

# ESCULTURA EIFFEL ICOSA

Prof. Javier Barrallo Calonge  
E.T.S. Arquitectura UPV/EHU

## SISTEMA DE CONSTRUCCIÓN GEOMÉTRICA ZOME

Zome es un sistema de construcción diseñado por la empresa norteamericana con sede en Colorado Zometool Inc. utilizado tanto por profesionales de la ingeniería, arquitectura, química, matemáticas, etc., como por amantes de la exploración artística y científica en general. Su versatilidad le permite realizar modelos de moléculas y cristales, estructuras de ADN, puentes, cúpulas o poliedros y otros objetos matemáticos.



Figura 1. Ejemplo de un Kit Zome para construir modelos sencillos. A la derecha los diferentes tipos de piezas que suministra la compañía Zometool Inc. Los kits básicos sólo contienen elementos azules, amarillos y rojos.

Para los educadores de matemáticas, Zome es una herramienta que simplifica y hace divertida la enseñanza de álgebra, aritmética, geometría, trigonometría, simetría, etc. La facilidad de su sistema de ensamblado permite al alumno aprender y experimentar de forma intuitiva conceptos matemáticos apoyándose en estímulos táctiles y visuales en tres dimensiones de los que se carece cuando se estudian las matemáticas de forma convencional a partir de un libro u otro soporte plano.

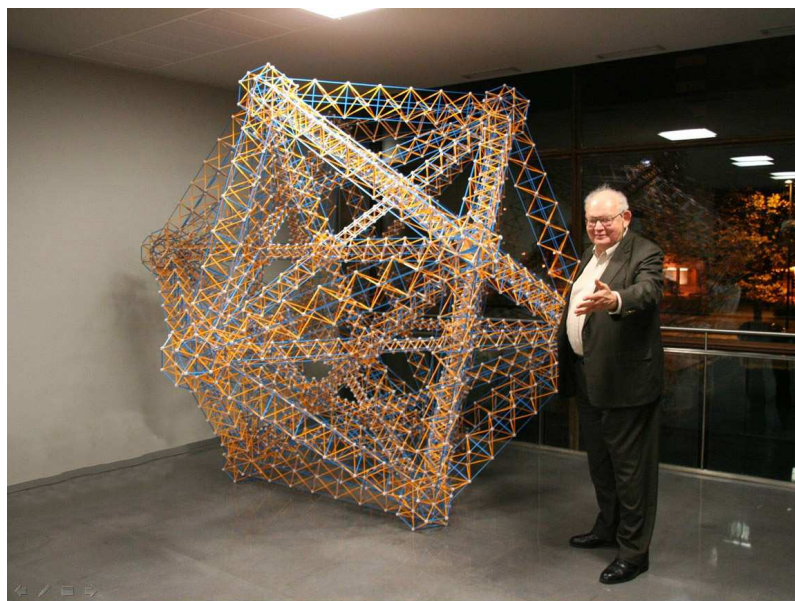
Zome puede describirse como un sistema de construcción espacial compuesto por unas pequeñas estructuras blancas que actúan como nodos conectores y elementos barra de varios colores. Los elementos nodo tiene la forma de un rombosidodecaedro en el que cada cara ha sido sustituida por un pequeño orificio. Estos orificios son utilizados como anclaje para las barras con diferentes colores (básicamente azules, rojas y amarillas aunque recientemente Zometool Inc. ha producido elementos barra con nuevos colores y prestaciones). Existen 30, 20 y 12 vectores de color azul, amarillo y rojo

respectivamente para cada uno de los elementos nodo que permiten al sistema expandirse por el espacio.

El color de las barras Zome esta asociado a su sección transversal y también al tipo de agujero con el que se ensamblan al nodo conector. Así las piezas azules tienen una sección rectangular, las amarillas sección triangular y las rojas sección pentagonal. Otras piezas de diferentes colores y secciones siguen el mismo patrón geométrico. En los extremos las barras amarillas y rojas tienen un giro aparente. Esto es debido a que su sección es asimétrica y así queda invertida de forma que los nodos en los extremos de cada barra mantengan la misma orientación.

## DISEÑO DEL POLIEDRO EIFFEL ICOSA

Durante la visita del famoso científico Benoit Mandelbrot, padre de la Geometría Fractal, a la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad del País Vasco en San Sebastián se planificaron varios actos de homenaje que combinaban aspectos del Arte y las Matemáticas. Entre estos actos se incluyó la realización de un gigantesco poliedro de aproximadamente 17.500 piezas. Esta escultura, denominada Eiffel Icosa fue ensamblada con ayuda de una docena de alumnos voluntarios de la Escuela de Arquitectura durante la semana previa al evento tras recibir un entrenamiento básico y familiarizarse con los modelos Zome.



