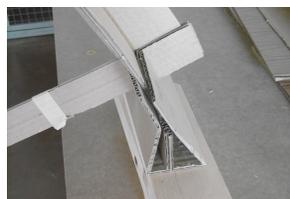
CARLOS OLMEDO, *Structural efficiency variation with the problem size in some bending problems*, 2015, PhD Thesis



Intentamos emular el esquema del carro del Spanish Aerocar, una pequeña parte de toda la compleja y satisfactoria instalación. Para simplificar hemos reducido el número de tirantes a siete.



Unión arco/tirante: ejercicio: ¿por qué y cómo esta unión es manifiestamente mejorable?



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



Casi todas las piezas recortadas y preparadas

Sin acabar, bajo su propio peso (4N) y una carga útil de 10N: ni se mueve

Vista lateral a falta de terminar el anillo de carga

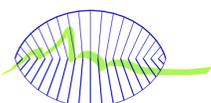


El anillo de carga acabado.



Los contenedores de la ET-SAM son una fuente de inagotables recursos (se renuevan de día en día). Encontramos dos vigas T de acero cincado de la misma luz (aprox) que nuestra CerchaTQ. Cada una tiene una masa de 313g, frente a los 577g de cartón, cola blanca y un poco de foam de CerchaTQ. ¿Cuál resistirá más carga antes de fallar?

ORGANIZA



<http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/>

PATROCINAN

giâu+s<sub>(UPM)</sub>



<http://habitat.aq.upm.es/gi/>

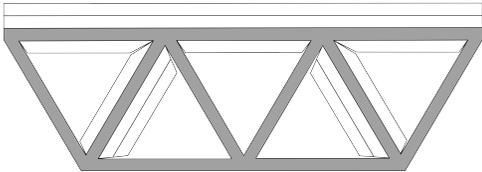


<http://www.cervezalamorena.com/>

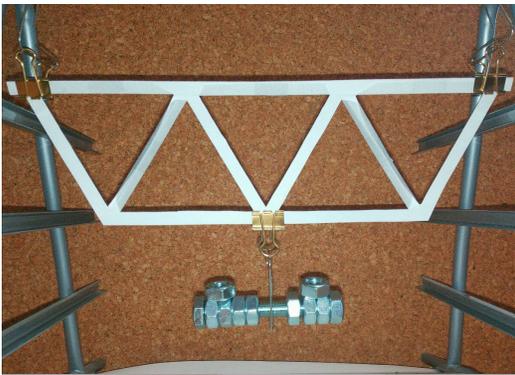




## CerchaC0



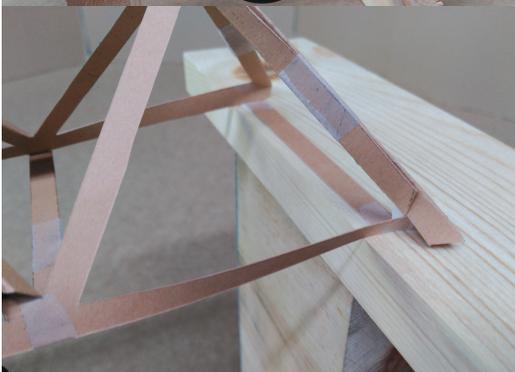
“Llevaba varios días pensando en algo que se pudiera hacer con papel para el taller de estructuras de primero, y esta mañana he hecho una primera pequeña cercha de papel recortando simplemente de un A4 el dibujo que os mando.”



“Sé que no es gran cosa, pero para ser tan ligera ha soportado un peso importante para ella. Os mando una foto. Creéis 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”.

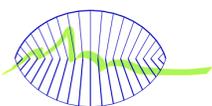


Los apoyos estaban mal concebidos y ejecutados. . .



Con las lecciones aprendidas de la experiencia se fabricó esta segunda versión, CerchaC0

ORGANIZA


<http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/>


PATROCINAN

giâu+s<sub>(UPM)</sub>
<http://habitat.aq.upm.es/gi/>

<http://www.cervezalamorena.com/>



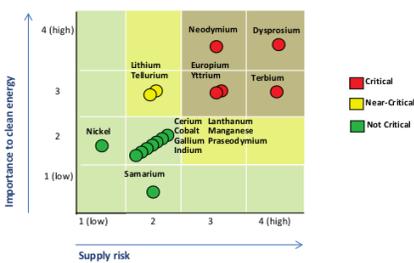

## Materia (I)

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 débil que sea un material siempre puede idearse alguna forma de construir un objeto resistente, incluso llegando a gastar exergía durante su uso<sup>a</sup>, 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 preocuparnos 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 útiles (la sociedad actual se sustenta en su extracción —exponencialmente creciente— y, en consecuencia, provocará su escasez e impedirá su uso).

