TENSEGRIDAD
Escultura y Arquitectura

Según el DLE:
Adapt. del ingl. tensegrity, y este fusión de tensional integrity 'integridad de tensión'.
f. Arq. y Fís. Propiedad de las estructuras cuyo equilibrio depende de las fuerzas de compresión y tensión de sus elementos.

Mi amigo Mariano Nieto me manda la Fig. 1, de su invención, que fascina a cualquiera, él mismo incluido, por su ingeniosidad y originalidad. Son tres piezas de hierro, la más baja de las cuales se asienta en el suelo (véase su breve sombra), la intermedia cuelga de ésta y la superior cuelga de esa intermedia. Los colgamientos se aseguran mediante dos cortos hilos y los cuatro hilos largos de las esquinas garantizan la estabilidad vertical del conjunto, trabajando, también, a tracción.

Fig. 1

Los elementos de la pieza inferior están sometidos al esfuerzo de compresión de su propio peso y al que le transmiten las dos piezas superiores; a la del medio le ocurre lo mismo, pero descontando el peso de la inferior. La superior está sometida al esfuerzo de compresión de sólo su peso.

En el conjunto, lo que trabaja a tracción (es la única posibilidad de resistencia que puede presentar un hilo) es la pareja de cortos hilos verticales en el interior: el inferior, con un esfuerzo equivalente al peso de las dos piezas superiores y el superior el que corresponde sólo al peso de la pieza de arriba del todo.

Esta muestra de tensegridad me ha recordado el artículo que publiqué en 2004 y que puede verse en este enlace:
https://caprichos-ingenieros.com/que.html (una rueda de bicicleta.pdf)

De él rescato la Fig.2 que, aparte de mostrar mi ignorancia del moderno término, resuelve la duda que cualquiera pueda tener sobre cómo unos radios tan finos en esas ruedas pueden resistir sin pandearse el esfuerzo de compresión que aparentan soportar mientras giran.

Fig. 2

Es que no trabajan a compresión: lo harían si en lugar de hablar del sector que se muestra, se hubiera dibujado el sector opuesto (el simétrico de los radios respecto del diámetro horizontal).

Las que trabajan a compresión son las llantas de las dos ruedas. Ese esfuerzo de compresión es la suma de los pesos del ciclista y de la bicicleta.

Las varillitas que hacen de radios en las bicis son sustituidas en la gigantesca noria del *Ojo de Londres* por puros cables bien pretensados (we hope).

Como la rueda de la bici gira, la tracción a que se someten los radios vistos en la figura se hace extensiva a todos ellos. Así pues, los radios deben estar bien preparados para resistir dicha tracción habiéndose sometido previamente a una operación de pretensado.

Los pasos del arquitecto R. Buckminster Fuller: Empleó la estructura del icosaedro truncado en la construcción de sus cúpulas geodésicas. Patentó el fullereno, forma alotrópica estable del carbono, y, de paso, dio pie al balón de fútbol con badana de pentágonos rodeados de hexágonos. El comportamiento de este balón, por último, inspiró a Fuller el descubrimiento de la palabra *tensegridad*.

Con ella se expresa la propiedad de estructuras, como por ejemplo, la de un balón de fútbol hinchado, que mantiene en equilibrio las fuerzas de compresión del aire interior a presión, y la de la badana exterior que con su reacción de tracción se estira a fin de conformar como superficie esférica, los pentágonos y hexágonos que antes fueron planos.

Lo que pretendo a continuación es aplicar el principio de la tensegridad a un icosaedro puro, sin truncamientos, siguiendo las fases del proceso que es común en cualquier construcción: Diseño, fabricación y montaje. Todas las fases tienen al menos dos componentes: las básicas, y las de detalle.

Yo ya tengo buen camino andado en cuanto al diseño básico porque el icosaedro está asociado a ciertas propiedades geométricas que ayudan a conseguir el objetivo propuesto.