*Figura 2. El “Padre de la Geometría Fractal”, Benoit Mandelbrot fue objeto de un homenaje por parte de la Universidad del País Vasco. Entre otras actividades se incluía la inauguración, en su honor, del poliedro “Eiffel Icosa”*

La idea de construir Eiffel Icosa fue concebida por Marc Pelletier, miembro fundador de la empresa Zometool Inc. y responsable principal del diseño de la pieza. Los diseños virtuales fueron desarrollados por Paul Hildebrant, actual

presidente de Zometool Inc. Como asesores del montaje colaboraron Michael Green, profesor del London Institute de Londres y Samuel Verbieste, artista plástico belga. Todo el proceso fue supervisado por Javier Barrallo, profesor de la Universidad del País Vasco y el patrocinio corrió a cargo de la empresa ZomeTool Inc. y la Fundación Vodafone España, a quien desde estas páginas agradecemos su desinteresada colaboración al proyecto.

El nombre del poliedro, Eiffel Icosa, recibe su denominación a partir de su estructura principal, basada en el Icosaedro, y a la estructura que forman las aristas del poliedro que recuerda al diseño que utilizó el ingeniero Gustave Eiffel en la famosa torre que lleva su nombre en París.

En esencia, Eiffel Icosa parte de la idea un sistema infinitamente escalable que explota al máximo las posibilidades del sistema de construcción Zome. El diseño final es la réplica a gran escala de un modelo simple en el que cada nodo del Icosaedro se sustituye por un meta-nodo formado por un dodecaedro y donde cada arista se sustituye por una meta-arista basada en tetraedros anidados.

La estructura está basada en una relación única entre el icosaedro y el dodecaedro que comparten lados de igual longitud, gracias a la cual los nodos pueden unirse formando tetraedros con una estructura cubica cristalina centrada en el cuerpo (en inglés Body Centered Cubic lattice o BCC), igual que la estructura atómica del Hierro, la misma que fue tomada como base para la construcción del Atomium en Bruselas.



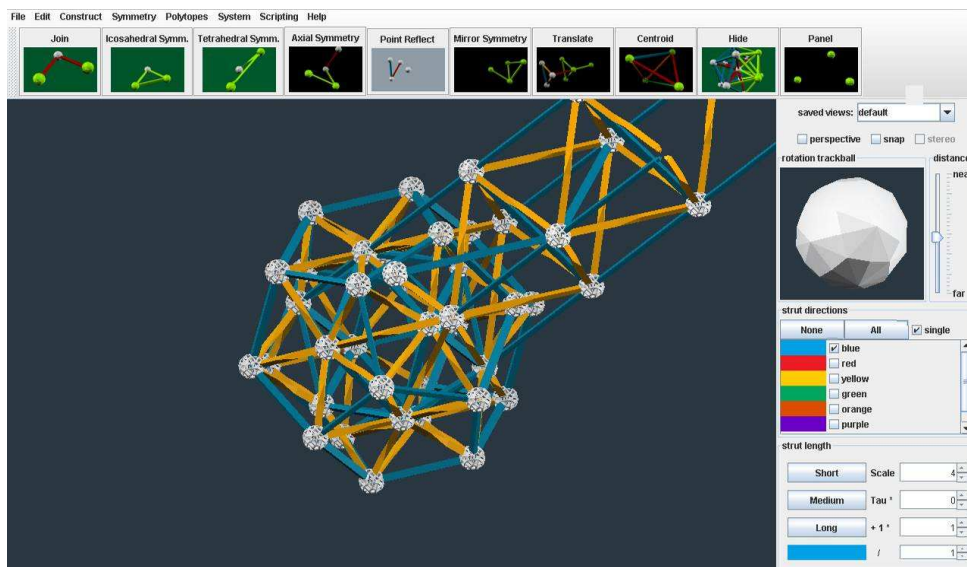
*Figura 3. El Atomium en Bruselas y la Torre Eiffel en París son los dos elementos arquitectónicos en los que se han inspirado la escultura Eiffel Icosa. La torre Eiffel contiene 18.038 piezas, el poliedro “sólo” 17.464.*

Gracias a las propiedades basadas en la proporción Áurea que poseen las piezas Zome, las meta-aristas y los meta-nodos pueden ser escalados utilizando potencias del Número de Oro. Esto conlleva a la posibilidad de una escalabilidad infinita, incrementando la estructura básica e incluso

introduciendo elementos de carácter ornamental o de refuerzo estructural a partir de pequeñas modificaciones sobre el esquema original.

