



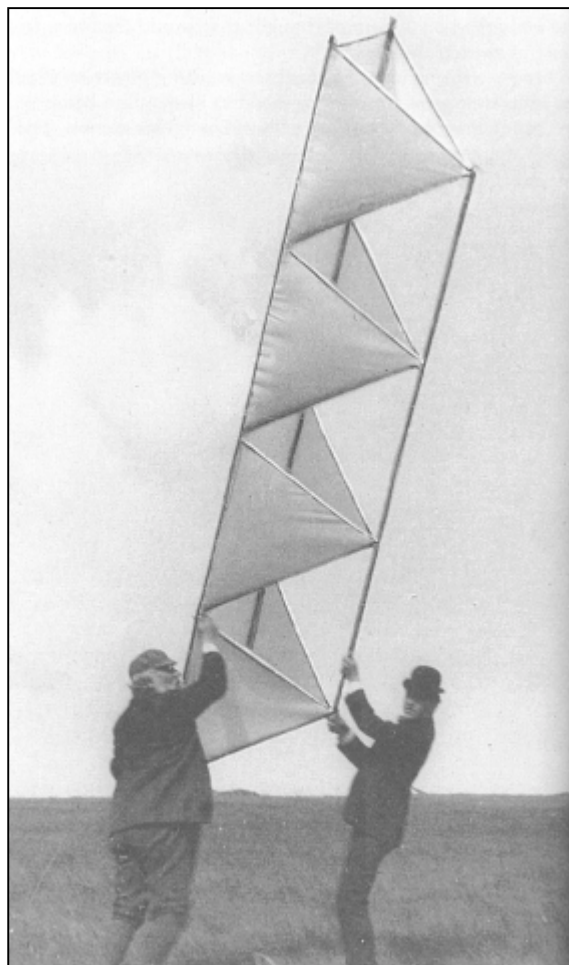
# Al Final del Hilo

Boletín de Historia de la Cometa

Dirigido por Juan Miguel Suay Belenguer

Número 1

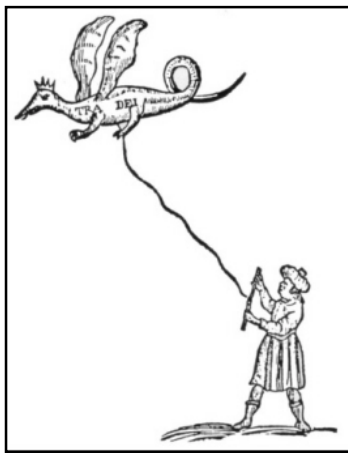
Julio 2000



**El Tetraedro de  
Alexander Graham Bell**

## Índice:

Editorial	1
Geometría difusa por Betelgueuse	2
El principio del tetraedro en la estructura de una cometa por Alexander Graham Bell	3
Principios geométricos en el diseño de las cometas tetraédricas por Juan Miguel Suay Belenguer	20
Construcción de cometas tetraédricas con materiales sencillos por Juan Miguel Suay Belenguer	33



### **Al Final del Hilo** **Boletín de Historia de la cometa**

#### **Dirección:**

Juan Miguel Suay Belenguer

#### **Colaboradores**

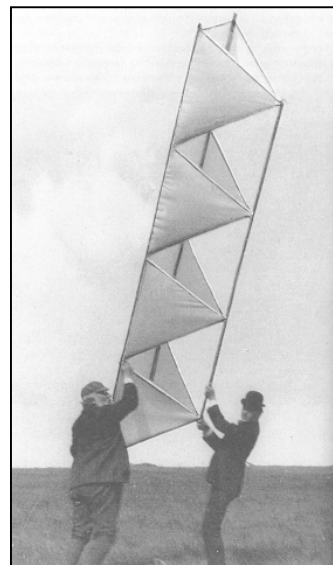
Betelgueuse

José A. Martínez Climent

#### **Redacción:**

c/General Lacy 13  
03003 - Alicante (España)  
jm\_suay@inves.es

## Portada



Alexander Graham Bell y un asistente, elevando una cometa tetraédrica, cerca de 1903, en su laboratorio de la Isla del Cabo Breton en Nueva Escocia (Canadá).

## Editorial

*"No está bien ocultar la propia ignorancia, sino descubrirla y ponerle remedio."*

**Heráclito** (c.544 - 480 a. C.), filósofo griego.

Lo que tienes en las manos es el primer número de *Al Final del Hilo*, que nace como medio de difusión de la parte más desconocida del mundo de las cometas, que son sus aspectos históricos, científicos y culturales.

Y para empezar esta singladura, este primer número está dedicado al fascinante mundo de las cometas formadas por estructuras tetraédricas, donde la geometría, el arte y la ingeniería se unen en un abrazo sinérgico.

Justificar la geometría y las cometas es el primer deber para con los lectores, ahí las *geometrías difusas*, que nos llenarán los espacios mentales con nuevas formas de conocimiento.

**Alexander Graham Bell** a principios del siglo XX, descubrió las propiedades en el vuelo de las cometas tetraédricas, realizó múltiples experimentos con ellas, con el fin de resolver el problema tecnológico más importante de la época: la máquina voladora más pesada que el aire. En el número de junio de 1903 de la *National Geographic Magazine*, publicó un artículo en el que su objetivo era: " ... atraer a su atención la importancia del principio del tetraedro en la construcción de cometas." Una traducción, por primera vez al castellano, de este artículo aparece aquí publicado.

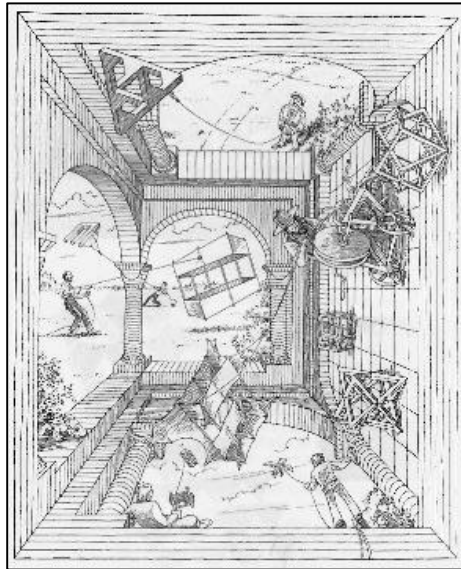
Una estructura tetraédrica tiene unas fascinantes propiedades geométricas que son el objeto del segundo artículo en este número, en el que espero que los amantes de las matemáticas y de las cometas disfruten con el mismo, lo mismo que he disfrutado el autor en su redacción.

Para terminar una propuesta para construir cometas tetraédricas con materiales sencillos y experimentar lo que la teoría nos ha descubierto.

Abrir las siguientes páginas al viento, un abanico de formas y colores poblarán el cielo, una maravillosa geometría ha nacido para todos vosotros.

**Juan Miguel Suay Belenguer**

## Geometría difusa



Trazan líneas imaginarias en el etéreo elemento, navegan sumergidas en un espacio invisible, llenan de colorido el azul del cielo. Las cometas no son más que geometrías difusas, pues sus trazas no tienen límites definidos entre nuestro espacio interior y exterior.

**Descartes** defendía que donde hay espacio existe geometría, **Einstein** nos enseñó que la gravedad es una deformación del espacio y las leyes de la aerodinámica dicen, que para que los aerodinos vuelen es necesaria una deformación del medio fluido que los circundan. Por lo tanto, geometría y deformación es lo que se precisa para volar una cometa que desafía a la gravedad y crea espacio.

Pero que papel tenemos en toda esta creación. Dicen que el entorno, definido como todo aquello que rodea al sistema, es desde donde se aprecia y siente el Todo, desde esta posición nosotros poseemos la suerte y la posibilidad de manipular el Espacio creado por medio de los hilos, así todo este conjunto elementos individuales se estructura en lo que deseamos, sentimos o simplemente el azar nos ordena.

¿No es fascinante pensar que todo este espacio creado en nuestro universo visual es una proyección en tres dimensiones de otros objetos que existen en mundos multidimensionales? No os quedéis con la duda, preguntar dónde empieza el sistema y donde esta el entorno, su fragmentación en pequeños elementos puede ser infinitos, tantos como sentimientos interiores se nos despierten.

El pensamiento humano se une a esta geometría difusa. No será que nuestros razonamientos son de la misma naturaleza...

**Betelgueuse**

## El Principio del tetraedro en la estructura de una cometa\*.

por **Alexander Graham Bell**  
Presidente del *National Geographic Society*

*National Geographic Magazine*, volumen 14, parte 6, Washington 1903

En 1899, en la reunión de abril, hice una comunicación a la academia sobre el asunto "*Cometas con Alas Radiales*"; y algunas de las ilustraciones que mostré a la academia en aquella ocasión fueron posteriormente publicadas en el *Monthly Weather Review*<sup>++</sup>.

Desde entonces he estado constantemente realizando experimentos con cometas. El por qué, no lo sé, quizá a causa de la íntima conexión de este asunto con el problema de las máquinas voladoras.

Todos estamos interesados en la locomoción aérea; y estoy seguro de que quien ha observado con atención el vuelo de las aves no duda por un momento de la posibilidad del vuelo de los cuerpos con peso específico superior al del aire. En palabras de un viejo escritor, "no podemos considerar imposible lo que ya se ha conseguido".

He intuido que una máquina voladora debería ser capaz de volar como una cometa y viceversa, una cometa adecuadamente construida tendría que ser capaz de ser usada como una máquina voladora, cuando vuela con sus propios medios propulsores. No estoy seguro, en cambio, de la verdad de la primera proposición como lo estoy de la última.

Dada una cometa, a la que se le ha dado la forma adecuada de máquina voladora, y tan eficiente que volara bien con una buena brisa (unas 20 millas por hora) lastrada con el peso equivalente de un hombre y un motor; entonces a mi parecer, esta misma cometa provista ahora con un hombre y un motor en vez del lastre, empujada por sus propios propulsores a razón de 20 millas por hora, se soportará en un aire en calma como una máquina voladora. Por lo que respecta a la presión del aire, es seguramente despreciable que el aire se mueva contra la cometa, o la cometa contra el aire.

Por supuesto que en otras condiciones ambos casos no son idénticos. Una cometa sostenida por una brisa de 20 millas por hora no tiene momento, es decir, su momento es igual a cero, porque esta estacionaria en el aire y no tiene movimiento propio; pero el momento de un cuerpo pesado impulsado a 20 millas por hora a través del aire es

---

\* Comunicación a la *National Academy of Sciences* en Washington, D. C, el 23 de abril de 1903, revisado para su publicación en el *National Geographic Magazine*.

<sup>++</sup> Ver *Monthly Weather Review*, abril de 1899, volumen XXVII, pp. 154 - 155, y plato XI.

considerable. El momento ciertamente añade vuelo, y puede incluso ser la fuente de sustentación, que contrarreste la fuerza de gravedad independientemente de la presión del aire. Es perfectamente posible que un aparato se muestre eficiente como maquina voladora pero que no pueda volar como una cometa debido a la ausencia de **vis viva**.

Aunque esto suponga un obstáculo, la aplicación de mis experimentos con cometas al problema de la maquina voladora ha sido durante mucho tiempo una guía para mis investigaciones.

No me he preocupado de asegurarme de cuán alto pueda volar una cometa o de volar una a gran altitud. El asunto que tengo en mente es este: que el equilibrio de la estructura en el aire debe ser perfecto; que la cometa debe volar sin balanceo, o no moverse de un lado a otro o precipitarse repentinamente cuando recibe un golpe de viento, y que cuando se libera debe caer lenta y suavemente al suelo sin oscilación. También he considerado importante que el armazón debe de poseer gran resistencia con poco peso.

Creo que con las formas de las estructuras que hoy se consiguen, las propiedades de resistencia, ligereza, y vuelo estable están unidas en una cuantía considerable.

En mis días de juventud la palabra "cometa" sugería una estructura en forma de cruz, cubierta con un papel, formando una superficie con forma de diamante mas larga de un lado que de otro y provista con una larga cola formada por una cadena con numerosas piezas de papel atadas a ciertos intervalos sobre ella. Una cometa como esta es un simple juguete. En Europa y América, donde las cometas de este tipo prevalecieron, el vuelo de cometas es únicamente una diversión para niños, y la mejora de la forma de su estructura no sé tenía como motivo de pensamiento para un científico.

En Asia, el vuelo de cometas ha sido durante siglos diversión de adultos, así los chinos, japoneses y malayos han desarrollado cometas sin cola muy superiores a cualquier forma de cometa conocida por nosotros hasta hace poco tiempo.

Solo durante los últimos años se han tomado en serio las mejoras en la estructura de las cometas, y lo avances se deben en gran medida a los esfuerzos de un hombre: **Lawrence Hargrave**, de Australia.

**Hargrave** se dio cuenta de que la estructura que mejor se adaptaba a la llamada "buena cometa" seria también adecuada como maquina voladora. Sus investigaciones, publicadas por la *Royal Society de New South Wales*, han atraído la atención del

mundo y son el punto de arranque para las investigaciones modernas sobre la materia en Europa y América.

Cualquier cosa relacionada con la locomoción aérea interesa a otras mentes, y el vuelo científico de cometas se ha estimulado por los experimentos de **Hargrave**.

En América, en cambio, el principal estímulo del vuelo científico de las cometas ha sido desarrollado por el *United States Weather Bureau*, con el fin de poder obtener una importante información relacionada con la meteorología, construyendo cometas capaces de elevar instrumentos meteorológicos a gran altitud en la atmósfera. El señor **Eddy** y otros en América tomaron las cometas malayas sin cola como base para sus experimentos, pero el profesor **Marvin**, del *United States Weather Bureau*, el señor **Rotch**, del *Blue Hill Observatory*, y muchos otros han adaptado la cometa de caja de **Hargrave** para sus propósitos.