<sup>a</sup>Ahora hay puentes colgantes con “aire acondicionado” a fin de evitar grandes alargamientos de sus catenarias, debidos simultáneamente a su gran tamaño y a la variación de temperatura—que se produciría sin acondicionamiento activo. Hasta el siglo XIX, las estructuras habían sido los elementos pasivos por antonomasia. Veremos que nos depara el futuro.

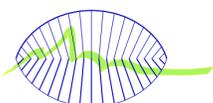


Esta tendencia hacia el agotamiento surge donde menos se espera. Por ejemplo, los nuevos y “prometedores” paneles fotovoltaicos de película fina demuestran un extraordinario rendimiento pero han de recurrir a óxidos y compuestos de sustancias tan raras como el indio o el galio, de manera que la generalización de su uso se toparía 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 ( $RE_2Fe_{14}B$  as basic formula)”, *op. cit.*).

La comparación entre las estructuras CerchaTQ y VigaT muestra que el mismo problema puede resolverse con acero cincado (y el cinc, como el cobre y otras sustancias, es otro de los metales cuyo suministro será problemático a corto plazo, sin llegar a ser crítico como es el caso del platino o el fósforo, *op. cit.*, p.19), pero también con cartón. Habrá que averiguar, medir, cuánto más cartón haría falta para alcanzar la misma carga que con acero (si es el caso, lo veremos). Pero en la ETSAM, con el curso en marcha, se tiran a la basura buenos cartones, aptos para construir estructuras, los martes y los viernes por la tarde. También hay bambú—que hay que cosechar y secar con tiempo por delante...

ORGANIZA


<http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/>

PATROCINAN

giau+s<sub>(UPM)</sub>
<http://habitat.aq.upm.es/gi/>

<http://www.cervezalamorena.com/>




## 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 consumiendo minerales, por tanto reciclando seguiremos aumentando su consumo. En la imagen puede verse a un hombre sosteniendo él mismo la hamaca en la que reposa: es 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 misterio 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 sabiduría necesaria para conservar su vida: pero no recibió la sabiduría política, pues ésta se hallaba en poder de Zeus, a cuya acrópolis no tuvo acceso Prometeo. Por ello, cuando los hombres trataron de vivir unidos para no ser aniquilados por las fieras, comenzaron a ultrajarse entre sí, y a punto estuvieron de ser exterminados por su propia mano. Fue entonces cuando Zeus, temiendo por la especie, ordenó a Hermes que entregara a los hombres la vergüenza y la justicia.

*Aidós* y *Dike*—el sentido de la vergüenza y el de la justicia—son el fundamento de la única virtud imprescindible para la existencia de la *polis*: la virtud política.

*Dike*, 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.

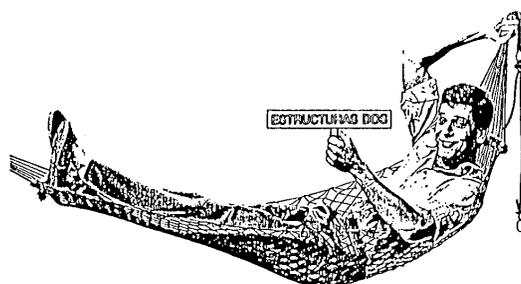
En cambio, *Aidós*, la Vergüenza, es una fuerza únicamente interna, el compromiso ético que cada individuo guarda con el bien.

La idea de que el sentido de la justicia y de la ética fueron repartidos a todos para que todos pudieran aspirar a alcanzar la felicidad dio fundamento al concepto de la soberanía popular y origen y justificación a la democracia como forma de organización política. Pero ¿qué es lo que permite al conjunto de la sociedad convertirse en portador eficaz de tal soberanía? No es otra cosa que el cultivo adecuado de ese don—la virtud política—a través de un proceso voluntario, impreciso, constante, individual y colectivo que los griegos dieron en llamar *paideia*.