## PAUTAS DEL MONTAJE

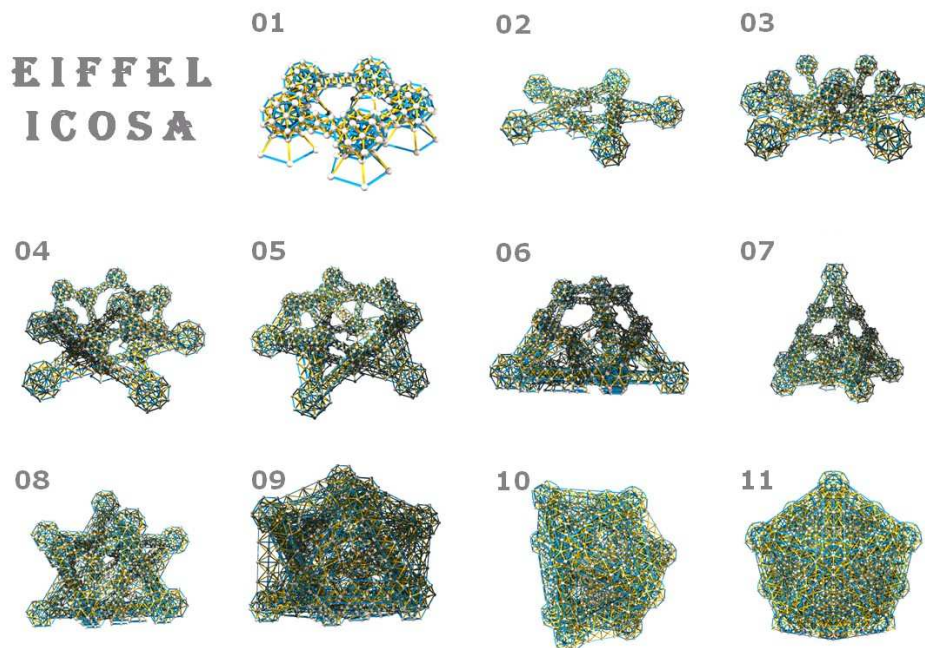
Dadas las dimensiones del trabajo, no era posible acometerlo sin ningún tipo de planimetría detallada. Pero diseños tridimensionales de estas proporciones no son sencillos de representar en planos y mapas bidimensionales donde vértices y aristas se solapan dificultando su interpretación. Ante esta situación se optó por elaborar una planimetría virtual utilizando una herramienta de visualización especial para Zome denominada vZome que nos permitiría estudiar virtualmente la pieza tanto de forma global como local a partir de una proyección interactiva instalada en una sala anexa al lugar de ensamblaje.



*Figura 4. Sistema de construcción virtual vZome. Sin el uso de herramientas de generación virtual hubiera sido muy difícil poder seguir paso a paso la construcción de cada una de las partes del poliedro.*

Una vez elaborada la planimetría se desarrollaron los trabajos de selección y formación de los alumnos de la E.T.S. de Arquitectura de la UPV/EHU que participaron en el montaje de Eiffel Icosa. Recibida la formación necesaria, comenzó una nueva fase, la más tediosa y repetitiva, consistente en construir cada uno de los 32 meta-nodos y las 120 meta-aristas que forman la escultura así como la verificación de cada una de las piezas, siguiendo técnicas de control de calidad, para evitar la proliferación de pequeñas separaciones en las juntas que pudieran condicionar o incluso impedir el correcto acabado del poliedro.





*Figura 5. Modelo virtual en 11 pasos para el ensamblaje de la escultura Eiffel Icosa. Las aristas se han representado más cortas para reducir el número de piezas y mostrar con mayor precisión las uniones entre partes.*

Las pautas de ensamblaje debían cumplir dos condiciones básicas. La primera: seguir un orden de montaje muy estricto basado en la planimetría virtual y la segunda verificar en todo momento que las piezas se ensamblaban sin ninguna holgura. Era necesario concienciar a los colaboradores en el montaje que la aparición de holguras en fases avanzadas de la construcción de Eiffel Icosa probablemente sólo podría ser solventada rehaciendo la escultura desde el inicio. Hay que destacar que incluso elaborando pequeñas piezas de 30 o 40 centímetros de diámetro con Zome pueden aparecer holguras que impiden el cierre de la pieza al ser manipulada por personas con poca experiencia o sin un entrenamiento adecuado. Dado que Eiffel Icosa mide casi tres metros de diámetro la tolerancia acumulada puede llegar a varios centímetros haciendo del todo imposible el cierre final del poliedro y condicionando tanto su estética como su integridad estructural.

Por otra parte, cuando se manipulan 17.500 piezas repartidas en una sala de varios metros en la que trabajan más de una docena de personas, el orden y el rigor es primordial. Cada meta-arista y meta-nodo fue cuidadosamente etiquetado, verificado y almacenado en el orden adecuado para ser ensamblado.

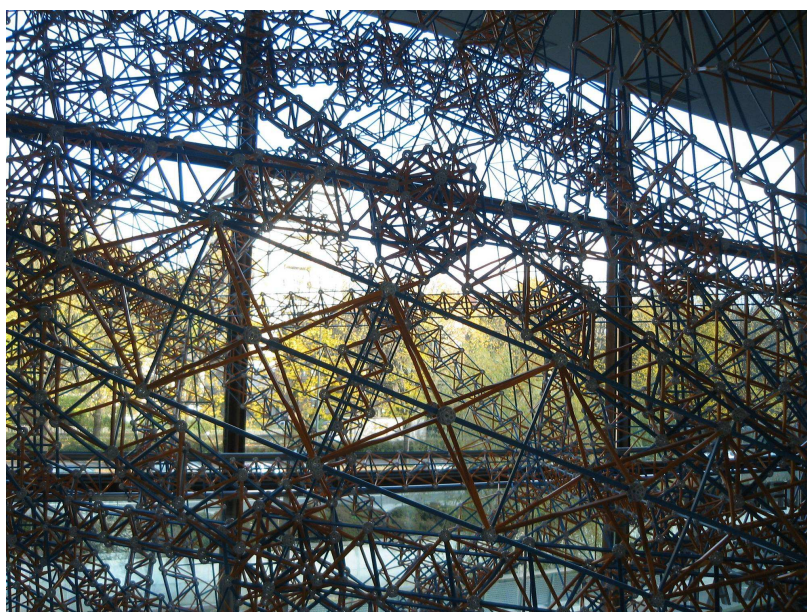
## EL MONTAJE

El lugar elegido para el montaje final fue el Centro Joxe Mari Korta, en el Campus de Guipúzcoa de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU). En la

actualidad la pieza reside en la primera planta de éste edificio de forma permanente.