El Congreso ha ayudado al *Weather Bureau* en sus experimentos con cometas, y cierto número de estaciones meteorológicas a lo largo de los EE.UU. fueron establecidas en pocos años, equipadas con cometas de **Marvin**.

Se han realizado continuamente observaciones meteorológicas a gran altitud, por parte del *Blue Hill Observatory* en *Massachusetts*, y el señor **Rotch** ha verificado la posibilidad de remolcar cometas por medio de barcos de vapor en el mar, para asegurar una observación continuada a través del Atlántico.

## LA COMETA DE CAJA DE HARGRAVE

**Hargrave** introdujo lo que se conoce como "montaje celular para las cometas". Construyó cometas formadas de muchas células, pero no consiguió ninguna mejora sustancial al usar muchas células con respecto al empleo una sola; una cometa integrada por dos células rectangulares separadas por un espacio considerable es lo que se conoce ahora universalmente como "cometa de caja de **Hargrave**". Esto representa, en mi opinión, el máximo hito del progreso en el siglo XIX, es este tipo de cometa, el punto inicial de mis propias investigaciones (Figura 1).

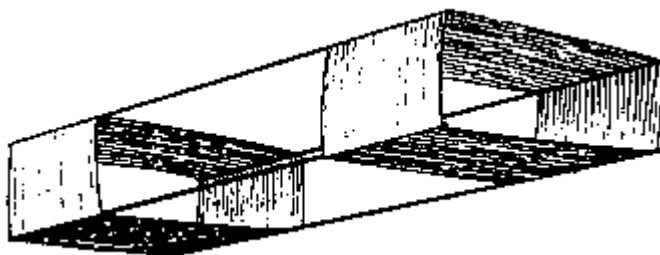


FIG. 1 COMETA DE CAJA DE HARGRAVE

Las celdas anterior y posterior están conectadas por medio de un armazón, de manera que queda un gran espacio entre ellas. Este espacio es un rasgo esencial de la cometa: de él depende la estabilidad anterior y posterior de la cometa. Cuanto más espacio más estable es la cometa en cualquier dirección, mas tiende a tomar la posición horizontal en el aire, y menos tiende a hundirse o elevarse como un barco en el mar. Las elevaciones u oscilaciones quedan casi por completo suprimidas cuando la espacio entren las celdas es grande.

Cada celda posee caras verticales; y, nuevamente, esto parece ser un elemento esencial de la cometa que contribuye a la estabilidad lateral. Cuanto mayores son las caras verticales mayor es la estabilidad en la dirección lateral, y menor la tendencia a girar sobre si misma o a moverse de lado a lado.

En el dibujo se ha mostrado solo los detalles necesarios para la construcción, con un solo armazón que es suficiente para mantener las celdas juntas.

Es obvio que una cometa construida como en la figura 1 será muy torpe en el aire. Requiere añadir distintos armazones con el fin de darle la resistencia suficiente como para mantener las superficies aeroplanas en su posición relativa adecuada, y así, evitar la distorsión, o flexión, o torsión del armazón de la cometa bajo la acción del viento.

Desgraciadamente, los añadidos requeridos para dar rigidez a la estructura restan eficiencia a la cometa. En primer lugar, haciéndola mas pesada, de manera que la razón peso/superficie crece, y en segundo lugar, incrementando la resistencia frontal de la cometa. Las riostras empleadas para evitar la distorsión de las celdas se colocan en el camino del viento, de tal manera que añaden resistencia a la cometa sin contribuir a la sustentación.



FIG. 2

Una cometa rectangular como A (figura 2) es estructuralmente débil, como se puede demostrar por la escasa fuerza requerida para deformarla hasta la forma B. Para remediar esa debilidad, se colocan riostras internas de las características que se muestran en C.

Estas riostras internas, incluso si están hechas del cable más fino para que su peso sea insignificante, se oponen al paso del viento, incrementando la resistencia frontal sin aportar otras ventajas que compensen su uso.

## CELDAS TRIANGULARES EN LA CONSTRUCCIÓN DE COMETAS

Mirando atrás la línea que he seguido en mis experimentos de laboratorio, reconozco que la adopción de las celdas triangulares fue un paso decisivo, constituyendo de hecho uno de los hitos del progreso, uno de los puntos más sobresalientes de este confuso historial con numerosos detalles.

La siguiente figura 3, muestra un dibujo de una cometa típica de celdas en triángulo sobre el mismo modelo general de cometa de caja de **Hargrave** mostrada en la figura 1.

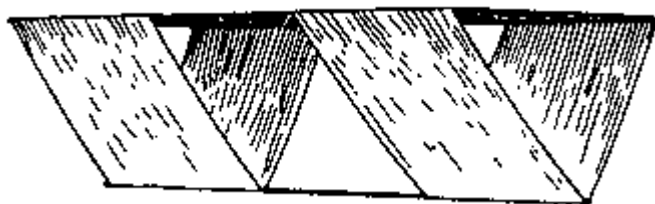


Fig. 3

Por su propia naturaleza, un triángulo está perfectamente arriostrado en su propio plano, y en una cometa de celda triangular como la de la figura 3 no se necesita ninguna riostra para evitar una distorsión análoga a la referida anteriormente para el caso de la celda rectangular de **Hargrave** (figura 2).

La sustentación que se consigue en una celda triangular es probablemente menor que en la de forma rectangular, pero la enorme ganancia en resistencia estructural, unido a la reducción en la resistencia frontal y peso por la privación de las riostras internas, compensa cualquier posible deficiencia al respecto.

Las superficies horizontales de la cometa son las que compensan el descenso debido a la fuerza de la gravedad, y las superficies verticales evitan su giro en el aire. Los aeroplanos oblicuos se pueden descomponer, de manera conveniente, en sus dos componentes horizontal y vertical, es decir, en superficies que aportan sustentación y en superficies estabilizadoras.

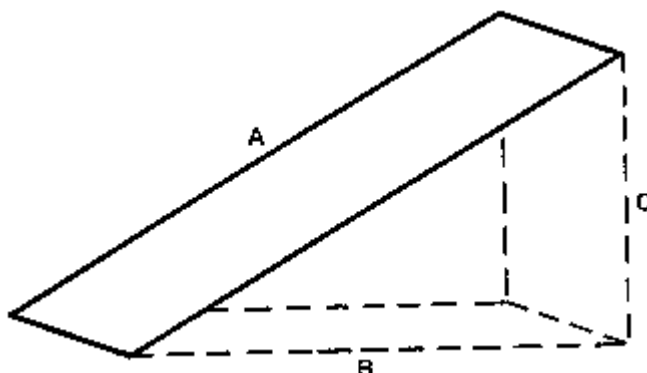


Fig. 4

Por ejemplo, en el aeroplano<sup>\*\*\*</sup> oblicuo *A* de la figura 4, puede considerarse funcionalmente equivalente a los aeroplanos *B* y *C*. El material que compone el aeroplano *A*, sin embargo, es menos pesado que el material requerido para los aeroplanos *B* y *C*, y el armazón requerido para soportar el aeroplano *A*, pesa menos que los dos armazones requeridos para soportar *B* y *C*.

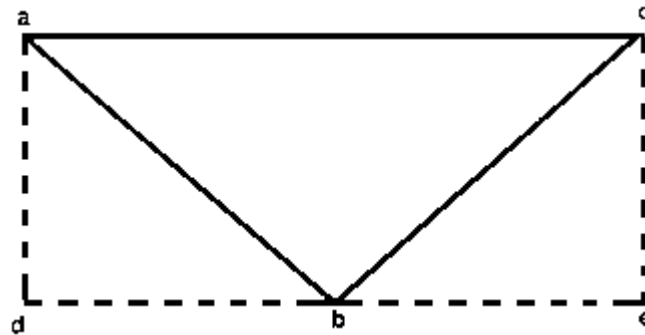


Fig. 5

En la celda triangular de la figura 5, las superficies oblicuas *ab*, *bc*, son equivalentes en cuanto a su función a las tres superficies *ad*, *de*, *ec*, pero pesando menos. Las superficies triangulares son pues más ventajosas,

La única desventaja de todo el asunto es que, con la forma triangular de celda, el aire no tiene acceso libre al aeroplano superior *ac*, tanto como en la forma rectangular, de modo que el aeroplano *ac* no es tan eficiente en la primera como lo es en la segunda.

Mientras que en teoría la celda triangular tiene menor sustentación que la celda rectangular de **Hargrave**, no hay casi diferencia. Hasta donde puede juzgar en mis observaciones en el vuelo de cometas construidas según el modelo general de caja de **Hargrave**, pero con celdas triangulares en vez de rectangulares, vuela tan bien como la forma original de **Hargrave**, y tan alto como ella.

Esas cometas son por lo tanto superiores, pues vuelan muy bien, a la vez que tienen una construcción más sólida, son más ligeras en peso y ofrecen una menor resistencia frontal al viento.

Las celdas triangulares están también admirablemente adaptadas para ser montadas formando una estructura mixta<sup>+++</sup>, en la cual las superficies aeroplanas no interfieren entre ellas. Por ejemplo, tres cometas de celdas triangulares, atadas las unas a las otras por las esquinas, forman una cometa celular mixta (figura 6) que vuela perfectamente bien.

<sup>\*\*\*</sup> A lo largo del artículo **Bell** denomina aeroplano a las superficies planas que forman la vela de la cometa, (Nota del traductor).

<sup>+++</sup> En el original "*compound structure*" o "*compound kite*", **Bell** se refiere a las estructuras o cometas construidas por adición de celdas o formas básicas más pequeñas. El término *compound* se ha optado por traducir como *mixto*. (N. T.)

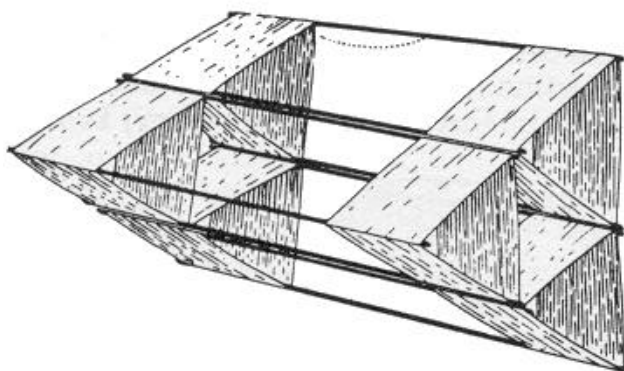


FIG. 6 COMETA MIXTA TRIANGULAR

El peso de la cometa mixta es la suma de los pesos de las tres cometas de las que se compone, y la superficie aeroplana es la suma de las superficies de las tres cometas. La razón peso/superficie es pues la misma en la cometa mixta que en sus elementos considerados por separado.

Es obvio que en las cometas mixtas de estas características, es innecesario doblar el número de varas donde se juntan las esquinas de las cometas que la componen, pues es fácil construir la cometa mixta de modo que una vara longitudinal sea substituida por las varas duplicadas.

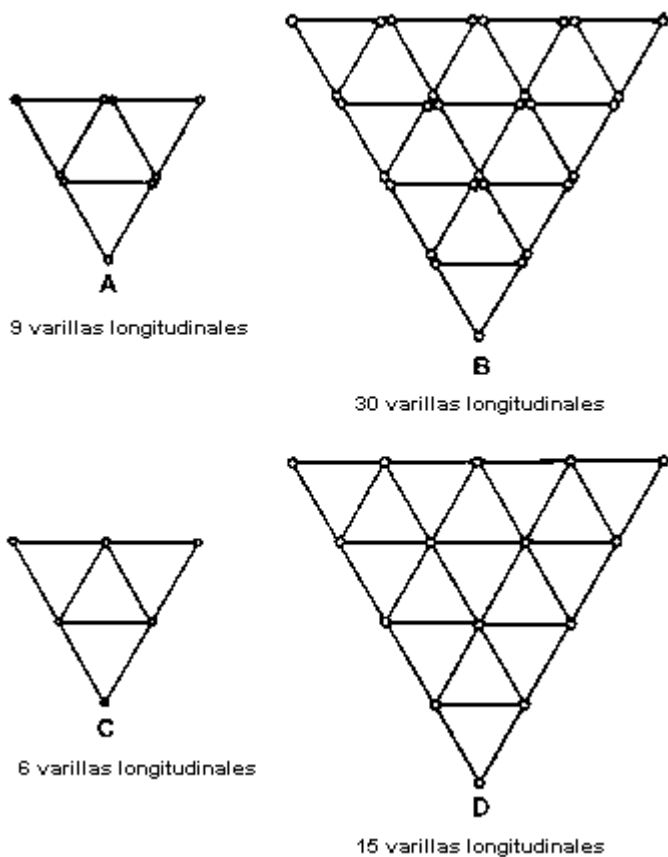


FIG. 7

Por ejemplo: las cometas mixtas *A* y *B* (figura 7) se pueden construir como se muestra en *C* y *D*, con ventajas, pues el peso de la cometa mixta queda reducido sin pérdida de resistencia estructural. En este caso el peso de la cometa mixta es menor que la suma de sus componentes, mientras que la superficie permanece constante.

Si las cometas se pudieran combinar satisfactoriamente tan solo de esta manera tendríamos el curioso resultado de que la razón peso/superficie disminuiría al añadirle mas partes. Desdichadamente, sin embargo, las condiciones para un vuelo estable requieren de un gran espacio entre las partes anterior y posterior

de las celdas (figura 6); y si incrementamos el diámetro de la estructura mixta sin incrementar la amplitud de este espacio dañamos las cualidades de vuelo de la cometa. Pero cada incremento de este espacio de proa y a popa lleva asociado el correspondiente aumento en la longitud del armazón sin recubrimiento necesario para la ampliación, de manera que se añade peso muerto a la cometa y se incrementa la razón peso/superficie.

Mientras que las cometa triangulares son resistentes en la dirección transversal - de lado a lado -, son estructuralmente débiles sobre el eje mayor, ya que en esta dirección los armazones de la cometa son rectangulares.