La *paideia*—traduzcámoslo 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.

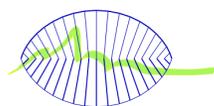
PEDRO OLALLA, *Grecia en el aire*, 2015.

Si volvemos al presente, y observamos como la publicidad—el engaño y la mentira alzadas 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

PATROCINAN

giau+s<sub>(UPM)</sub>

<http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/>

<http://habitat.aq.upm.es/gi/>

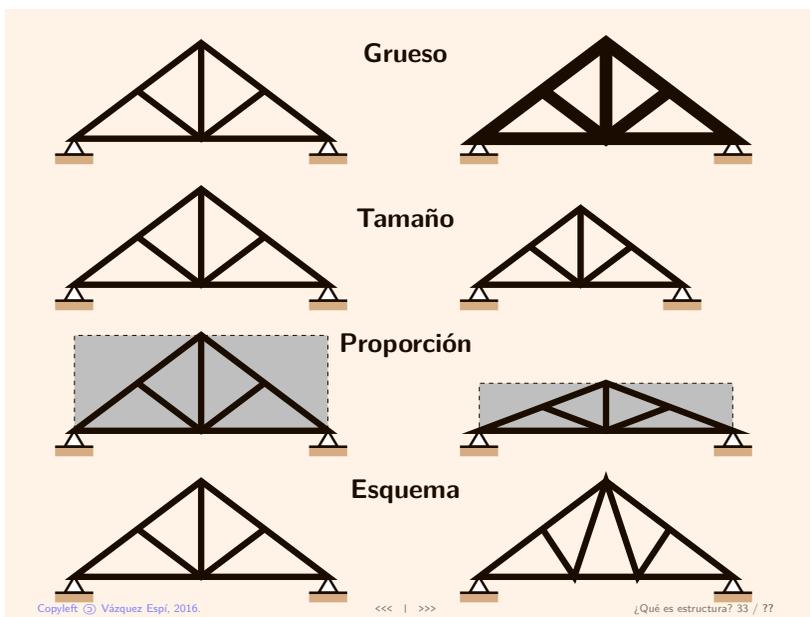
<http://www.cervezalamorena.com/>





# Forma

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



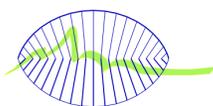
**tamaño:** al comparar formas semejantes, variando la escala de sus respectivos dibujos, pueden superponerse. Lo único que las diferencia es alguna longitud fundamental, como la luz de las vigas o la altura de las torres. Esa longitud es el **tamaño**.

**proporción:** mediante transformaciones afines en la dirección perpendicular que mide 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:** si mediante transformaciones afines tanto en la dirección del **tamaño**, como en la dirección perpendicular podemos hacer coincidir dos formas disímiles, 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 usemos 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 *currícula* 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


<http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/>

PATROCINAN

giau+s<sub>(UPM)</sub>
<http://habitat.aq.upm.es/gi/>

<http://www.cervezalamorena.com/>




## 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 excedente de ésta mayor en cuanto mayor sea el factor de reducción.

Galileo probó que los gigantes no podían haber existido [al menos ateniéndose

se a la descripción popular de su aspecto], pero ¿y los gnomos? 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 homúnculo capaz de cargar con 7 veces su propio peso, pero podemos ir un 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 misma velocidad 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***

RICARDO AROCA, 2016

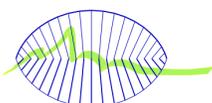


El cine de serie B y/o de género fantástico ha dado algunas joyas de sentimentalismo, como el caso de *The Incredible Shrinking Man* (1957), en el que el menguante protagonista, al conservar su proporción y esquema general, no hubiera tenido mayor problema en desembarazarse de la amenazadora y terrorífica araña, al revés de lo que describe el drama.

*The Amazing Colossal Man* se estrenó apenas unos meses después, y de nuevo ignora el postulado de Galileo sobre los gigantes, negándolo al mostrar un ser humano gigante con una fuerza *proporcional* a su tamaño, y con la misma agilidad que una persona corriente.