Para el ensamblaje final, una vez elaborados los meta-nodos y las meta-aristas se procedió a construir la estructura interior de Eiffel Icosa basada en un dodecaedro de más de un metro de diámetro. El dodecaedro se levanto a partir de un pentagrama (pentágono estelado) apoyado en el suelo para estabilizar aún más el conjunto.

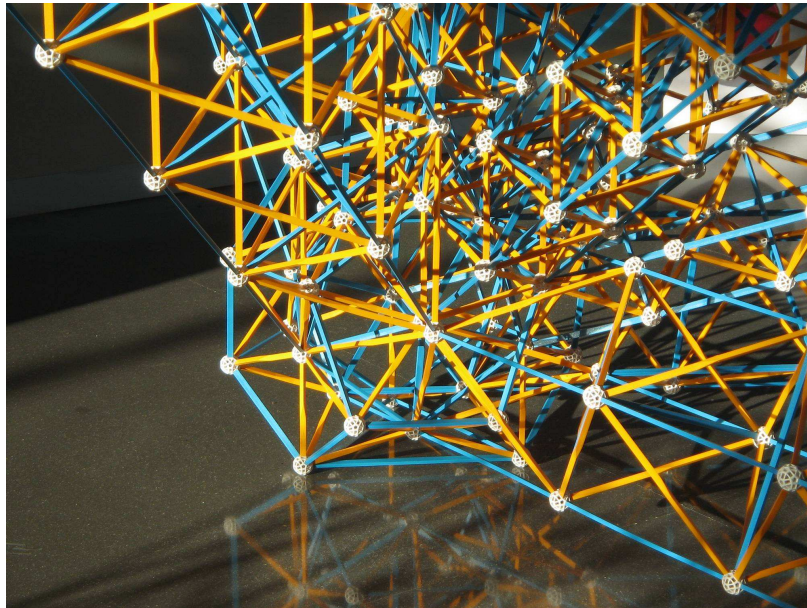
El dodecaedro terminado tiene una doble función, tanto de elemento guía sobre el que proseguir el montaje, como de elemento rigidizador de la estructura global. Sobre el dodecaedro se sigue un proceso de estelación, es decir, dar forma de estrella al dodecaedro lanzando hacia el exterior cinco meta-aristas sobre cada una de las 12 caras del dodecaedro compuestas por pentágonos.



*Figura 6. Vista del complejo interior del poliedro Eiffel Icosa en su ubicación definitiva en el Centro Joxe Maria Korta del Campus de Gipuzkoa de la Universidad del País Vasco.*

El orden en el que se completaron las estalaciones pentagonales no fue aleatorio. Dada la dificultad de trabajar sobre las partes altas de la escultura, a casi tres metros de altura, se diseñó una secuencia de montaje que daría estabilidad al conjunto tanto en su posición de montaje como anticipando una posterior rotación de la figura sobre si misma que dejara accesibles las estalaciones más alejadas y facilitara la conclusión de Eiffel Icosa a una altura de fácil acceso.

Otra de las dificultades del montaje fue prever la modificación de tres de los meta-nodos del icosaedro exterior para permitir su apoyo definitivo sobre tres planos paralelo al suelo, en lugar de sobre un solo nodo para cada uno de los tres vértices de apoyo de la escultura, como sería por defecto, ya que con un peso total de más de 30 Kilogramos podrían fracturarse.



*Figura 7. Detalle del poliedro en el que se aprecian algunas modificaciones sobre el diseño inicial. Se ha truncando la base para evitar el apoyo de la escultura sobre un solo nodo comprometiendo su integridad estructural.*

Todas las estalaciones pentagonales se ensamblaron ya preconstruidas y sobre ellas se fijaron las aristas exteriores del Icosaedro hasta completar los 20 triángulos que definen la estructura externa.

La escultura final es ciertamente la estructura espacial más grande nunca modelada con Zome y posiblemente el poliedro más complejo realizado hasta la fecha utilizando cualquier sistema de montaje, gracias a sus 17,500 piezas y a su avanzado diseño escalable. Sería magnifico que pudiera ser usado como modelo para una estructura monumental en una exposición mundial o como parte de algún edificio o plaza singular.

## REFERENCIAS

[1] <http://www.zometool.com/> La página oficial de la empresa Zometool Inc., creadores del sistema de construcción Zome. Contiene numerosos ejemplos y tutoriales (sólo en inglés).

[2] <http://www.georgehart.com/> Página personal de George Hart, la máxima autoridad mundial en poliedros. Su página, en inglés, contiene una amplia descripción de construcciones y esculturas poliédricas empleando diferentes materiales y sistemas de construcción, incluido Zome.