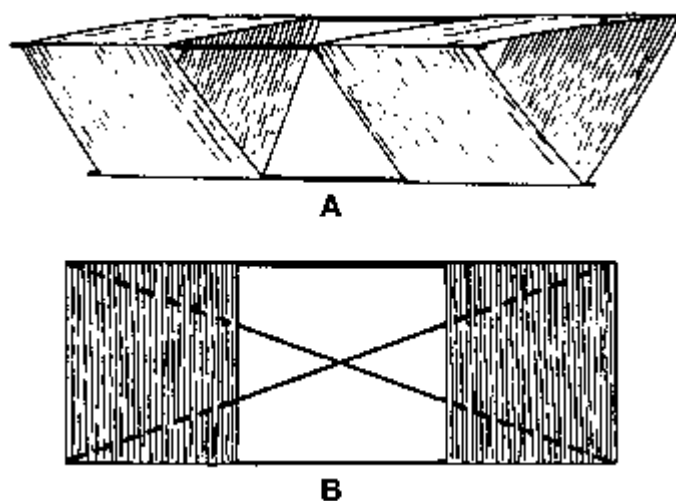


FIG. 8

Cada lado de la cometa *A*, por ejemplo (figura 8) necesita riostras diagonales como las de *B* para impedir la distorsión bajo la acción del viento. Las riostras necesarias, sin embargo, no estando en la dirección del viento, no afectan en la práctica a la resistencia frontal de la cometa, y solo añaden la desventaja añadir peso muerto, incrementando la razón peso/superficie.

## LA CONSTRUCCIÓN DE COMETAS TETRAÉDRICAS

Pasando por alto los múltiples experimentos llevados a cabo en mi laboratorio de Nueva Escocia, voy a tratar otro punto importante - un nuevo hito en el progreso - la aceptación de la construcción triangular *en los sentidos* (longitudinal y transversal); dándonos cuenta de la importancia fundamental del esquema del tetraedro, en especial del tetraedro regular, como elemento estructural o armazón de la cometa o de la maquina voladora.

Considere el caso de una celda corriente triangular *A* (figura 9) cuya sección transversal es triangular, pero la longitudinal es cuadrangular.

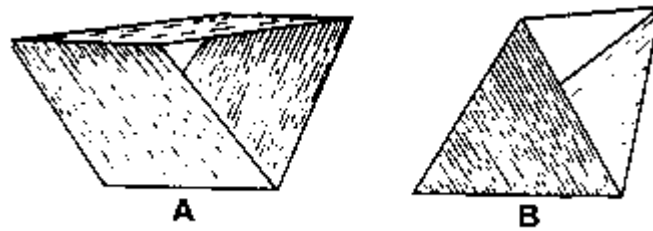
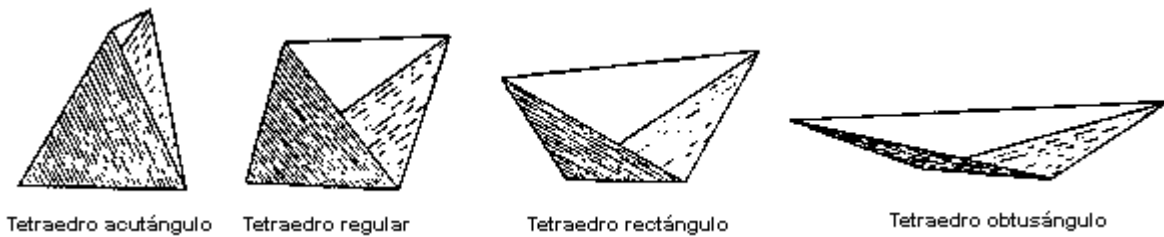


FIG. 9

Si ahora hacemos triangulares ambas secciones, llegamos a la forma de celda B, en la que el armazón dibuja el contorno de un tetraedro. En este caso los aeroplanos son triangulares, y el conjunto se asemeja a las alas de un ave levantadas en ángulo y unidas de punta a punta por medio de una varilla (ver B, figura 9 y también los dibujos de las celdas tetraédricas en figura 10).



Un tetraedro es un sólido formado por cuatro superficies o caras triangulares.

En el tetraedro regular esta formado a base de cuatro triángulos equiláteros y seis aristas iguales. En forma esquemática solo se representan las aristas, para el caso de un tetraedro regular se puede montar uniendo seis varillas iguales por sus extremos, formando cuatro triángulos equiláteros.

La mayoría de nosotros, sin duda, estamos familiarizados con los puzzles - como hacer cuatro triángulos con seis cerillas. De seis cerillas a un amigo y pídale que las componga de modo que formen cuatro triángulos equiláteros. La dificultad reside en que inconscientemente, se asume por parte del experimentador que los cuatro triángulos deben estar en el mismo plano. Cuando se da cuenta de que no es necesario que se encuentren en el mismo plano, la solución al problema es sencilla. Ponga tres cerillas sobre la mesa de modo que formen un triángulo, y sitúe las tres restantes de pie como las tres patas de un trípode. Las cerillas forman así el esquema de un tetraedro regular (ver figura 11).

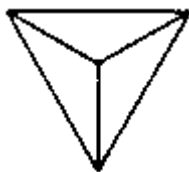


FIG. 11

Un armazón formado a partir de este modelo de seis varillas iguales unidas por sus extremos, constituye una celda tetraédrica, que posee las cualidades de resistencia y ligereza en grado sumo.

No está simplemente sujeta en las dos direcciones del espacio como en un triángulo, sino en tres, como un sólido. Si puedo inventar una expresión, diré que tiene "*resistencia tridimensional*", no "*resistencia bidimensional*" como en un triángulo, o "*unidimensional*" como en una varilla. Es la representación de un sólido, no de una superficie o de una línea.

Es sorprendente cuán firme es el armazón incluso cuando está construido a partir de materiales frágiles y ligeros, y las estructuras mixtas, que se consiguen uniendo los armazones tetraédricos por los vértices, formando un tetraedro regular a gran escala, tiene igual solidez.

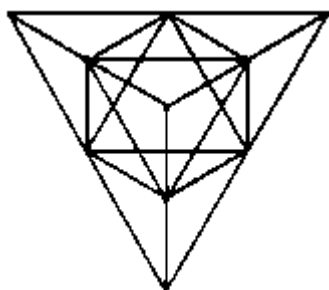


FIG. 12

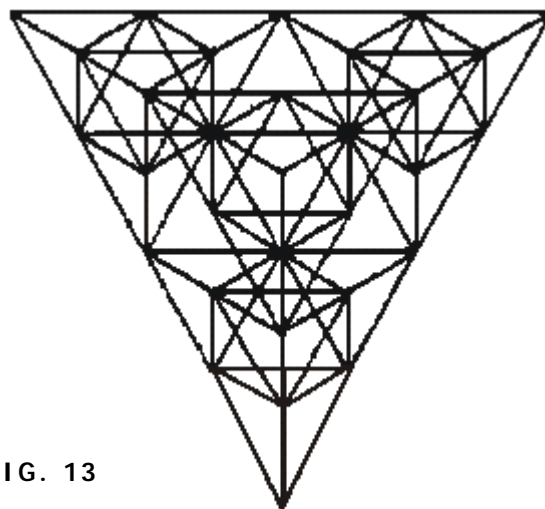


FIG. 13

La figura 12. muestra una estructura formada por cuatro molduras como la figura 11, la figura 13 es un armazón formado por cuatro armazones como los de la figura 12.

Cuando a un armazón tetraédrico se le incorporan las correspondientes superficies aeroplanas fabricadas con seda u otro material adecuado, se convierte en una cometa tetraédrica, o cometa con la forma de un tetraedro.

La cometa de la figura 14 esta compuesta por cuatro celdas de la variedad tetraédrica mostrada en la figura 10, unidas por los vértices. Cuatro cometas como la de la figura 14. se combinan formando la figura 15, y cuatro cometas como la de la figura 15 constituyen la mostrada en D de la figura 16.

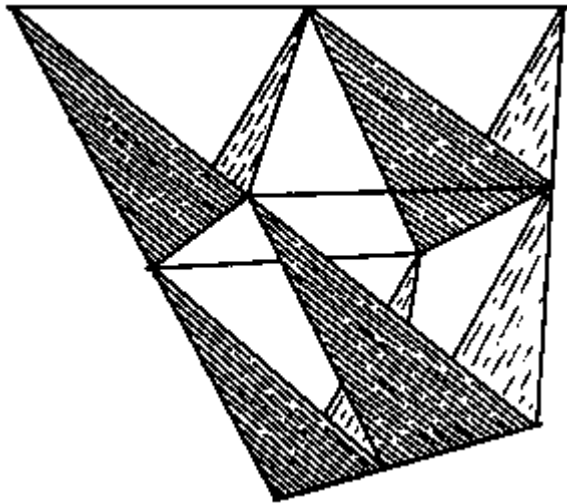


FIG. 14 COMETA TETRAÉDRICA DE CUATRO CELDAS

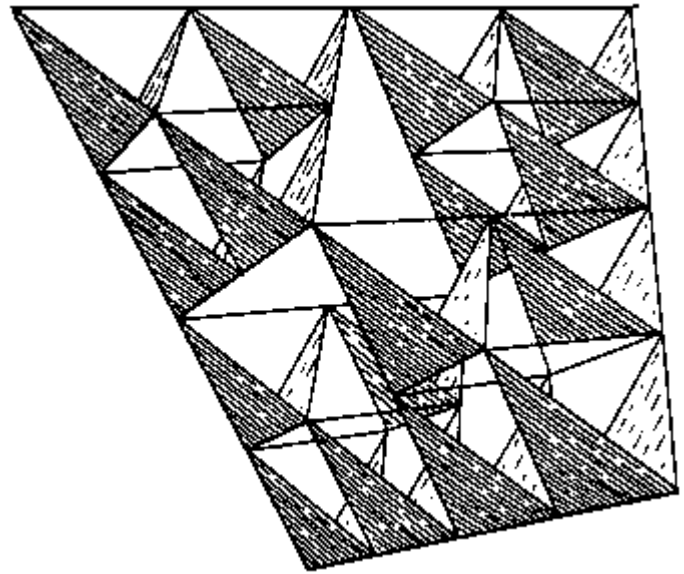


FIG. 15 COMETA TETRAÉDRICA DE DIECISEIS CELDAS

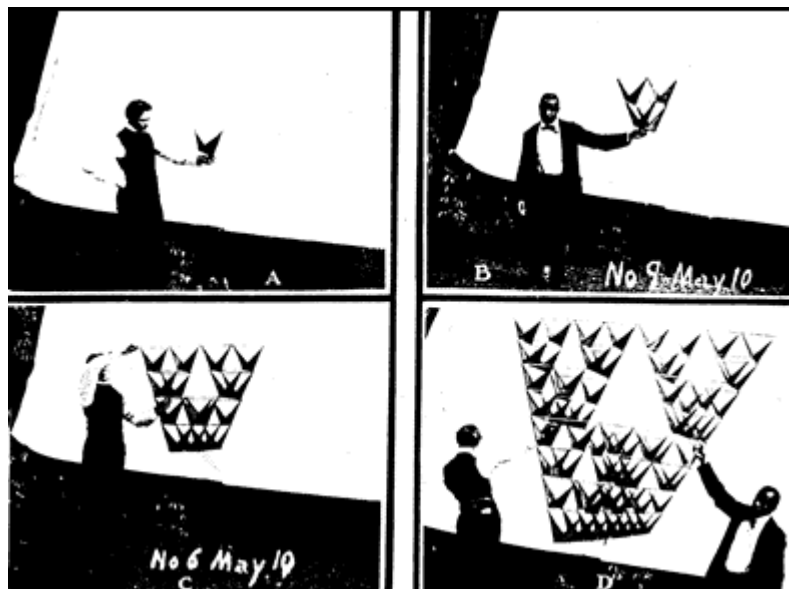


FIG. 16

A. CELDA TETRAEDRICA BÁSICA.

B COMETA TETRAÉDRICA CUATRO CELDAS

C. COMETA TETRAÉDRICA DE DIECISEIS CELDAS.

D. COMETA TETRAÉDRICA DE SESENTA Y CUATRO CELDAS.

A consecuencia de esta manera de construir, queda un espacio vacío octaédrico en la mitad de la cometa, que parece tener la misma función que el espacio entre las celdas de la cometa de caja de **Hargrave**. Las cometas tetraédricas tienen mayores espacios centrales manteniéndose mejor en equilibrio en el aire.

El lugar más adecuado para sujetar la cuerda a la estructura, es la punta de la proa de la cometa. Si la cuerda se sujeta a puntos sucesivamente mas alejados de la punta en la quilla, la cuerda tendrá cada vez un ángulo mayor respecto al horizonte, y la cometa volará mas cerca del cenit; pero no es recomendable llegar a un punto de sujeción tan atrasado como a la mitad de la quilla. Un buen punto de amarre para un vuelo alto es el situado a medio camino entre la proa y la mitad de la quilla.

En las cometas tetraédricas de la figura 16, sus estructuras adquieren en cada caso la forma de un tetraedro regular, y no hay razón para que este principio de combinación no pueda ser aplicado indefinidamente hasta formar combinaciones mayores.

La relación entre el peso y la superficie alar permanece constante, no importa cual grande sea la cometa mixta.

La cometa de cuatro celdas *B*, por ejemplo, pesa cuatro veces mas que una celda y tiene cuatro veces más superficie alar; la cometa de 16 celdas de *C* tiene 16 veces mas peso y 16 veces más superficie alar, y la cometa de 64 celdas de *D* tiene sesenta y cuatro veces mas peso y sesenta y cuatro veces más superficie alar. La razón peso/superficie, por lo tanto, es la misma en las cometas grandes que en las menores.