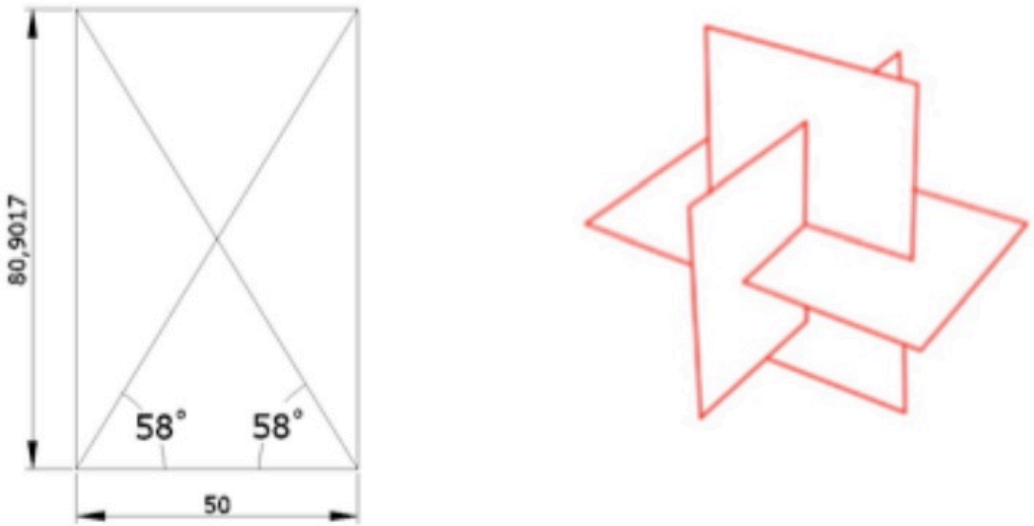


Fig. 3

La Fig. 3 muestra a la izquierda un rectángulo áurico (redondearé a la unidad las medidas lineales). En él la relación de longitudes entre su lado grande y pequeño es $(1 + \sqrt{5}) / 2 = 1{,}6$. Así pues, disponemos de un rectángulo de 80×50 para nuestra construcción.

A la derecha de dicha Fig. 3 se han montado tres rectángulos áuricos centrados para conseguir los ocho triedros trirectángulos. El punto de intersección de esos tres planos será el centro del icosaedro. La Fig. 4 es análoga a esta última, pero coloreada para facilitar la comprensión de lo que sigue. En ella se señala el centro de gravedad del conjunto que será el centro del icosaedro final.

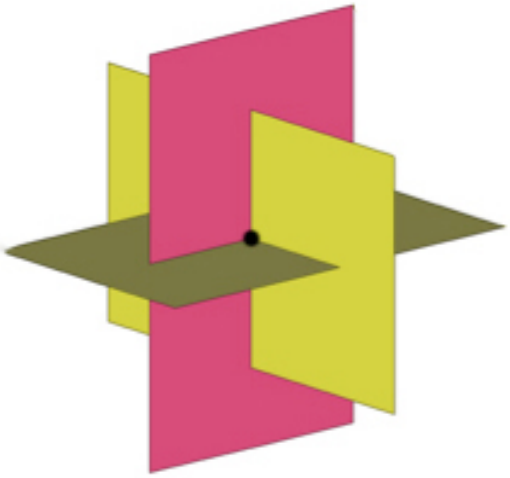


Fig. 4

Fig. 5

En la Fig. 5 se ve (puede demostrarse) los dos tipos de triángulos equiláteros construibles: uno tiene un lado en coincidencia con el lado menor de un rectángulo. El otro no: sus tres vértices están en rectángulos de distinto color.

Esto nos lleva a fijarnos en la Fig. 6 que muestra a la izquierda un icosaedro completo y, a su derecha, el mismo despiezado.