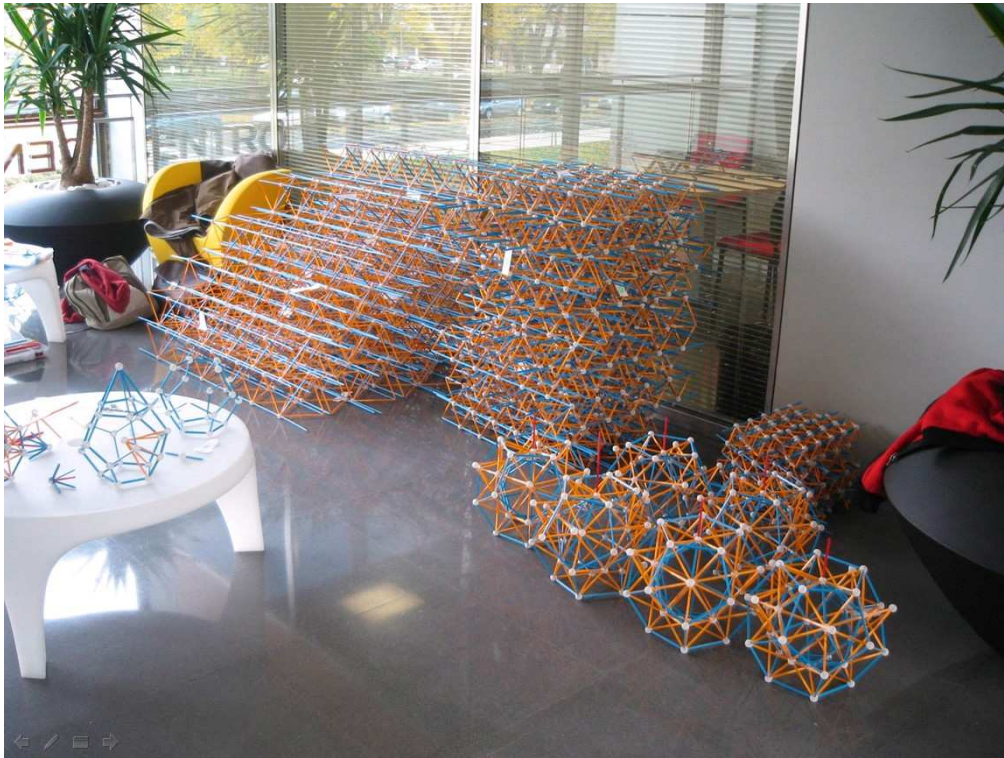


*Figura 8. Los profesores Samuel Vertiese y Michael Green entrenan a los alumnos voluntarios de la ETS de Arquitectura de la UPV/EHU en los fundamentos de construcción con Zome. Los elementos modulares básicos comienzan a ensamblarse y almacenarse.*

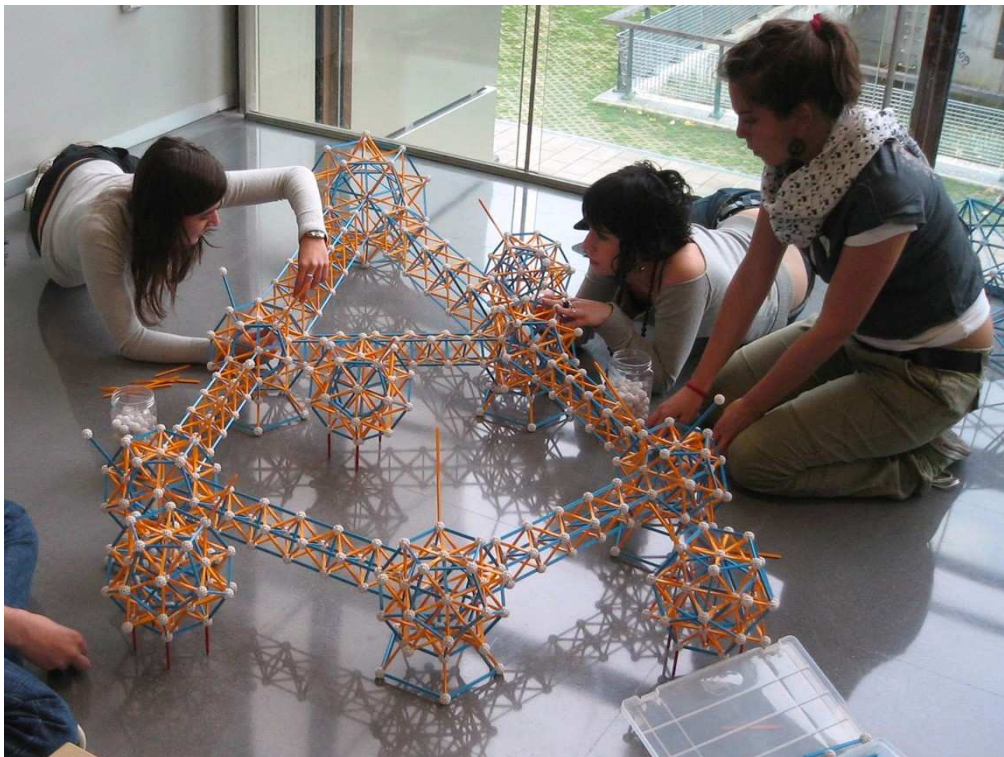


*Figura 9. Se establecen controles de calidad para verificar que en cada uno de los meta-elementos que componen Eiffel Icosa no existan holguras en las juntas ensambladas previamente. Cualquier pequeña holgura acumulada en una pieza de estas dimensiones haría imposible el cierre final de la escultura.*