Claro que si un ser humano puede crecer o menguar, ¿por qué habría de cumplir con los postulados de un tal GALILEO? *This is just cine!*

ORGANIZA



<http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/>

PATROCINAN



giâu+s<sub>(UPM)</sub>

<http://habitat.aq.upm.es/gi/>



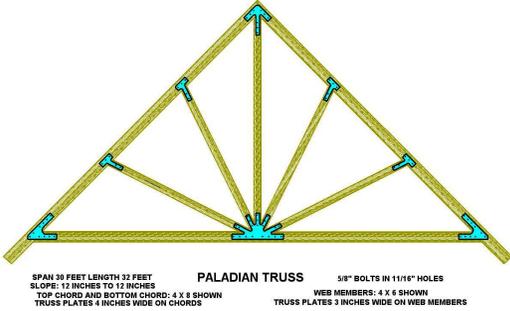
<http://www.cervezalamorena.com/>





# 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 cercha paladiana de la figura de proporción 2:1, en la que cada ángulo recto se divide en tres (puede hacerse en dos, o cuatro, cinco, etc). Usualmente, este tipo estructural recibe carga en las uniones superiores, y se apoya en los extremos inferiores, con o sin vuelo (para apoyar un 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, se puede vaticinar, tras algunos cálculos, como varía la deformación 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 rigidez 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 deducir en que rango de proporciones el esquema paladiano suministra diseños seguros, rígidos y estrictos (con la menor cantidad posible de material).

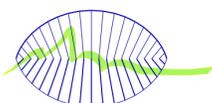
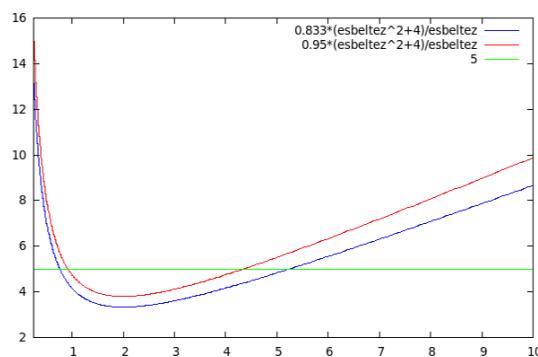
En la gráfica inferior se representa todo eso. La horizontal verde representa la máxima deformación tolerable (en el eje de ordenadas). La esbeltez queda representada en el eje de abscisas. Las gráficas roja y azul representan la deformación para cada esbeltez en el caso del acero y la madera corrientes.

Con una esbeltez 2 (una estructura el doble de larga que alta) se obtiene la mínima 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 (aprox).

Pero ¡ajo! Si para disminuir la deformación reducimos la esbeltez, acabaremos por pasar a la izquierda del óptimo, con deformaciones crecientes según la esbeltez disminuye.

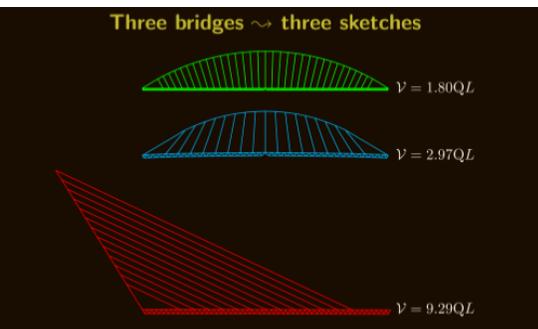
Los buenos diseños, por tanto, se encuentran para esbelteces moderadas: como entre 1 (la cercha se inscribe en un cuadrado) y 4 (la altura es la cuarta parte del tamaño). Y en ese intervalo basta asegurar la resistencia, para asegurar también la rigidez.

¿Deben prohibirse las esbelteces mayores que 4 o menores que 1? No es imprescindible. Si se quiere una estructura con proporción “fuera de lo razonable” caben dos posibilidades nítidas: bien buscar un esquema que funcione mejor (variar la forma estructural), bien aumentar el grueso para disminuir la deformación (siempre que con eso no se comprometa la resistencia). Por el primer camino se conseguirá normalmente aumentar la eficiencia del diseño, por el segundo disminuirlo. Este conflicto o *trade-off* es habitual: frecuentemente no se puede aspirar 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”.