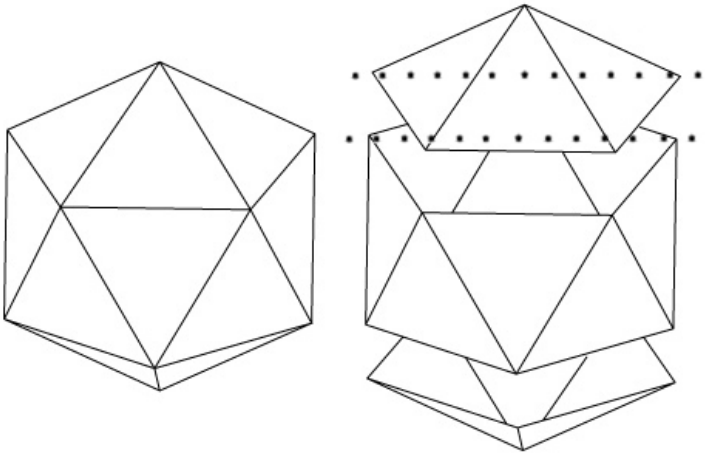
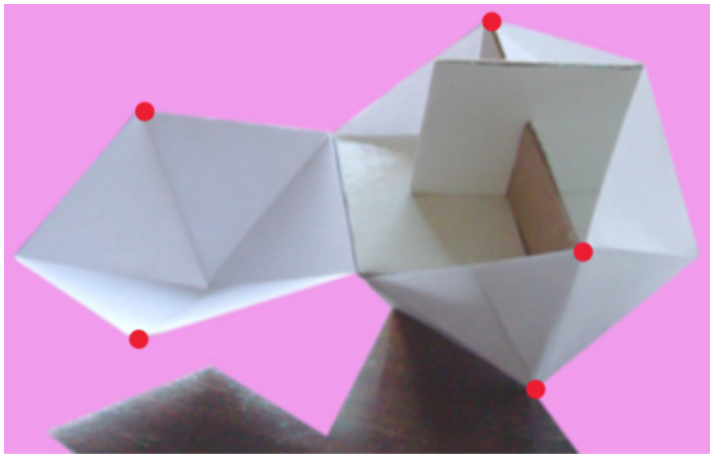


Fig. 6

En esta última se aprecia la constitución del icosaedro: Una corona de 10 triángulos equiláteros (cinco que se ven delante, y cinco detrás), más dos tapas consistentes en sendas pirámides pentagonales que tienen triángulos equiláteros como caras laterales. Las líneas de puntos señalan la correspondencia de una diagonal de la base pentagonal de la tapa superior con el lado grande (el superior) de un rectángulo áurico vertical de la corona.



Para aclarar un punto más esta cuestión, véase la Fig. 7 en la que, al cerrar la tapa, su diagonal marcada por dos puntos rojos coincide con el lado grande del rectángulo áurico insertado verticalmente en la corona. Asimismo se muestra la coincidencia del lado pequeño del rectángulo con el lado del icosaedro.