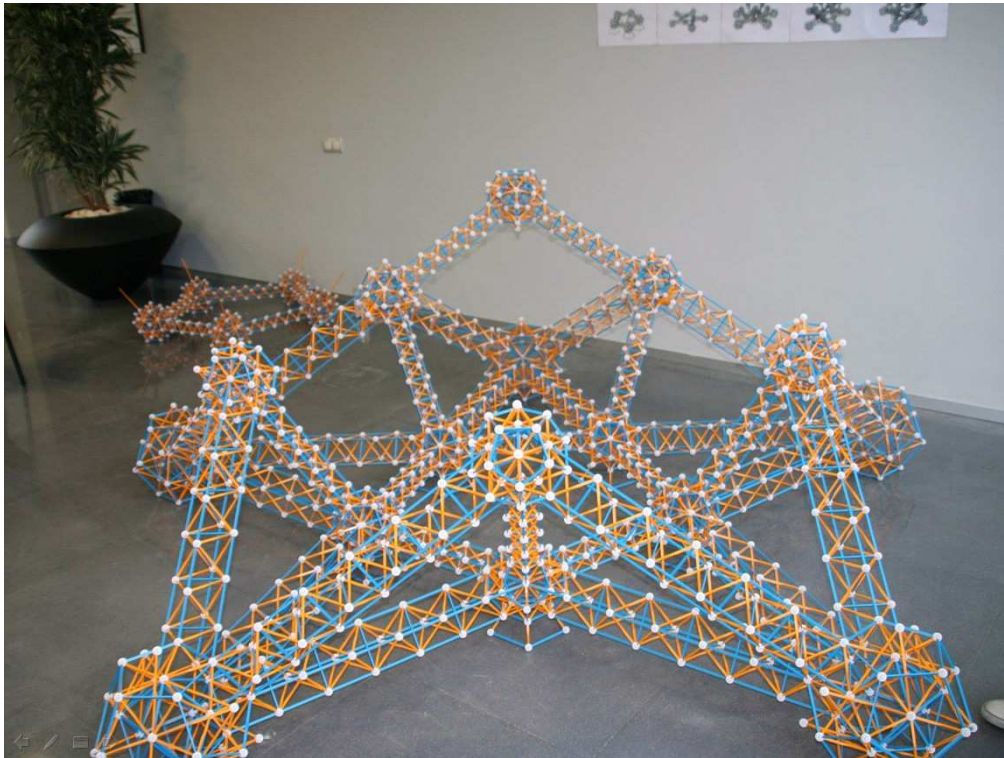


*Figura 10. Los meta-nodos y las meta-aristas son almacenados listos para el montaje. En total se usaron 120 meta-aristas con tres diseños diferentes y 32 meta-nodos, como los que se observan en primer plano, los cuales conforman los vértices del poliedro.*