## Esquema y proporción



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

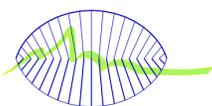
Bridge:	Apollo	La Barqueta	Hongshan <sup>[5]</sup>
Year:	2005	1989	2005
Sketch:			
<b>Original design:</b>			
Slenderness $\lambda$	3,33	2,79	1,78
Michell's number $\nu \div QL$	1,80	2,97	9,29
Relative scope $\mathcal{L} \div A$	0,557	0,336	0,107
Relative size $\frac{1}{10}$ (strength):			
Load cost $\kappa$	1,22	1,42	15,3
Selfweight, $P/Q$	0,22	0,42	14,3
<b>Optimum slenderness design:</b>			
Slenderness $\lambda$	1,20	1,07	0,469
Michell's number $\nu \div QL$	1,14	1,99	4,58
Relative scope $\mathcal{L} \div A$	0,874	0,503	0,218
Relative size $\frac{1}{10}$ (strength):			
Load cost $\kappa$	1,13	1,25	2,62
Selfweight, $P/Q$	0,13	0,25	1,62

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 incremento notable, paciencia. El de abajo, al mejorar su proporción, sería capaz ahora de aguantar la mitad de su propio peso, pero a costa de cuadruplicar su altura.

Con las proporciones óptimas, el de arriba seguiría siendo el más esbelto de los tres, 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 esa misma orilla.

<sup>a</sup>Si el puente en China le recuerda a alguno en España, está en lo cierto. En China se copió el puente de El Alamillo de Sevilla (CALATRAVA, 1992) décadas después de que éste hubiera tenido que ser reparado **¡dos veces, dos!** No se trataba de copiar el puente, se copiaba el modelo de negocio: un puente menos eficiente es siempre más caro y si vas a porcentaje en tu comisión. . . , pues eso.





## Rendimiento en carga

Hay muchos aspectos importantes a considerar en una ciudad, un edificio, una construcción, . . . , y en la estructura que las sostiene. Pero hay dos, que sin ser siempre los más importantes, son por los que hay que empezar, tanto cuando se proyecta una estructura como cuando se somete 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!<sup>a</sup>— desorbitado.

Siguiendo la definición del rendimiento exergético de la termodinámica, suele usarse como medida de la eficiencia o rendimiento el siguiente cociente:

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

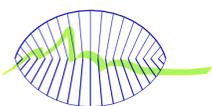
El inverso del rendimiento es, simplemente, el coste. El rendimiento *siempre* es menor que la unidad—algo que siempre pasa, en cualquier faceta de la vida, si las cuentas están bien hechas: no existe el móvil de movimiento perpetuo—, y el coste mayor que ella.

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!—. En 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 décima parte del tamaño insuperable 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!

Para diseñar estructuras eficientes, por tanto, las variables fundamentales con las que especular durante el diseño serán la proporción y el esquema.

<sup>a</sup>Ninguna unidad monetaria figura entre aquellas del Sistema Internacional de Unidades, ni se espera que lo hagan nunca: hay quien con ellas pretende medir alguna cosa, pero de trata de *pseudomagnitudes*, para las que no existe protocolo de medida.

ORGANIZA


<http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/>

PATROCINAN

giau+s<sub>(UPM)</sub>
<http://habitat.aq.upm.es/gi/>

<http://www.cervezalamorena.com/>




# ¡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 muchos números que se hayan hecho.*

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

En una esquina de la “ciudad prohibida” de esta exposición hay ejemplares del boleto de apuestas, incluyendo las condiciones legales. Se trata de adivinar de qué modo y con cuánta carga adicional fallarán algunas de las estructuras expuestas. **El boleto es gratuito y puede hacerse una nueva apuesta tras cada nuevo ciclo de carga.**

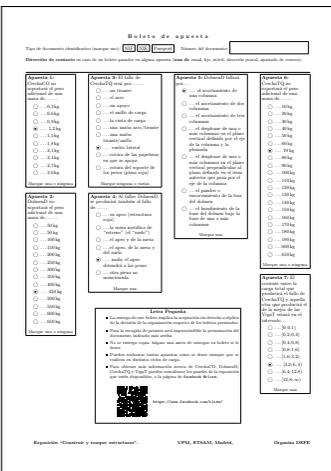
Una estrategia, que no es pésima, consiste en rellenar el boleto como si fuera uno de la Lotería Primitiva (cumpliendo las formalidades, eso sí).