A primera vista, esto parece no estar de acuerdo con ciertas conclusiones matemáticas propuestas por el profesor **Simon Newcomb** en un artículo titulado *¿Viene el barco aéreo?*, publicado en el número de septiembre de 1901 de la *Mclure's Magazine*, conclusiones que le llevaron a creer que *"la construcción de un vehículo aéreo que llevara un solo hombre de un lugar a otro a placer pasa por el descubrimiento de un nuevo metal o de una nueva fuerza"*.

La línea de razonamiento por la cual el profesor **Newcomb** llega a este notable resultado es sin duda correcta. Su consecuencia, sin embargo, esta abierta a criticas, porque saca conclusiones a las que da carácter general a partir de unas pocas y limitadas premisas. Dice:

*"Hagamos dos maquinas voladoras exactamente iguales, solo que una sea a doble escala que la otra y, por lo tanto, el peso de dos cuerpos similares es proporcional al cubo de sus dimensiones. El cubo de dos es ocho: por ello la maquina pesada pesará ocho veces mas que la ligera. Pero para las superficies se aplica el cuadrado de la dimensión. El*

*cuadrado de dos es cuatro. La maquina mas pesada expone cuatro veces mas superficie al aire, y por ello tendrá una desventaja en la razón de eficiencia con respecto al peso."*

El profesor **Newcomb** muestra que dos maquinas voladoras, o cometas en este caso, que sean exactamente iguales, difiriendo únicamente en la escala de sus dimensiones, la razón entre el peso y la superficie portante es mayor en la grande que en la pequeña, aumentando con cada incremento de dimensión. Con lo que se concluye que si hacemos nuestra estructura lo bastante grande será demasiado pesada para volar.

Esto es cierto y es la razón de los muchos fallos cometidos cuanto se intenta elevar a un hombre, con ayuda de la cometa celular de **Hargrave**. Cuando la cometa se construye con dos celdas, cada una del tamaño aproximado de una pequeña habitación, se encuentra que seria necesario un huracán para levantarla en el aire. La cometa se mostró no solo incapaz de levantar la carga equivalente al peso de un hombre sino que ni siquiera pudo levantarse a sí misma con una brisa normal, pero cometas más pequeñas del mismo modelo volaban muy bien. No tengo dudas de que otros investigadores también han caído en el mismo error, el de suponer que las estructuras grandes deberían ser capaces de volar necesariamente, porque un modelo hecho a menor escala había demostrado su habilidad para sostenerse en el aire por sí mismo. El profesor **Newcomb** nos ha demostrado, con claridad, en sus investigaciones la naturaleza falsa de esta suposición.

Pero los resultados del profesor **Newcomb** son seguramente ciertos solo cuando se aplican bajo sus premisas. En modelos *idénticos, que solo difieren en sus dimensiones*, sus conclusiones son si duda firmes; pero cuando las cometas grandes están formadas por celdas de pequeñas cometas formando una estructura celular, los resultados son muy diferentes. Mis propios experimentos con cometas formadas a partir de celdas triangulares conectadas por los vértices, han demostrado el hecho de que las dimensiones de esas cometas pueden incrementarse mucho sin casi incrementar la razón peso/superficie de sustentación; y sobre el plan tetraédrico (figura 16) el peso relativo a la superficie alar permanece constante sin importar cuan grande sea la cometa mixta.

La expansión ilimitada de una estructura triangular esta restringida, por la aparición de peso muerto en forma de estructura sin aeroplanos en el espacio central existente entre los juegos de celdas (ver figura 16), de esta manera, con el necesario aumento de este espacio cuando las dimensiones de la cometa mixta se incrementan, con el fin de preservar la estabilidad de la cometa en el aire, se añade más peso muerto a la estructura grande. En el plan tetraédrico ilustrado en las figuras 14, 15, 16, no hay

necesidad de que haya una estructura sin aeroplanos en el espacio central, ya que el modo de construcción es de por sí firme sin ella.

Las cometas tetraédricas combinan de una manera notable las cualidades de resistencia, ligereza y vuelo estable; pero se requieren mas pruebas antes de decidir que esta forma es la mejor para una cometa, o que las celdas sin aeroplanos horizontales son la mejor disposición para una aerosuperficie.

El principio tetraédrico nos permite construir armazones sólidos a partir de materiales con casi cualquier forma que se desee, y las estructuras que resultan están admirablemente adaptadas para soportar aerosuperficies de la clase y forma que se desee (aeroplanos, aerocurvas, etc., grandes o pequeñas).

Mas ilustraciones del principio tetraédrico aplicado a la construcción de cometas, se muestra en la figura 17, en la cometa de la fotografía, se aprecia que no tiene forma tetraédrica, pero la estructura de la que esta hecha sí.



FIG. 17 COMETA AERODROME

La cometa, aunque muy diferente en lo constructivo se parece al *Aerodrome* del profesor **Langley**, que vi en un vuelo con éxito sobre el *Potomac* hace unos pocos años, tiene algo que recuerda al *Aerodrome* y fue de hecho el aparato del profesor **Langley** lo que me llevo a concebir esta forma.

Las superficies de las alas están formadas por aeroplanos horizontales, con sólidas superficies oblicuas en los extremos. El cuerpo de la máquina tiene la forma de un barco, y la superestructura constituye el soporte para los aeroplanos extendidos transversalmente al casco en dos puntos cerca de la popa y de la proa.

Las superficies aeroplanas forman materialmente dos pares de alas, puesta a manera de un *Dragón Volador*.

Toda la estructura del casco y las alas esta formada por celdas tetraédricas, con la forma de un tetraedro regular a excepción de la riostra diagonal en la parte de abajo de la superestructura; de esta forma la cometa se vuelve más resistente, ligera y equilibrada.



**FIG. 18 COMETA AERODROME EN EL MOMENTO DE ELEVARSE EN EL AIRE ARRASTRADA POR UN CABALLO.**

He volado esta cometa en calma atando la cuerda- en este caso *soga de Manila*- a un caballo al galope. La figura 18 muestra a la cometa justo cuando se eleva en el aire. Con el caballo al fondo, la cuerda no se ve. En la figura 19 se ve la fotografía de una cometa en su máxima elevación, pero el caballo no aparece en la imagen. Al soltar la cuerda, la cometa descendió tan suavemente, que no causo daño alguno al aparato al aterrizar en el suelo.

La figura 20. muestra una variación de la cometa en la que, además del casco central se le añadían dos flotadores laterales, permitiendo que toda la estructura flotara sobre el agua sin peligro.

Un ensayo, que casi acaba en desastre, se hizo con esta cometa con una buena brisa para navegar, pero un golpe de viento la empujó antes de que se diera cuerda. La cometa se elevó, levantando a dos hombres que la sujetaban. Por supuesto, soltaron al instante, y la cometa se alzó rápidamente en el aire hasta que la cuerda (*soga de Manila* de 3/8 de pulgada de diámetro) formó un ángulo de 45° con el horizonte, y el hilo se rompió por efecto del tirón.



FIG. 19 COMETA AERODROME EN EL AIRE

Siguieron tremendas oscilaciones que hacían cabecear a la cometa, pero como ésta se encontraba a gran altura, cuando ocurrió el accidente, las oscilaciones tuvieron tiempo de atenuarse antes de que la cometa llegara al suelo, cuando aterrizó sana y salva sobre cada quilla en un campo cercano, vimos que estaba bastante dañada por la dura experiencia pasada.

Las cometas de este tipo, tienen mucha más capacidad de elevación que lo que se pudiera pensar en principio. Es natural asumir que la superestructura alada, por sí misma soporta la cometa en el aire, y que el casco y los flotadores aportan tan solo peso muerto y resistencia frontal. Pero ello está lejos de ser el caso. Los cuerpos con forma de barco que tienen por sección transversal forma de V son capaces de volar exponiendo una gran superficie al viento. He volado con éxito un barco de esta clase como una cometa sin superestructura

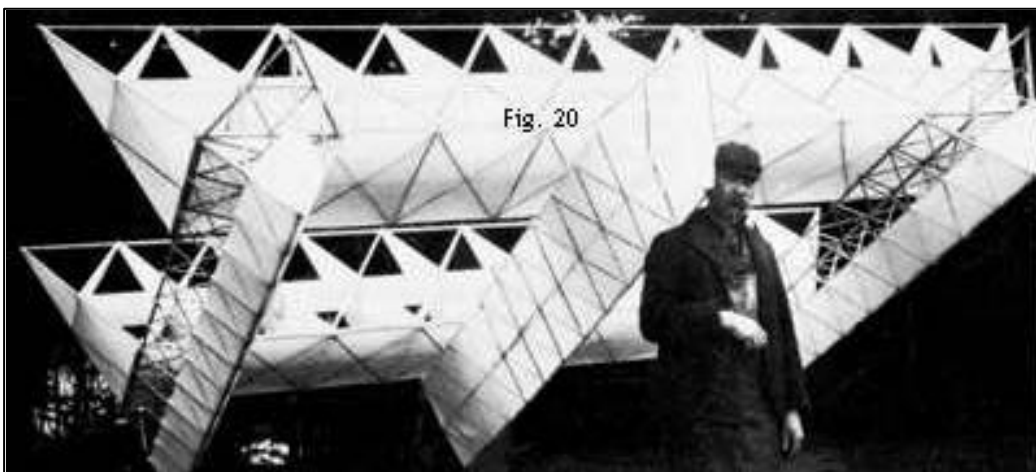


FIG. 20 COMETA CON FLOTADORES

alguna, y aunque no voló muy bien, se mantuvo en el aire, demostrando el hecho de que la superficie del casco es un elemento portante en las cometas mixtas como las de las figuras 17 y 20.

Por supuesto, el uso de celdas tetraédricas no se limita a la construcción de armazones para cometas y maquinas voladoras. Es aplicable a cualquier clase de estructura en la que sea deseable combinar las propiedades de resistencia y ligereza. Igual que podemos construir casas con toda clase de ladrillos, podemos construir toda clase de armazones tetraédricos, y las estructuras resultantes tendrán las mismas cualidades de resistencia y ligereza características de las celdas individuales. Yo he construido ya una casa, una estructura para una mampara cortavientos gigante, tres o cuatro barcos y varias formas de cometas a partir de estos elementos.

No es mi objetivo en este artículo describir los experimentos que he hecho en mi laboratorio en Nueva Escocia, sino simplemente atraer a su atención la importancia del principio del tetraedro en la construcción de cometas.

- 1903 *National Geographic Magazine*



# Principios geométricos en el diseño de las cometas tetraédricas

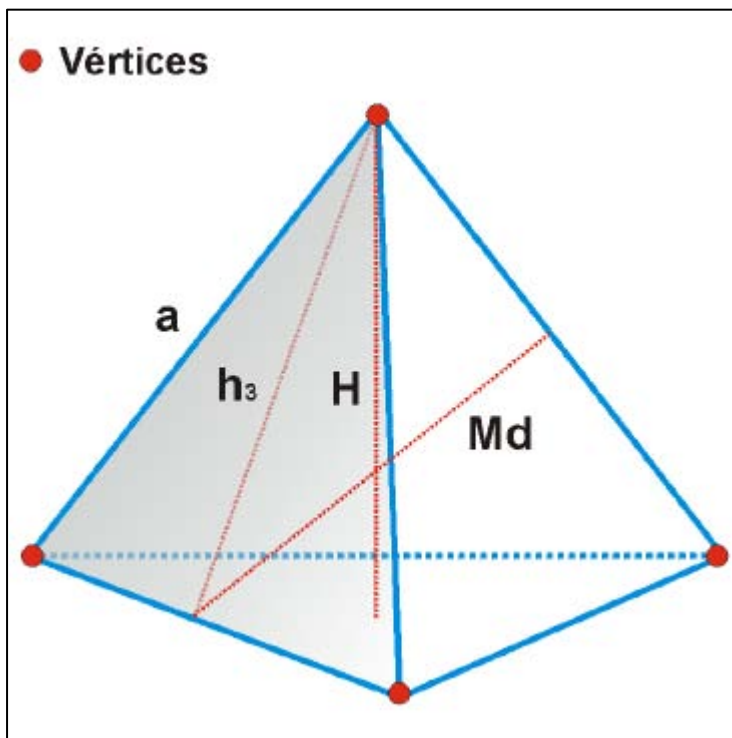
Juan Miguel Suay Belenguer  
Ingeniero Superior Industrial  
jm\_suay@inves.es

## Resumen

Exposición de los principios postulados en 1903 por **Alexander Graham Bell** en la construcción de cometas a partir de estructuras tetraédricas formadas por celdas básicas. **Bell** afirmaba que la relación entre el peso de la estructura y la superficie de sustentación (densidad) permanece constante independientemente del tamaño de la cometa. Este principio ha sido revisado recientemente en 1993, ya que **Bell**, suponía que el peso de la cometa era proporcionado tan solo por las seis aristas de cada celda tetraédrica, sin contar el peso de las uniones en los vértices, si se tienen en cuenta, entonces la densidad disminuye al aumentar el tamaño, implicando una mayor eficiencia en el vuelo

## Introducción

El **tetraedro**, es un poliedro regular formado por cuatro caras iguales formadas por triángulos equiláteros, seis aristas y cuatro vértices.



En el tetraedro encontramos las siguientes propiedades:

- Las aristas concurrentes forman entre sí un ángulo de  $60^\circ$ .
- Las aristas opuestas se cruzan ortogonalmente<sup>1</sup> en el espacio.
- El centro geométrico se encuentra a un cuarto de su altura.

Definimos los siguientes elementos:

**a**: arista.

**$h_3$** : altura de una cara.

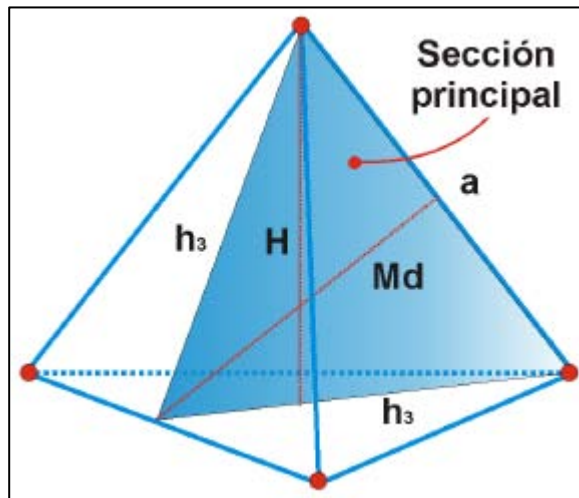
**$Md$** : Mínima distancia entre aristas

opuestas.