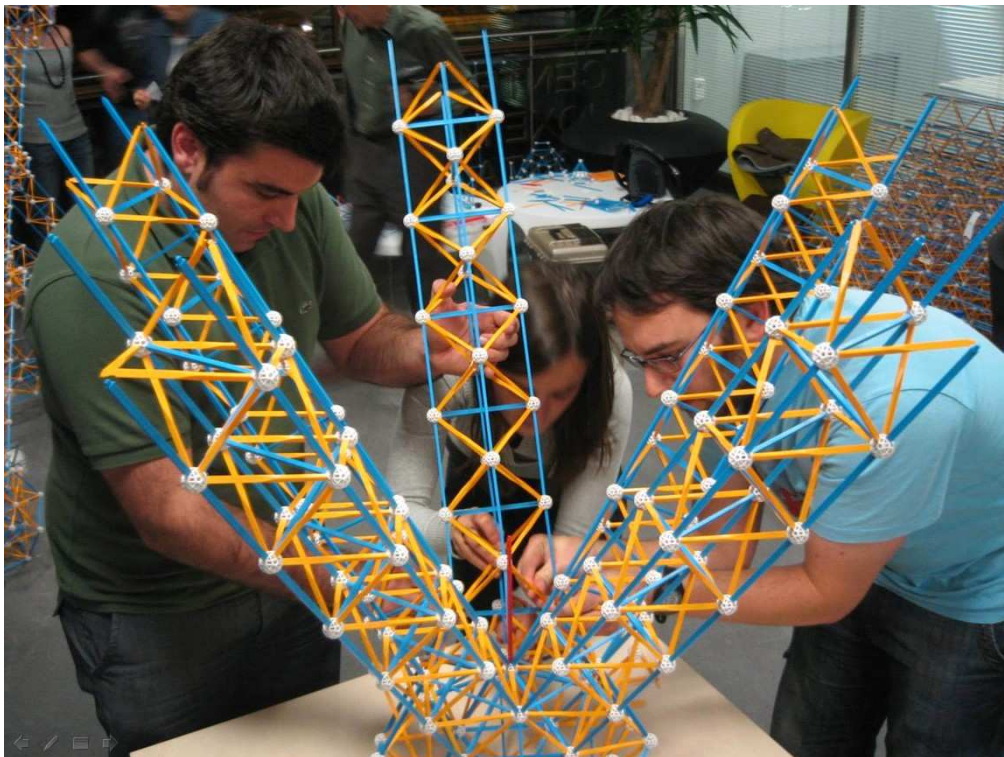


*Figura 11. El ensamblaje comienza a partir de una base pentagonal. El pentágono inicial se estelará (adoptará forma de estrella) añadiendo cinco nuevos vértices que formarán parte de la estructura exterior. El resultado final será la figura conocida como pentagrama o pentáculo.*



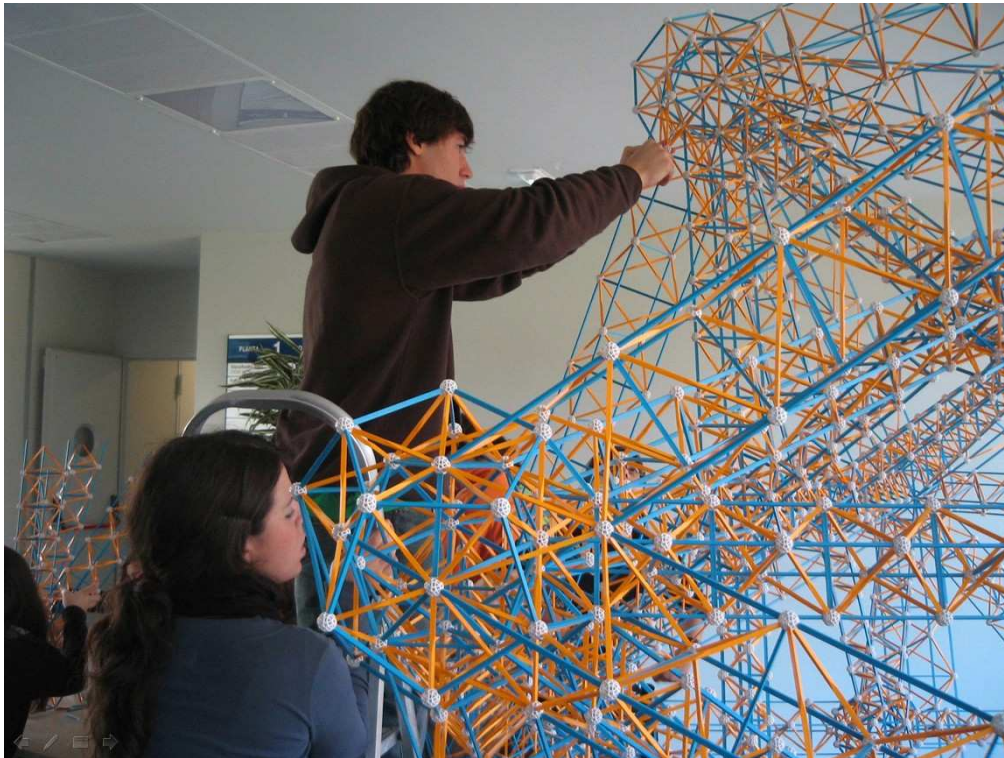


*Figura 12. Mediante adiciones sucesivas de 11 pentágonos más sobre el pentagrama de la base se procede a cerrar el dodecaedro que forma la estructura interior de Eiffel Icosa. Cada vértice del pentágono se estela para dar rigidez y estabilidad al conjunto.*



*Figura 13. Para estelar cada uno de los 12 pentágonos que componen el dodecaedro se ensamblan cinco meta-aristas a un meta-nodo. Estos meta-nodos se convertirán en los vértices del icosaedro que forma la estructura exterior de la escultura.*