Otra, reunirse y discutir sobre el particular, como suele hacerse con el boleto de la Quiniela.<sup>a</sup>

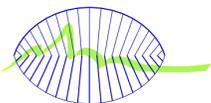
“Curioso mundo el nuestro: mientras que en la Atenas de Pericles a cualquiera podía “tocarle” ser magistrado por un año, ahora te puede tocar dinero, si rellenas y pagas un boleto.



Torneo de Vigas de la ETSAM (ca. 1990). ROSALINDA SÁNCHEZ “a la carga”...



ORGANIZA



<http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/>

PATROCINAN



giâu+s<sub>(UPM)</sub>

<http://habitat.aq.upm.es/gi/>



<http://www.cervezalamorena.com/>



# 15



POLITÉCNICA

<http://www.facebook.com/t1cre/>



@t1cre etsam

## Construcción y rotura de estructuras

La propuesta del Departamento de Estructuras y Física de la Edificación (DEFE) para el taller experimental 1 del Plan 2010-ETSAM, AA16/17

### The gory details

- 6 créditos ECTS, **20 personas como máximo en cada grupo**
  - Taller D01. L M X 12:30 - 14:30h.
  - Taller H01. L M X 19:00 - 21:00h  
(con posibilidad de acordar un horario diferente)
  - Profesorado: Oscar de Abril · Raquel Álvarez · Valero Pascual · Isabel González · Almudena Majano · María de los Ángeles Navacerrada · Mariano Vázquez · ...
- facebook: [facebook.com/t1cre](https://www.facebook.com/t1cre) o twitter: @TaCRE\_ETSAM o web:  
<http://habitat.aq.upm.es/gi/mve/mmcyte/#TALLER1CYRE>

FÉLIX GUATTARI y GILLES DELEUZE describen el conocimiento humano mediante tres planos: el de los *conceptos*, el de los *preceptos* y el de los *perceptos*, es decir, que si no entramos en profundidades, tenemos filosofía, ciencia y arte (*vide Qu'est-ce que la philosophie?*, 1991). Las asignaturas correspondientes a la enseñanza de estructuras pertenecen a la técnica que tiende a ser considerada como perteneciente al plano de la ciencia. Pero no hay tal, la *tecné* clásica es un poliedro de planos, incluyendo los tres anteriores junto a otros (no es sólo conocimiento). Esta confusión ha ido haciendo cada vez más difícil el proceso de enseñanza/aprendizaje desde los "buenos viejos tiempos", en los que el profesorado actual era alumnado. Este taller pretende poner en valor los aspectos filosóficos y artísticos del diseño de estructuras, contando para ello con la formación científica sobre estructuras de la enseñanza pre-universitaria, que es mucha...

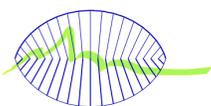
Seguiremos el consejo de Leonardo ("¡Haz el experimento!"), buscando conseguir intuición estructural. Construiremos y destruiremos estructuras pequeñas, que han de resolver los mismos problemas que las grandes, para aprender conceptos estructurales fundamentales y aprender a percibir los objetos cuando pretendemos enjuiciar su capacidad portante.

### Método de trabajo

- Escogeremos una estructura o un problema estructural y trataremos de imitarla o de resolverlo: una silla, una mesa, un puente, una catedral,...
- Investigaremos sobre su historia en el aula, en la biblioteca, en Internet,...
- Elegiremos materiales, diseñaremos una plantilla y hasta la elección del tipo de adhesivo veremos que es importante
- Nos encontraremos con dudas que intentaremos resolver (cómo hacer uniones, en qué orden ensamblar las distintas piezas, etc). Jugaremos con las estructuras construidas: las pesaremos, disfrutaremos viendo cómo y por dónde se rompen, nos plantearemos como documentar el proceso y de como tomar medidas de interés, y veremos la relación entre su peso y la carga adicional que puede aguantar (rendimiento o eficiencia estructural).
- Invitaremos a personas expertas a explicar los resultados de nuestros experimentos y confrontaremos sus explicaciones con las nuestras.