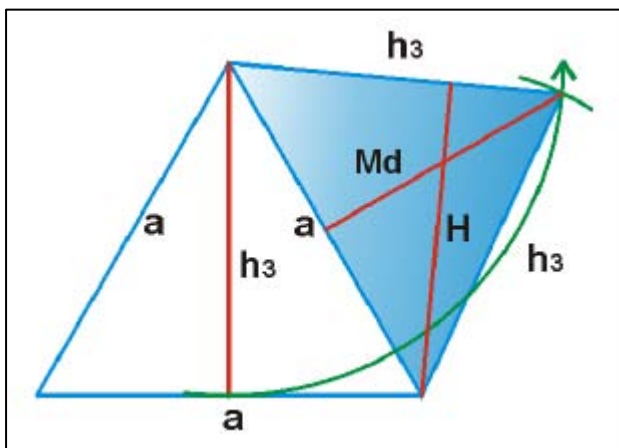
<sup>1</sup> Formando un ángulo de  $90^\circ$

**H:** Altura del poliedro o distancia entre un vértice y la cara opuesta.

Se denomina **sección principal** de un tetraedro, al triángulo isósceles formado por una arista y las alturas de dos caras contiguas, y que contienen a **H** y **Md**.

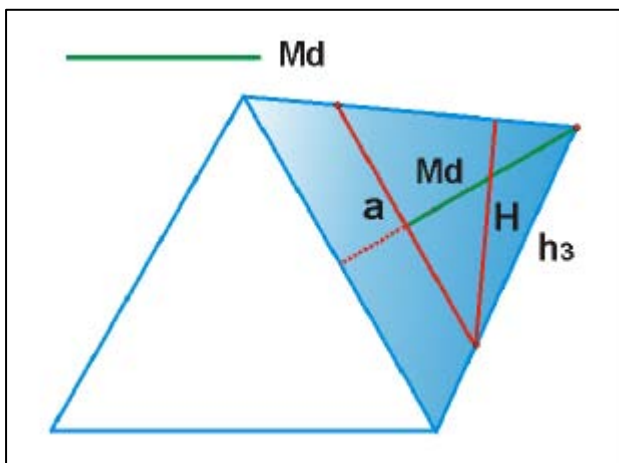


Para la construcción geométrica de un tetraedro, se puede resolver el problema de dos formas:



1) *Dada la arista de un tetraedro, calcular el resto de los elementos.*

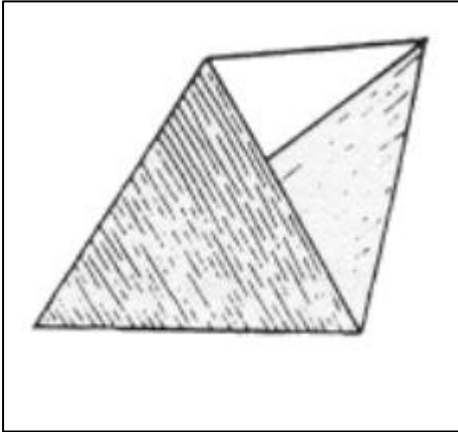
Trazamos un triángulo equilátero, cuyo lado sea la arista **a**, se obtiene inmediatamente **h<sub>3</sub>** que es la altura de una cara, estos dos elementos nos permiten dibujar la sección principal del tetraedro y hallar los datos que nos faltan **H** y **Md**



2) *Dado otro elemento distinto de la arista, calcular el resto.*

Trazamos un triángulo equilátero de lado una longitud cualquiera, y se dibuja la sección principal correspondiente, como todas las secciones principales de todos los tetraedros son semejantes, llevamos sobre la obtenida el valor que conocemos, en el ejemplo **Md**, y trazando paralelas a los lados conocidos tendremos la sección principal correspondiente, y por lo tanto el resto de elementos a conocer.

principal correspondiente, y por lo tanto el resto de elementos a conocer.



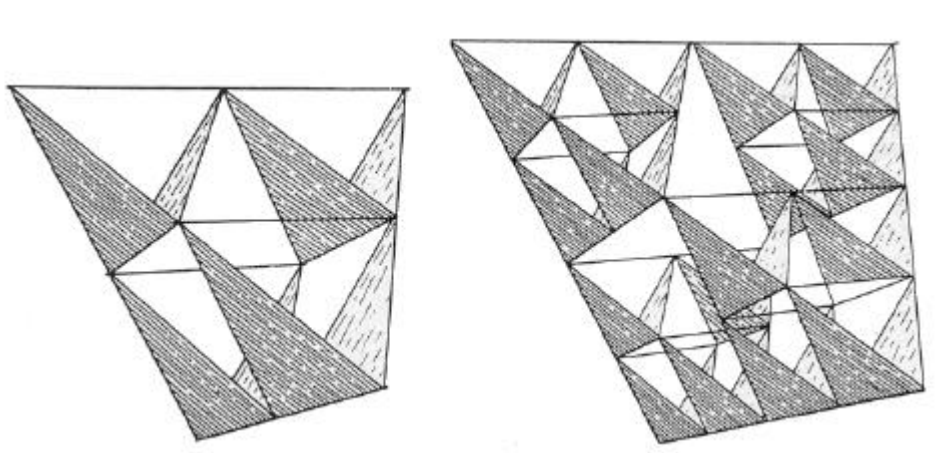
Si construimos un armazón ligero con forma de tetraedro y recubrimos con una vela dos de sus caras, tenemos lo que llamaremos una **celda tetraédrica básica**.

En junio de 1903 **Alexander Graham Bell** publicó un artículo en la revista *National Geographic Magazine*, titulado *The Tetrahedral Principle in Kite Structure* (El Principio del tetraedro en la estructura de una cometa). En este artículo, **Bell** intentaba resolver uno

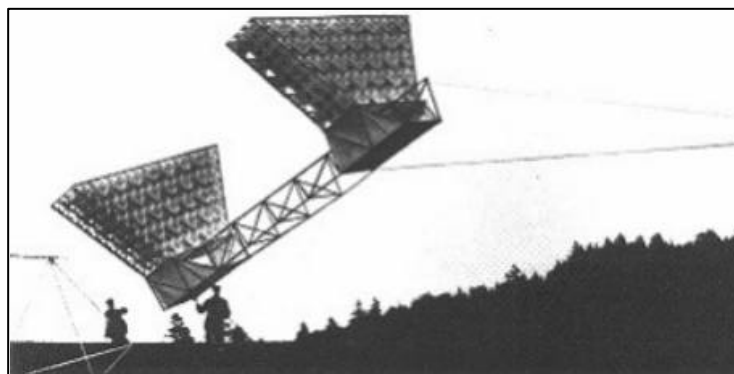
de los hitos científicos de la época, la construcción de una máquina más pesada que el aire que pudiera volar, tripulada y con control. **Bell** creía que:

*"...una máquina voladora adecuadamente construida debería ser capaz de volar como una cometa; y, a la inversa, que una cometa adecuadamente construida debería ser capaz de ser usada como máquina voladora si es autopropulsada."*

Sus experimentos se llevaron a cabo con cometas formadas por múltiples celdas tetraédricas básicas siendo las más simples las mostradas en la figura.



Llegando a construir y volar formas más complejas:



La propiedad que tienen esta adición de celdas, según argumentó **Bell**, es que el aumento de peso, que conlleva cada nuevo modulo, aumenta en la misma proporción la superficie de sustentación, por lo tanto se mantiene la relación peso / superficie, y por tanto su capacidad de vuelo. Este enunciado se conoce como el principio del tetraedro de Bell.

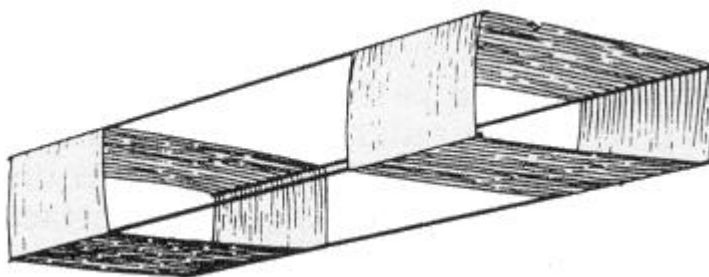
## El principio del tetraedro de Bell

En sus experimentos en el diseño de cometas, **Bell** fijó como objetivos:

*"No me he preocupado de cerciorarme de cuan alto una cometa puede volar. El asunto que tenía en mente era que el equilibrio de la estructura en el aire de ser perfecto, que la cometa debe volar estable y no moverse de lado a lado o bajar repentinamente cuando la acomete un golpe de viento, y que cuando se la libera debe caer lenta y suavemente al suelo sin oscilación. También he tenido en cuenta que la estructura debe tener gran fuerza con poco peso."*

*"... los logros recientes en el arte se deben en su mayor parte a los esfuerzos de un hombre, el Señor **Lawrence Hargrave**, de Australia... y al Señor **Eddy** y otros en América tomaron las cometas malayas sin cola como base para sus experimentos"*

**Bell** hizo las siguientes observaciones sobre la cometa celular de **Hargrave**:



*"... En mi opinión, el máximo hito del progreso en el siglo XIX, es este tipo de cometa, el punto inicial de mis propias investigaciones. Las celdillas anterior y posterior están conectadas por medio de un marco, de manera que queda un gran espacio entre ellas. Este espacio es un rasgo esencial de la cometa: de él depende la estabilidad anterior y posterior de la cometa. Cuanto más espacio más estable es la cometa en cualquier dirección, mas tiende a tomar la posición horizontal en el aire, y menos tiende a hundirse o elevarse como un barco en el mar. Las elevaciones u oscilaciones quedan casi por completo suprimidas cuando el espacio entre las celdillas es grande. Cada celdilla tiene lados verticales; y, nuevamente, esto parece ser un elemento esencial de la cometa que contribuye a la estabilidad lateral. Cuanto mayores son los lados*

*verticales mayor es la estabilidad en la dirección lateral, y menor la tendencia a girar sobre si misma o a moverse de lado a lado."*

En su artículo, **Bell** explica la superioridad de una estructura tetraédrica en una cometa frente a las de tipo celular. **Bell** razonó que conforme la cometa de **Hargrave**, se hace más grande, requiere elementos más pesados en su estructura y es necesario incrementar su arriostramiento interno, el cual:

*"...añade resistencia a la cometa sin contribuir al empuje ascensional."*

En 1901 se publicó un artículo en la revista *McClure's Magazine* titulado *Is the Air-Ship Coming?*, escrito por un matemático llamado **Newcomb**, él exponía lo que se conoce como principio de semejanza:

*"Hagamos dos maquinas voladoras exactamente iguales, solo que una sea a doble escala que la otra y, por lo tanto, el peso de dos cuerpos similares es proporcional al cubo de sus dimensiones. El cubo de 2 es 8: por ello la maquina pesada pesara 8 veces mas que la ligera. Pero para las superficies se aplica el cuadrado de la dimensión. El cuadrado de 2 es 4. La maquina mas pesada expone 4 veces mas superficie al aire, y por ello tendrá una desventaja en la razón de eficiencia con respecto al peso."*

Por lo que concluye que:

*"Si hacemos nuestra estructura lo bastante grande será demasiado pesada para volar."*

Pero **Bell** se dio cuenta de que:

*"Sobre el plan del tetraedro, el peso relativo a la superficie del ala permanece igual sin importar lo grande que sea la cometa."*

Explicaremos por qué se produce esta curiosa propiedad:

Una celda tetraédrica esta formada por seis aristas que cada una tendrá un peso **Pa**, por lo tanto cada celda pesara:

$$P_c = 6 \cdot P_a$$

La superficie sustentadora de la celda será igual a la superficie de las dos caras, que llamaremos **Ac**.

Si suponemos que la vela no aporta peso a la estructura, la relación peso - superficie, será igual a:

$$r = \frac{P}{Ac} = \frac{6 \cdot Pc}{Ac}$$

Para una cometa formada por cuatro celdas, tendremos veinticuatro aristas y cuatro superficies sustentadoras:

$$r = \frac{24 \cdot Pc}{4 \cdot Ac} = \frac{6 \cdot Pc}{Ac}$$

En general si llamamos **E** al número total de aristas de una estructura formada por **N** celdas tetraédricas, se cumple que:

$$E = 6 \cdot N$$

Por lo tanto:

$$r = \frac{P}{A} = \frac{E \cdot Pc}{N \cdot Ac} = \frac{6 \cdot N \cdot Pc}{N \cdot Ac} = \frac{6 \cdot Pc}{Ac}$$

Luego la **densidad (● )** o **relación peso / superficie** permanece constante.

**Bell** finaliza su artículo como sigue:

*"No es mi objetivo en este artículo describir los experimentos que he hecho en mi laboratorio en Nueva Escocia, sino simplemente atraer a su atención la importancia del principio del tetraedro en la construcción de cometas."*

## **El principio del tetraedro revisado**

En el número de enero de 1993 en el boletín *The Kiteflier* publicado por el *Kite Society of Great Britain* aparecía un artículo del profesor **Patrick Prosser** de la Universidad de Strathclyde de Glasgow. Dicho artículo llevaba por título *Observations on tetrahedral kite* (Observaciones sobre las cometas tetraédricas).