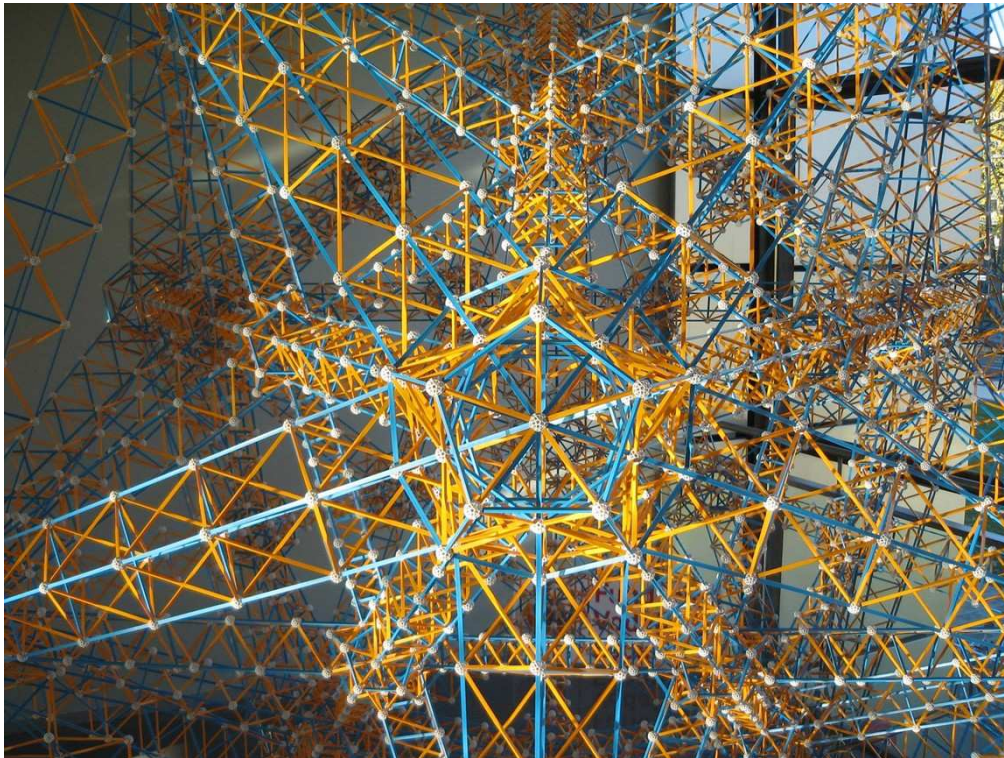


*Figura 14. Los vértices exteriores procedentes de la estelación de los pentágonos del dodecaedro forman una estructura triangular en el exterior de la pieza. Progresivamente se cerrarán 20 triángulos que compondrán el icosaedro exterior de Eiffel Icosa y otorgarán a la estructura la rigidez necesaria*

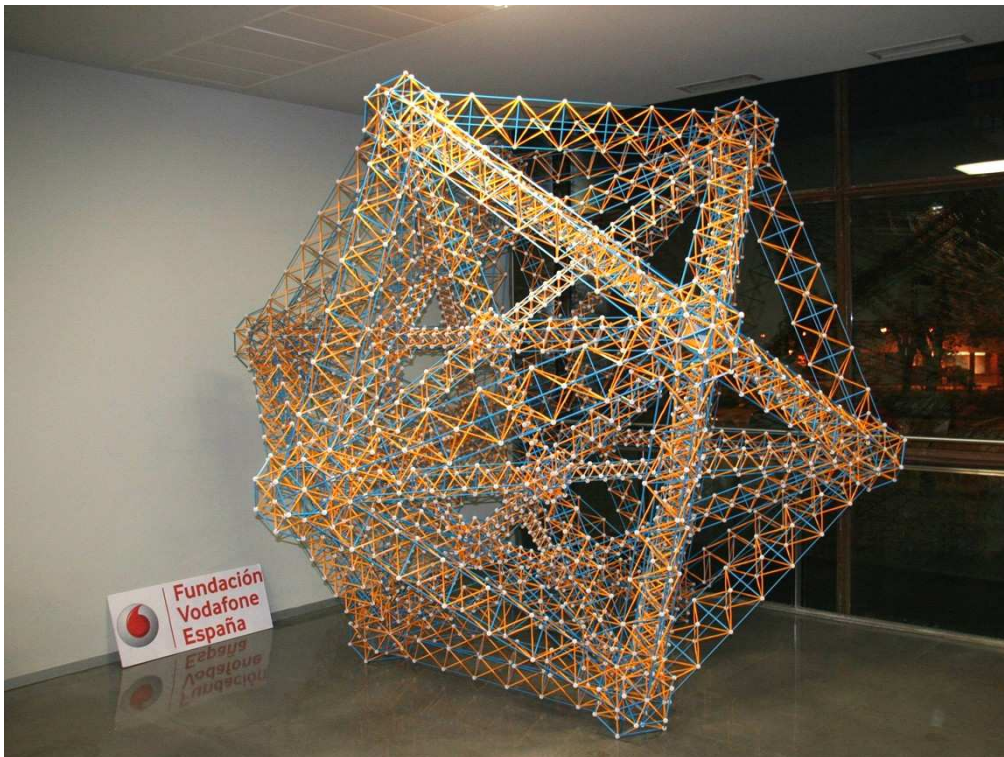


*Figura 15. La escultura, que ya ha alcanzado los tres metros de diámetro, tiene ya la suficiente rigidez como para ser girada. Todos colaboran en la rotación, uno de los momentos más delicados del montaje. El giro facilitará el trabajo sobre las partes inaccesibles del poliedro.*





*Figura 16. Esta imagen de la escultura terminada nos muestra uno de los ejes de simetría de orden 5 presentes en Eiffel Icosa. Sólo en los planos cortos se puede apreciar la enorme complejidad del diseño.*



*Figura 17. Eiffel Icosa ya terminada tras una semana de trabajo. La escultura mide casi tres metros de diámetro máximo, pesa unos 30 Kilogramos y se compone de 17.464 piezas.*