Fig. 7

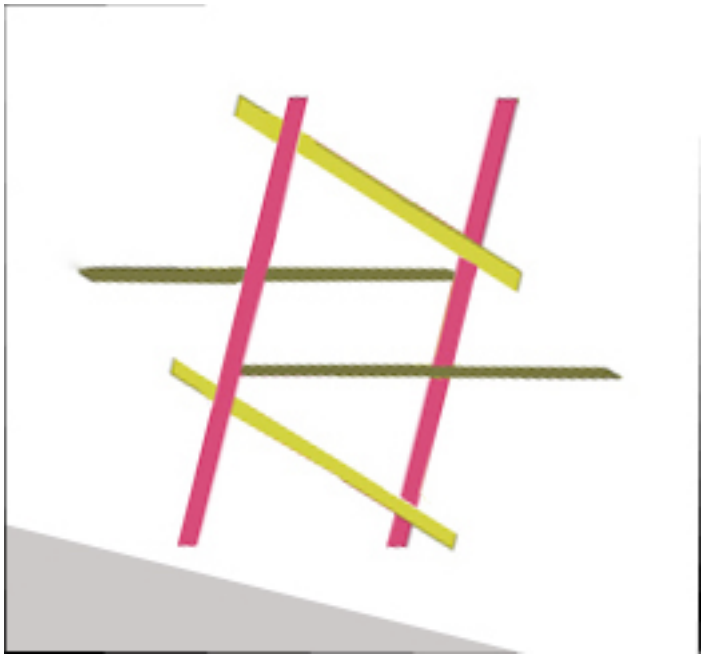


Fig. 8

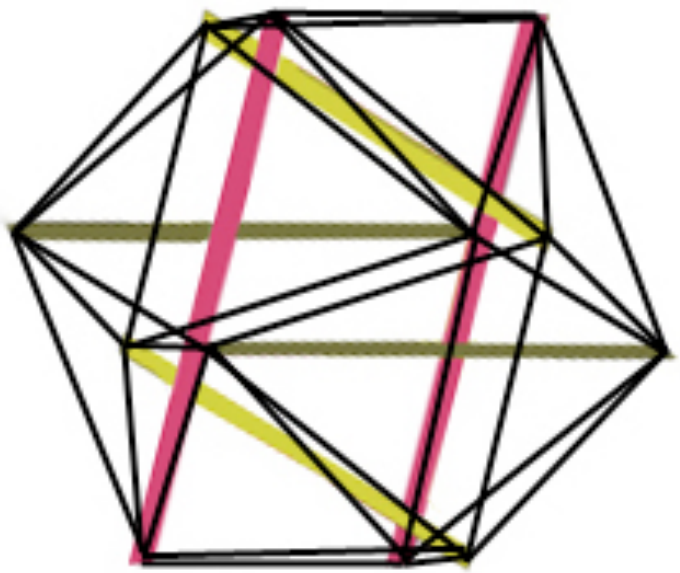
Con toda la información acumulada ya estamos en condiciones de acometer la tensegridad para construir un edificio icosaédrico. Lo primero que haremos será extraer de la Fig. 4 el material necesario para fabricar las 6 barras de compresión (Fig. 8).

Como se ve, resultan tres parejas de paralelas en los tres planos cartesianos que han de mantenerse inamovibles en esa posición, una vez logrado el montaje final.

No estoy ahora en condiciones de acometer la ingeniería de detalle para ese montaje, pero daré algunas pistas.

Será bueno que cada pareja se convierta en una sola unidad mediante un elemento que las haga solidarias para constituir una especie de hache cuyo centro de gravedad coincidirá al final con el centro del icosaedro.

El tramo central de las haches se hará desaparecer después de haber cumplido su misión solidaria y, coincidiendo con la fase de unión de cables de tracción a barras de compresión. Esta fase final se muestra acabada en la Fig. 9, pero en la 8 ya se ve que el conjunto de barras queda apoyado en el suelo sobre el triángulo equilátero cuyos vértices son los dos extremos inferiores de la pareja roja y del delantero de la barra inferior amarilla.



El edificio tendrá como base un triángulo equilátero de 50 metros de lado y medirá 77,5 m de alto.

En dicha Fig. 9 se pueden contar los cuatro rectángulos áuricos, los 12 vértices del icosaedro, sus 20 caras y sus 30 aristas de cable negro (a mí, éstas, me las ha contado Photoshop).