**Prosser** propone una revisión al principio del tetraedro:

*"Primero, déjenme decir que mi compatriota **Alexander G. Bell**, cometió un ligero error al postular que la relación entre el peso y la superficie alar permanece constante sin importar el tamaño de la cometa. Sugiero que el Sr. Bell tenía que ser más preciso y dejar claras las cosas que asume. Sus afirmaciones son verdaderas si suponemos que el "coste" de montar el tetraedro es cero. Con esto quiero decir, que los vértices aportan un peso nulo."*

El nuevo principio reza:

*Cuando el peso de los vértices del tetraedro no es cero, la relación entre el peso y la superficie alar decrece conforme se subdivide la cometa.*

Demostraremos tan revolucionaria afirmación:

Suponemos que tenemos una celda tetraédrica de una unidad de longitud. Es decir, cada uno de sus seis aristas tiene tamaño 1.

Construyamos una cometa mayor a partir de **N** celdas, su arista exterior tendrá una longitud **D**. En el proceso de montaje habremos unido las **N** celdillas por sus vértices.

Definimos las siguientes variables:

**D**: frecuencia del tetraedro, que es el número de aristas unitarias con las que se puede dividir la arista exterior de la estructura.

**N x L**: el número de celdas tetraédricas en cada fila de la estructura.

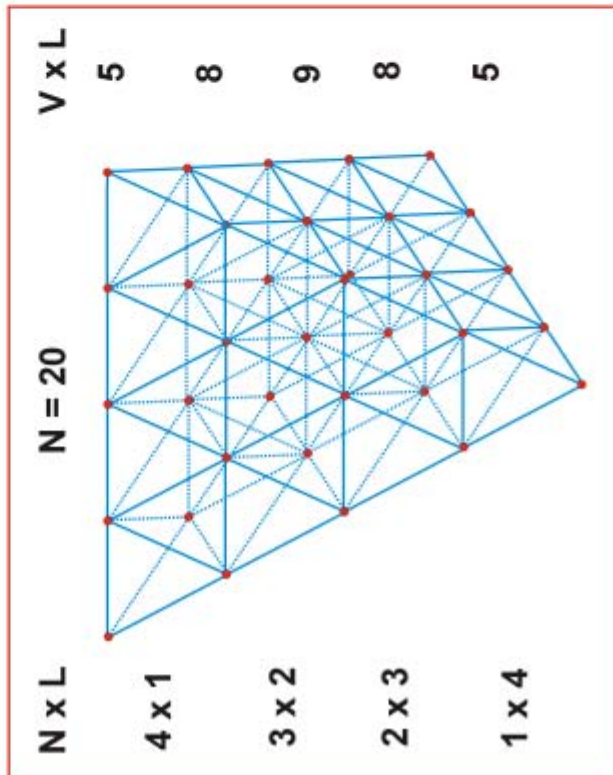
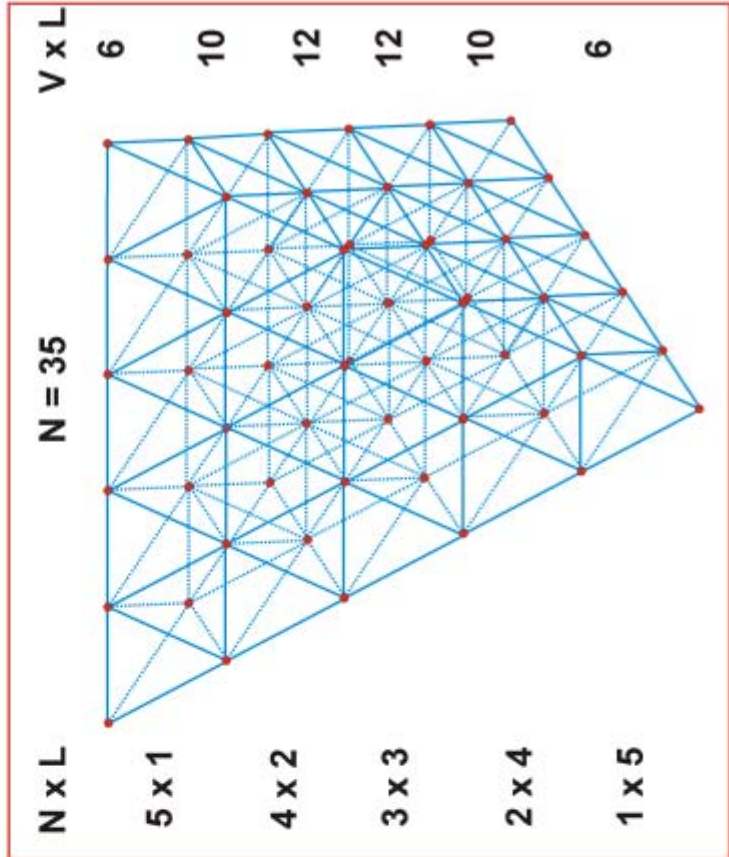
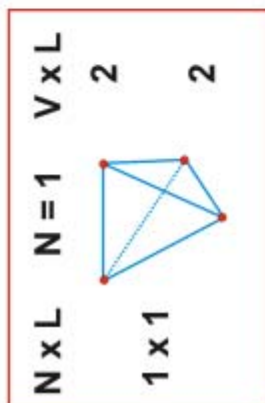
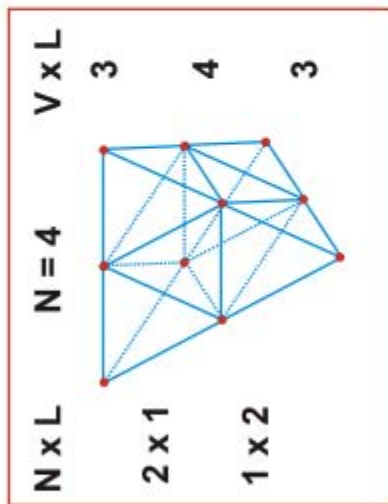
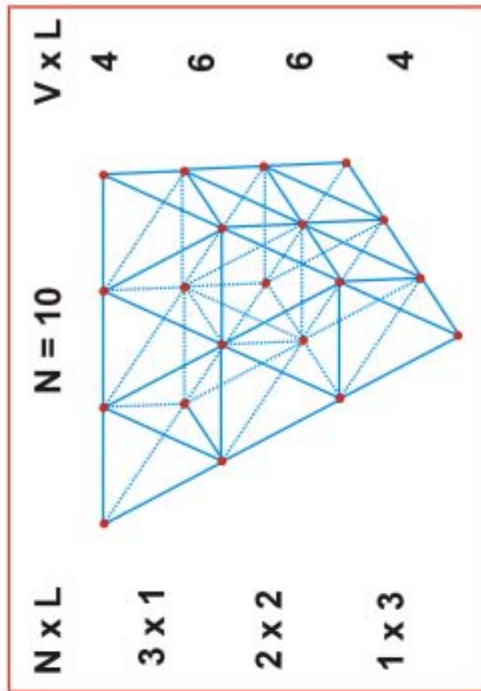
**N**: el número total de celdas tetraédricas que constituye la estructura.

**V x L**: el número de vértices en cada fila de la estructura.

**V**: el número total de vértices, que constituye la estructura.

**V / N**: el promedio de vértices necesarios para mantener las celdas juntas. Podemos pensar que es una indicación de la densidad de la estructura.

**E**: número de aristas totales que constituye la estructura

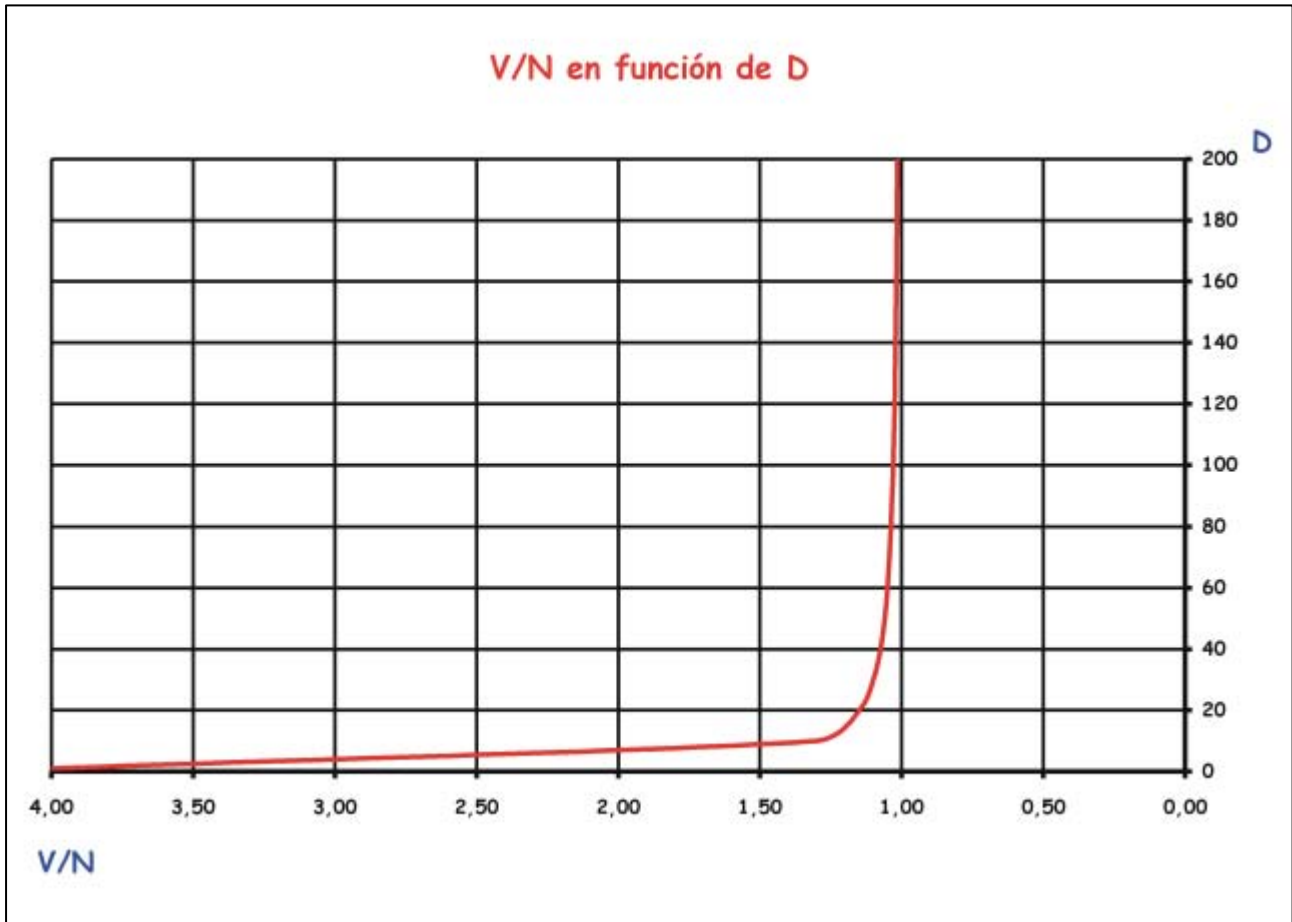


D	N x L	N	V x L	V	V / N	E
1	1 x 1	1	2 2	4	4,0	6
2	2 x 1 1 x 2	4	3 4 3	10	2,5	24
3	3 x 1 2 x 2 1 x 3	10	4 6 6 4	20	2,0	60
4	4 x 1 3 x 2 2 x 3 1 x 4	20	5 8 9 8 5	35	1,75	120
5	5 x 1 4 x 2 3 x 3 2 x 4 1 x 5	35	6 10 12 12 10 6	56	1,60	210

La columna de  $V/N$ , representa el número promedio de vértices por celdilla dentro de la estructura. Demostraremos que conforme  $D$  o lo que es lo mismo  $N$  aumenta,  $V/N$  rápidamente se acerca al valor 1.

Veamos la siguiente tabla para los primeros cien tetraedros.

D	N	V / N
1	1	4,0
10	220	1,3
20	1.540	1,15
30	4.960	1,1
40	11.480	1,075
50	21.100	1,06
60	37.820	1,05
70	59.640	1,0428
80	88.560	1,0375
90	125.580	1,0333
100	171.700	1,03



Dado **D** se puede calcular el número de celdas **N** usando la ecuación:

$$N = \frac{D^3 + 3 \cdot D^2 + 2 \cdot D}{6}$$

Como se puede ver por la fórmula el número de celdas se incrementa en la proporción de **D<sup>3</sup>**.

**V** el número total de vértices en el tetraedro compuesto de arista **D**, es el igual al número de celdas en el tetraedro compuesto de arista **D+1**.

Por tanto sustituyendo en la fórmula anterior **D=D+1** y despejando:

$$V = \frac{D^3 + 6 \cdot D^2 + 11 \cdot D + 6}{6}$$

La expresión para **V/N** queda:

$$\frac{V}{N} = \frac{D^3 + 6 \cdot D^2 + 11 \cdot D + 6}{D^3 + 3 \cdot D^2 + 2 \cdot D}$$

Hallaremos el límite de  $V/N$  cuando  $N \rightarrow \infty$ .

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{V}{N} = \lim_{D \rightarrow \infty} \frac{D^3 + 6 \cdot D^2 + 11 \cdot D + 6}{D^3 + 3 \cdot D^2 + 2 \cdot D}$$

Dividiendo el numerador y el denominador por  $D^3$ :

$$\lim_{D \rightarrow \infty} \frac{1 + \frac{6}{D} + \frac{11}{D^2} + \frac{6}{D^3}}{1 + \frac{3}{D} + \frac{2}{D^2}}$$

Como  $\lim_{D \rightarrow \infty} \frac{1}{D^n} = 0$  con  $n \geq 1$

$$\lim_{D \rightarrow \infty} \frac{1 + \frac{6}{D} + \frac{11}{D^2} + \frac{6}{D^3}}{1 + \frac{3}{D} + \frac{2}{D^2}} = \frac{1 + 0 + 0 + 0}{1 + 0 + 0} = 1$$

Con lo que queda demostrada la afirmación.