ORGANIZA

PATROCINAN



<http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/>

giau+s<sub>(UPM)</sub>



<http://habitat.aq.upm.es/gi/>



<http://www.cervezalamorena.com/>





## This is the End



El automóvil iba a toda velocidad cuando la estola de fuerte seda que ceñía su cuello empezó a enrollarse alrededor de la rueda, arrastrando a la señora Duncan con una fuerza terrible, lo que provocó que saliese despedida por un costado del vehículo y se precipitase sobre la calzada de adoquines. Así fue arrastrada varias decenas de metros antes de que el conductor, alertado por los gritos, consiguiese detener el automóvil. Se obtuvo auxilio médico, pero se constató que Isadora Duncan ya había fallecido por estrangulamiento, y que sucedió de forma casi instantánea. New York Times 15-09-1927

¿Qué es el arte? Tal y como brevemente lo expresó ISADORA DUNCAN al ser interrogada acerca del significado de su danza: “Si yo pudiera explicarle a usted de qué se trata, no tendría sentido que lo bailara.”

MARIANO VÁZQUEZ, 1997.

Antes de que podamos aplicar nuestro análisis numérico a una estructura, tenemos que llegar a una situación crítica e importante; a saber, tenemos que tener una estructura que analizar. Sólo entonces nuestro análisis nos dirá si la estructura es capaz de hacer lo que se supone que hace. Además, las destrezas necesarias para elegir esa estructura preliminar son de una naturaleza completamente diferente de aquellas otras que desarrollamos gradualmente cuando hemos dominado las técnicas estructurales.

Comprender el comportamiento de las estructuras es muy necesario, pero ¿no hay muchas otras cosas que son igual o incluso más necesarias? Cualquier prestigioso diseñador de estructuras declarará que el diseño de estructuras es un arte tanto como es la aplicación de la ciencia y la técnica a un problema dado. Podría darse la vuelta al argumento diciendo que sólo si, además, se trata de una obra de arte será admirada y añadirá prestigio a su diseñador. Desafortunadamente, es imposible definir lo que implica arte, pero en cualquier caso nada tiene que ver con el análisis numérico. Hay muchos otros problemas que tienen que considerarse. Todo el propósito del diseño de estructuras es ayudarnos a fabricar las cosas que necesitamos, o que imaginamos necesitar, o que simplemente imaginamos. Así que tenemos que tener muy claro qué queremos alcanzar con nuestro diseño, lo que, obviamente, afectará a su forma, los materiales que usamos y a toda suerte de otras cosas. Si queremos construir algo, ¿se trata del lugar correcto? ¿no podríamos alcanzar mejor nuestro objetivo de otra manera totalmente diferente después de todo? Sólo cuando hayamos contestado todas esas cuestiones a entera satisfacción nuestra y de nuestros clientes, el análisis de estructuras comenzará a ser relevante. Obviamente, lo que yo llamaría diseño es mucho más importante que el análisis de estructuras, puesto que determina lo que vamos a obtener por nuestros esfuerzos. Y, por otra parte, lo que decidimos hacer es mucho más importante que cómo hacerlo, y esto abre la llave de paso para toda una caterva de asuntos sociales, políticos, éticos, que nos amenazan con la confusión, o algo peor, porque podemos ser incapaces de llegar a un acuerdo sobre qué hacer.

Cómo vivir en paz con nuestros semejantes sobre este planeta sin destruirlo es la final y ahora urgente pregunta y ojalá supiera la respuesta.

OVE ARUP (1895–1988)

### A DEFE Production

Thanks are due to Alfredo Álvarez • Ricardo Aroca • Ildefonso Fernández • Yolanda Fernández • Oscar Gamarra • Lucía Gutiérrez • Miguel Ángel Hontalba • José Luis de Miguel • Jose María Cáceres • Juan Martín • Julián Muñoz • Lucas Vázquez • and all authors whose works we have copied even without citing them

properly for lack of time

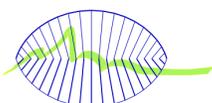
Asssembled by The DEFE Crew

Designed by The @t1cre Crew

Directed by Oscar de Abril and Mariano Vázquez

ETSAM Madrid ©Copyleft 2016

ORGANIZA



<http://www.aq.upm.es/Departamentos/Estructuras/>

PATROCINAN



giâu+s<sub>(UPM)</sub>

<http://habitat.aq.upm.es/gi/>



<http://www.cervezalamorena.com/>