Fig. 9

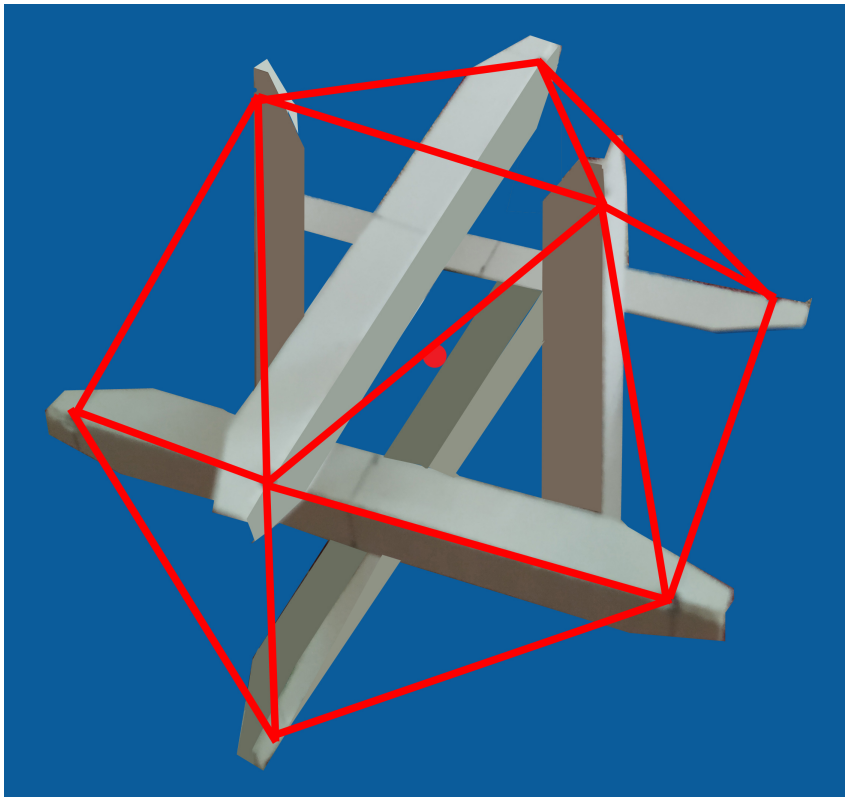


Fig. 10

La Fig. 10 es semejante a la 9. La he construido físicamente a base de perfiles angulares agujereados en sus extremos para materializar los vértices del icosaedro.

Los perfiles son los que han de resistir los esfuerzos de compresión (pandeo) a los que serán sometidos por las tensiones de las aristas (cables que a su vez están amarrados en los agujeros de los angulares)

Retiré los tres tramos centrales de las haches pero conservé su punto de intersección (en rojo).

Asimismo aparecen los ocho vértices vistos; los otros cuatro quedan ocultos.

En cuanto a aristas, el resultado es semejante al de la izquierda de la Fig. 6: en ésta se ven 17; en la Fig. 10, sólo 15 debido a que los angulares ocultan algunas.

Hasta aquí, todo artificio, pero veamos cómo opera la naturaleza en cuestión de tensiones y compresiones. Nos lo cuenta la Fig. 11 por medio del Pino Canario que tengo de vecino frente a mi ventana. Ése que trepa al cielo adornado con agujas de aire fino. El mismo que llora de noche, en soledad, a sus congéneres muertos por un volcán en la isla canaria de La Palma (verano de 2021).

Fig. 11

Él aguantó firme la fuerte nevada del pasado invierno. El peso de la nieve estuvo a puto de tronchar la poderosa rama. El enhiesto tronco tiró de ella y la retuvo flexionándola peligrosamente. Las cicatrices de los trabajos de nieve y sabia del árbol, se dejan ver: La parte superior de la rama trabajó a tracción, y la inferior, a compresión: como la corteza del árbol donde se empotra la rama.

El pino canario, aparte de inspirar sonetos tiene una particularidad muy especial: Sus hojas en manojos de tres acículas (dos en las demás especies).

En mi jardín estrecho tengo un pino
que a todos los demás es diferente.
Me mira de hito en hito desde enfrente
queriendo conservarme de vecino.

Familiarmente yo lo denomino
a este árbol singular que está en mi mente,
mayo que trepa al cielo tenazmente
adornado de agujas de aire fino.

Cuando tus hojas secas vas mudando,
un vuelco al corazón me viene dando
temiendo por tu vida que es la mía.

Así, cuando al llegar la primavera
tu verde brote adorna la pradera,
mi espíritu se alegra y aún confía.

CAPRICHOS ingenieros

Jesús de la Peña Hernández