Si consideramos el peso de los vértices, una celda tetraédrica esta formada por seis aristas que cada una tendrá un peso  $P_a$  y por cuatro vértices, cada uno de ellos de peso  $P_v$ .

Una estructura formada por  $N$  celdas tetraédricas tendrá:  $E$  aristas y  $V$  vértices, el peso total  $P$  de la cometa será:

$$P = E \cdot P_a + V \cdot P_v = 6 \cdot N \cdot P_a + V \cdot P_v$$

La superficie sustentadora será igual a:

$$A = N \cdot A_c$$

Siendo **A<sub>c</sub>** la superficie sustentadora de cada una de las celdas.

$$r^N = \frac{6 \cdot N \cdot P_a + V \cdot P_v}{N \cdot A_c} = \frac{6 \cdot P_a}{A_c} + \frac{V \cdot P_v}{N \cdot A_c}$$

El primer término es la densidad de **Bell**:

$$\frac{6 \cdot P_c}{A_c} = r$$

Llamando **k** al término:

$$\frac{P_v}{A_c} = k$$

Queda:

$$r^N = r + \frac{V}{N} \cdot k$$

Dando valores:

$$N = 1 \quad r' = r + 4 \cdot k$$

$$N = 2 \quad r'' = r + 2 \cdot k \quad r'' < r'$$

$$N = 3 \quad r''' = r + 1,75 \cdot k \quad r''' < r' < r'$$

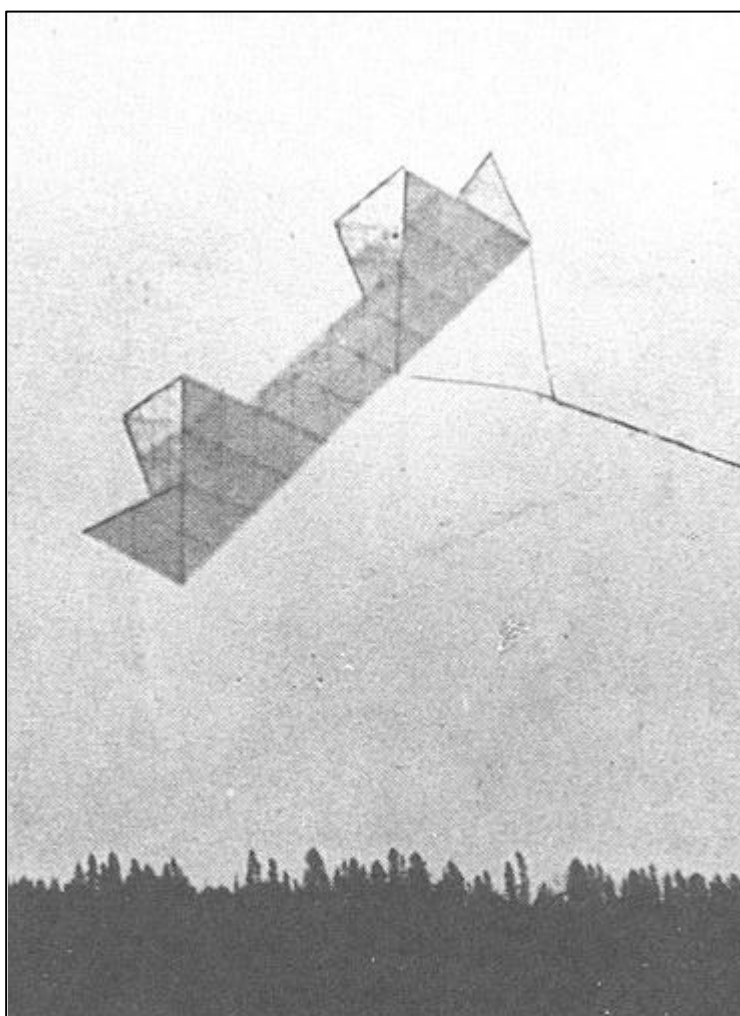
.....

$$N \otimes \infty \quad \frac{V}{N} \otimes 1 \quad r^{\infty} \otimes r + k$$

Conforme se incrementa **D** la densidad de la estructura **V/N** decrece aproximándose rápidamente a la unidad, y si la estructura mas pesada es un vértice, la disminución densidad es significativa. En otras palabras, cuanto más se divide la cometa tetraédrica más eficiente se vuelve.

## Bibliografía

- Bell, Alexander G. "*The Tetrahedral Pinciple in Kite Structure*" National Geographic Magazine, volumen 14, parte 6, Washington 1903.
- Ferrer, José Luis. "*Superficies. Sistema diédrico*". Servicio de publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia. Valencia 1976.
- Prosser, Patrick. "*Observations on tetrahedral kites*" The Kiteflier, boletín de la Kite Society de Gran Bretaña, publicación nº 54 enero de 1993.



## Construcción de cometas tetraédricas con materiales sencillos

**Juan Miguel Suay Belenguer**  
Ingeniero Superior Industrial  
jm\_suay@inves.es

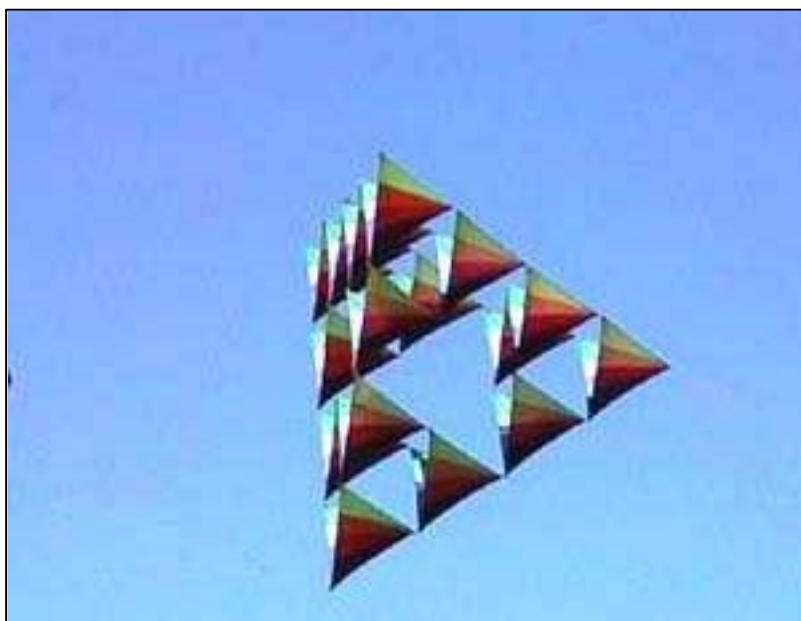
### Introducción

Las cometas tetraédricas de **Bell**, como hemos comentado en los artículos precedentes poseen un vuelo muy estable, cuanto mayor es el número de celdas que poseen.

Las estructuras que se proponen construir, parten de las siguientes consideraciones: se emplearan materiales baratos y sencillos, por lo tanto, las construiremos rígidas, tal como las hizo **Bell**, limitando el tamaño de los armazones, siendo conscientes de los problemas de transporte que pueden ocasionar.

Con estas premisas, se emplearan palillos largos de madera de los utilizados para las *Brochetas*, y como recubrimiento papel de seda o, si queremos una mayor resistencia, de envolver, todo ello pegado con ayuda de cinta adhesiva y pegamento universal.

Construyendo una serie celdas tetraédricas básicas, y luego uniéndolas de manera adecuada, formaremos los tres tipos de cometas que se proponen: de cuatro, dieciséis y veintidós celdas.



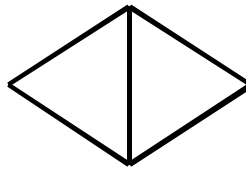
## Construcción de la celda tetraédrica básica

### Materiales:

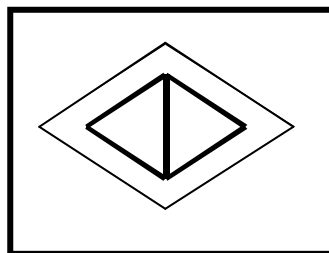
Seis palillos largos de madera  
Papel recortado según patrón  
Cinta adhesiva transparente

### Construcción del patrón para recortar la cubierta de papel

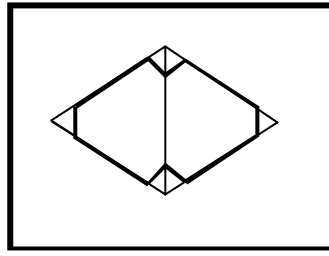
1) Usando cinco palillos, construir un rombo con su diagonal:



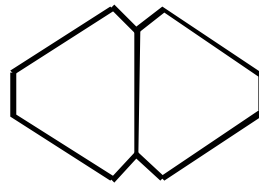
2) Empleando como patrón el rombo, dibujar en un cartón la forma, añadiéndole un margen de 2,5 cm alrededor.



3) Dibujar unos quiebros en los vértices a lo largo de la diagonal y truncar los otros dos vértices.



4) Recortar la figura que servirá de patrón para cortar la cubierta de papel.

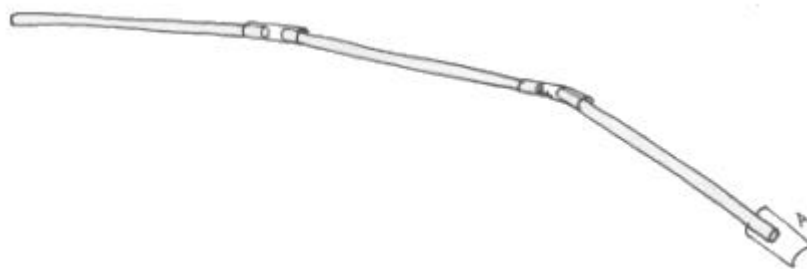


## Construcción de la celda

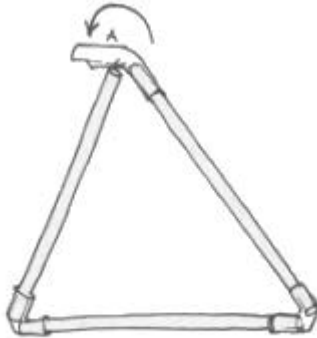
1) Empezaremos uniendo dos palillos con ayuda de cinta adhesiva.



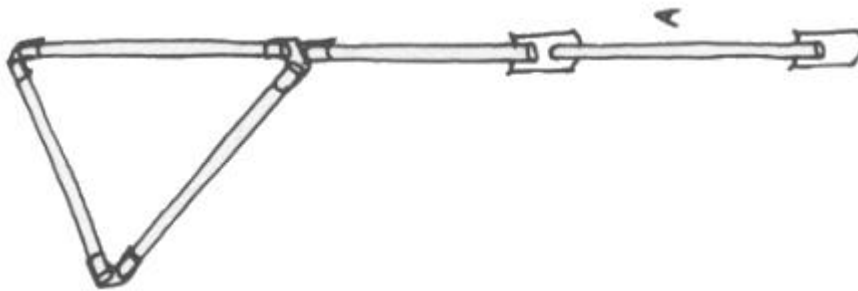
2) Añadimos otro palillo más.



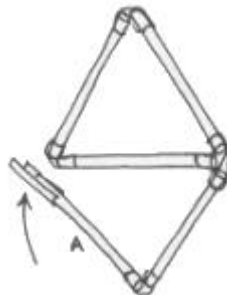
3) Doblamos formando un triángulo.



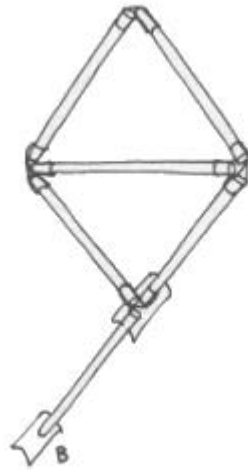
4) Añadimos otros dos palillos, alineados con un lado del triángulo.



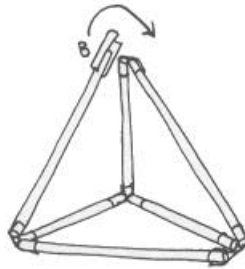
5) Doblamos formando un rombo y pegamos con la cinta aislante.



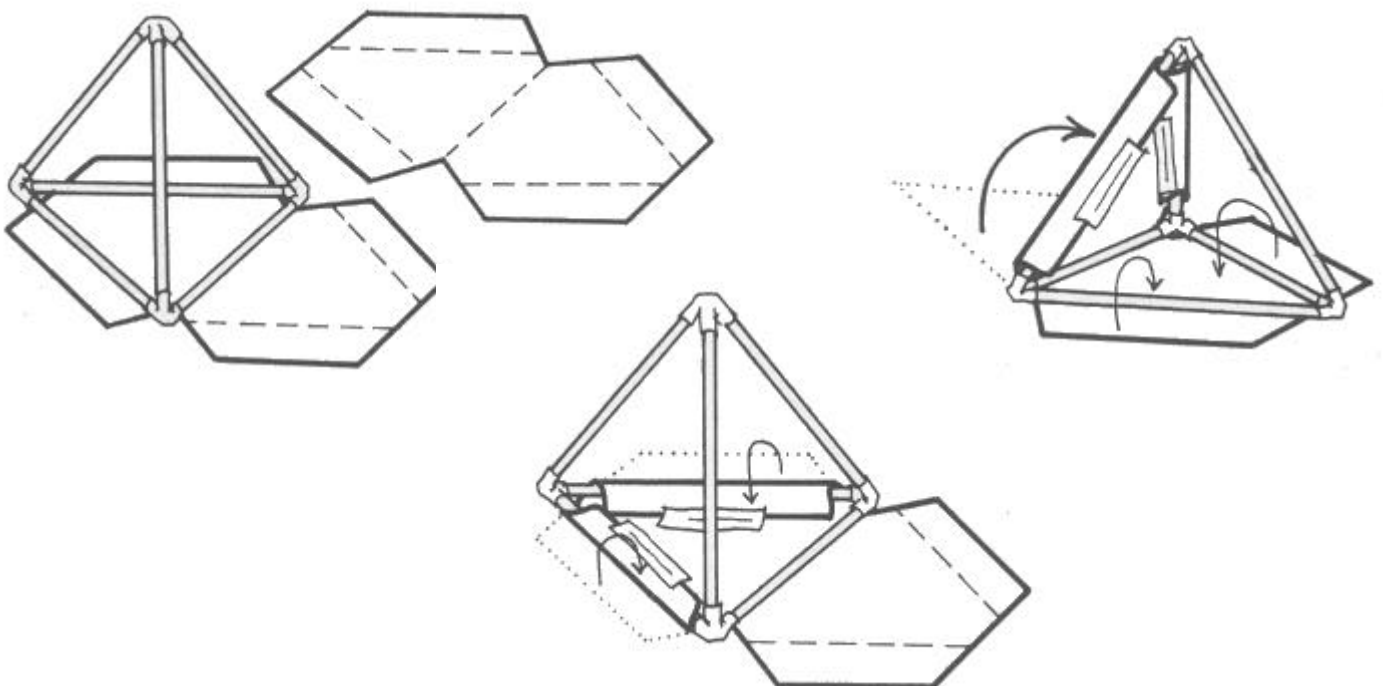
6) Añadimos por último el sexto palillo alineado a una de sus caras.



7) Doblamos y unimos con el vértice superior.



8) Una vez terminada la estructura, pasamos a forrar con el papel cortado, según el patrón anteriormente construido

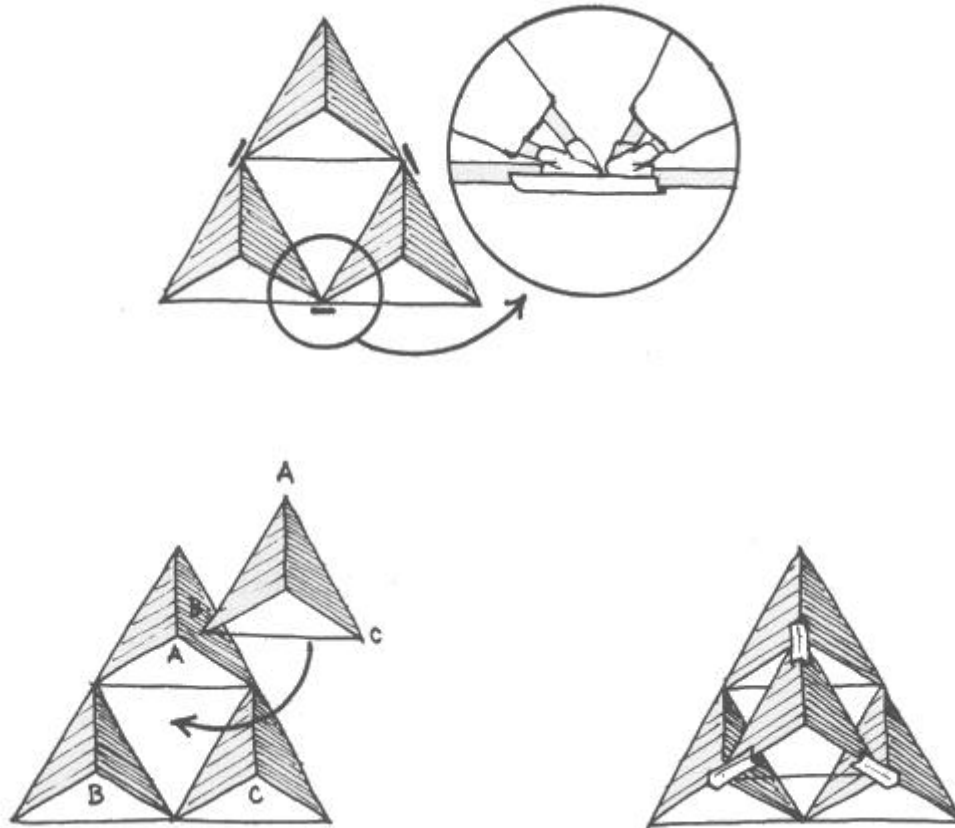


## Construcción de una cometa de cuatro y de dieciséis celdas

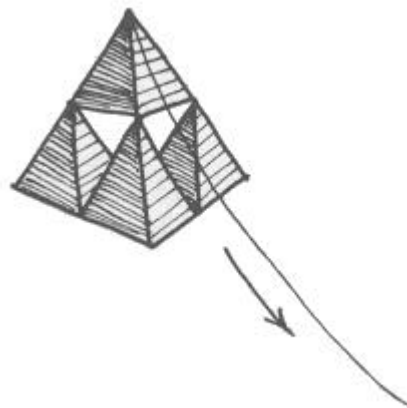
Se necesitan cuatro y dieciséis celdas de las construidas anteriormente.

### Cuatro celdas

Las unimos por medio de cinta adhesiva siguiendo el siguiente patrón:

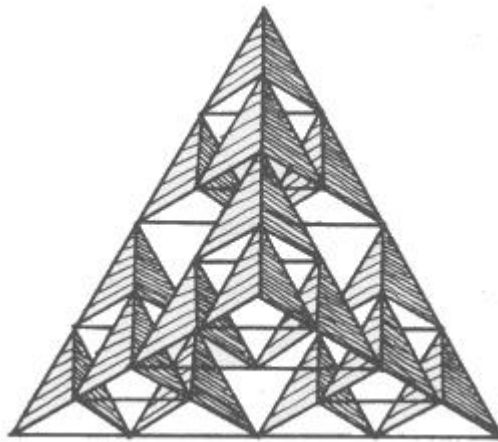
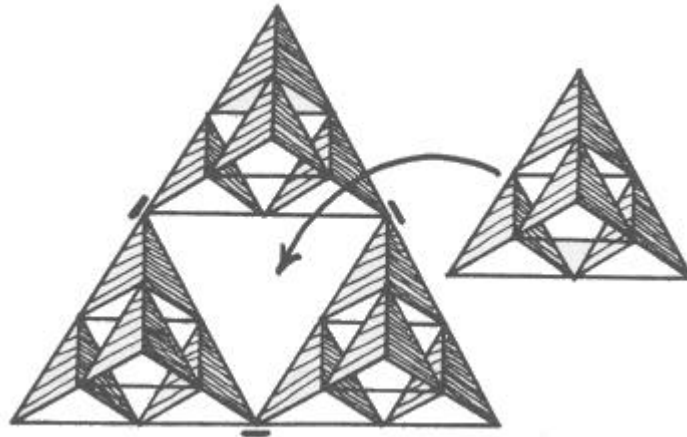


Enganche del hilo:



## Dieciséis celdas

Necesitaremos cuatro cometas de cuatro celdas, y las ensamblamos según la figura:

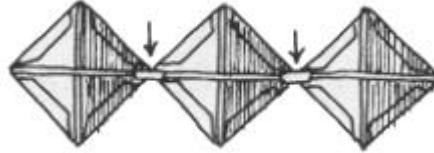


El hilo lo ataremos en la segunda celda:

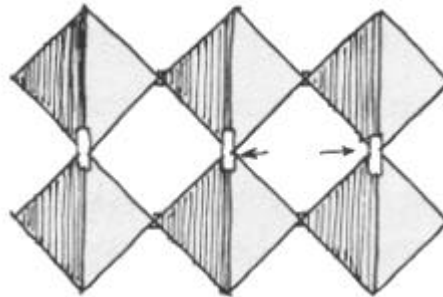


## Construcción de una cometa de veintidós celdas

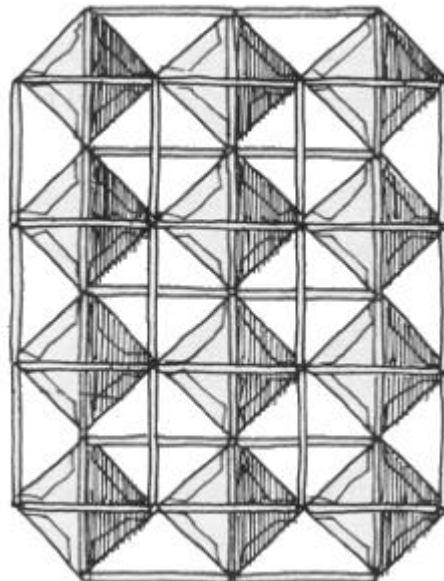
1) Empezamos uniendo tres celdas, por medio de cinta adhesiva, tal como se muestra:



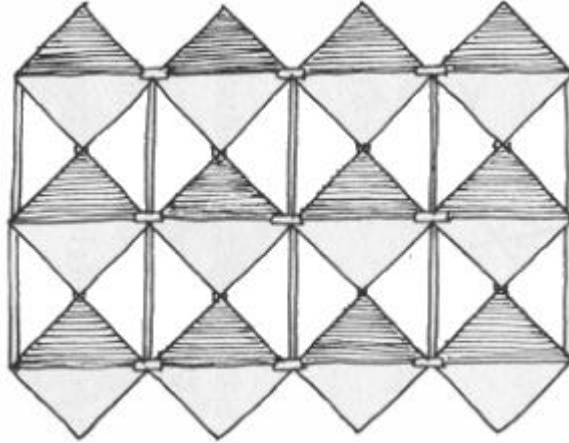
2) Repetir la operación con otras tres, y unir las por la parte superior con la anterior:



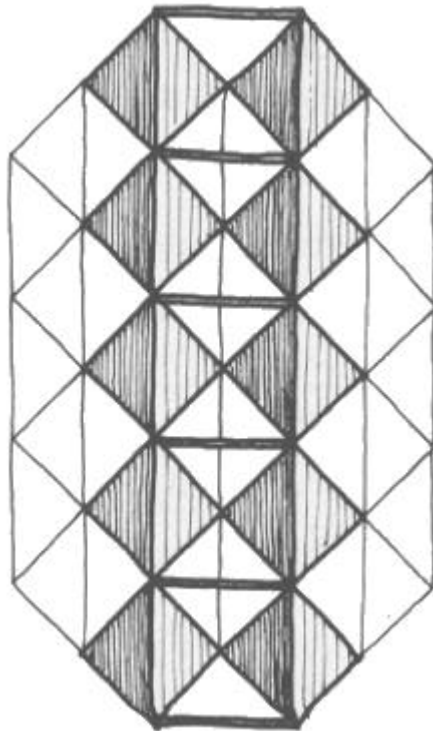
3) Ir uniendo dos tríos más de celdas, hasta conseguir la siguiente estructura, que se refuerza con cinco pares de palillos unidos, por medio de cinta adhesiva y pegamento universal:



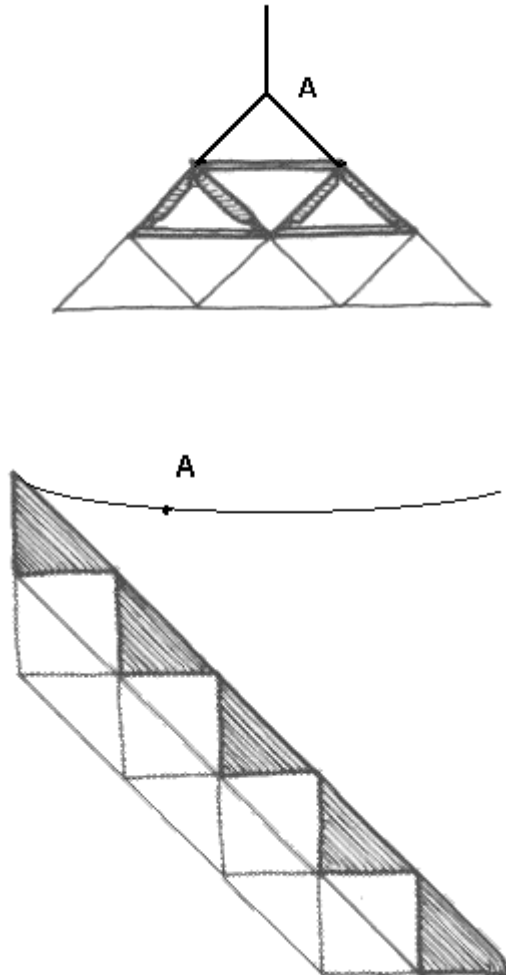
4) Por la parte de atrás, con mucho cuidado, se añaden nuevos palillos para reforzar la estructura:



5) Si añadimos una segunda matriz de dos por cinco celdas, reforzando con seis palillos, llegamos a la forma:



6) Y por último, le colocamos la brida:



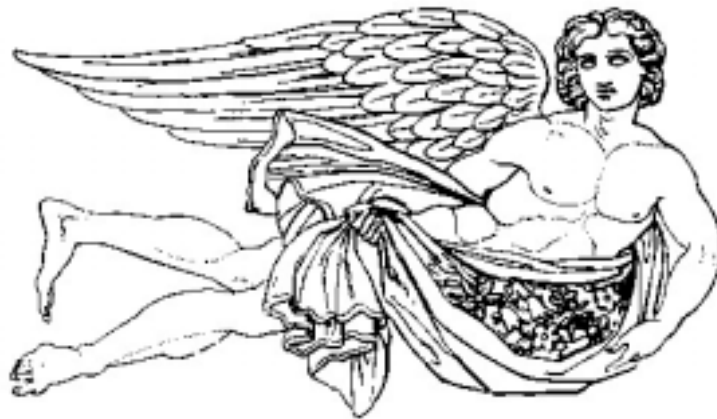
Esta cometa tiene un vuelo elegante y muy estable. El inconveniente es, que dependiendo del tamaño de los palillos, la dimensión de la misma puede ocasionar dificultades en su transporte.

## Bibliografía

- Kremer, Ron. *"From Crystals to Kites. Exploring three Dimensions"* Dale Seymour Publications, USA 1995.



*Bóreas o Aguilón*, viento violento del norte, raptor de doncellas.



*Céfiro*, viento del oeste, es el amable y perfumado.



- *Al Final del Hilo - Alicante 2000*