SLTE PERÚ 2018
VII SIMPOSIO LATINOAMERICANO DE TENSOESTRUCTURAS
11, 12 y 13 Septiembre
LIMA

DOMOS POLIÉDRICOS REGULARES

Francisco Martínez Cendra (ORCID N° 0000-0001-7979-0372)
Magíster en Arquitectura por la Universidad Nacional de Ingeniería
Docente de la Universidad Científica del Sur
Lima, Perú
Av. Del Ejército 2139, San Isidro
fmcendra@gmail.com

Resumen

Las cúpulas geodésicas son estructuras autoportantes que se generan a partir de la proyección de un poliedro a la esfera que lo circunscribe, las cuales se diseñan principalmente partiendo de la figura poliédrica del Icosaedro. El objetivo del presente artículo es demostrar que es factible diseñar domos a partir de los otros cuatro poliedros regulares los cuales, presentan sus propias y particulares formas de diseño. En este artículo mostraremos las ventajas estructurales y repasaremos las características de estas formas geométricas, veremos cómo se diseñan y expondremos algunos trabajos realizados por estudiantes.

Palabras clave

Domo, cúpula geodésica, poliedros, tensegridad.

Abstract

The geodesic domes are self-supporting structures that are generated from the projection of a polyhedron to the sphere that circumscribes it and which are designed mainly starting from the polyhedral figure of the Icosahedron. The objective of this article is to demonstrate that it is feasible to design domes from the other four regular polyhedrons which present their own particular design forms. As part of the methodological process will show the way to find the constants that relate the radius of the dome to the length of each and every one of the bars or edges that make up the geometry of the dome. In this article we will show the structural advantages and we will review the characteristics of these geometric shapes, we will see how they are designed and we will expose some works made by students.

Keywords

Dome, geodesic dome, polyhedra, tensegrity.

1.Introducción

Por definición un domo, llamado también cúpula geodésica, es una estructura tridimensional capaz de ser inscrita en una esfera. Usualmente se relaciona la geometría del icosaedro con la generación de este tipo de estructuras debido a que este poliedro regular es el que cuenta con mayor número de caras y fue empleado por el inventor y visionario norteamericano Buckiminster Fuller para realizar las primeras obras de este tipo, las cuales le darían fama mundial a partir de la segunda mitad del siglo XX.

Son muchas cualidades las que hacen de los domos unos elementos arquitectónicos sumamente eficientes, por ejemplo:

Comparativamente presentan menores costos de construcción debido a que son pocos los elementos necesarios para desarrollar este tipo de obras.

Son una excelente alternativa ante un sismo por tratarse de una estructura auto sostenible en la que el domo se comporta como un todo estructural trasmitiendo las cargas por toda la malla estructural, inclusive, cuando se retiran algunas de las partes del domo, las otras asumen la carga redistribuyendo de forma equitativa los diferentes esfuerzos hasta la base. “Ninguna estructura cubierta es tan estable y fuerte. Las juntas de las estructuras rectangulares de las construcciones tradicionales ceden a veces bajo condiciones de estrés, resultando en una inestabilidad estructural a no ser que utilizamos elementos de sujeción adicionales. La forma geodésica optimiza la carga, por sus propiedades de *tensegridad*, desplazando las fuerzas a lo largo de toda la estructura”. [i]

La superficie esférica las convierte en estructuras aerodinámicas que no se ven afectadas por la presencia de vendavales y tormentas. “Es el diseño más fuerte y robusto para soportar los vientos o las acumulaciones de nieve (son comunes en la antártica, como observatorios y laboratorios). Cuanto más sopla el viento, al no tener superficies de succión este lo rodea y lo tienden a afirmar más al suelo”. [ii]

Son elementos arquitectónicos sostenibles debido a que la naturaleza de su forma permite que se concentre la luz al interior del domo y el calor se reparta de forma más eficiente ya que la fuente calórica se irradia través del aire de modo radial generando una temperatura uniforme al interior de la cúpula geodésica. “Orientando bien las aberturas, el domo geodésico es un colector de energía solar pasivo ideal. Actúa como un reflector gigante de luz hacia dentro del domo, también concentrando y reflejando el calor interior, esto ayuda a prevenir la pérdida de calor por irradiación hacia afuera. Menor superficie de pared expuesta al exterior en relación a la superficie cubierta: Beneficio propio de la esfera, que reduce la superficie expuesta al exterior (mejorando la temperatura interior), en relación a la superficie cubierta interior”.[iii]

Cabe señalar que el aire caliente tiende a subir, de modo que si practicamos una teatina (ventana cenital) en la parte superior del domo, generaremos un flujo de aire de la parte inferior a la parte superior logrando una adecuada circulación de aire y al no presentar esquinas y bordes el aire no se estancará impidiendo la presencia de moho producto de la humedad.

Pero partir del icosaedro no es la única forma de generar una cúpula geodésica, en principio podemos realizar este tipo de estructuras a partir de cualquiera de los cinco poliedros regulares, tetraedro, octaedro, hexaedro, icosaedro y dodecaedro.

No todos estos poliedros son estables en sí mismos. El tetraedro, el octaedro y el icosaedro son estables debido a que sus caras están formadas por triángulos equiláteros, sin embargo, el hexaedro, que está compuesto por lados cuadrados y el dodecaedro compuesto por lados pentagonales son volúmenes que se pueden deformar y de hecho se deforman al intentar armarlos. Para solucionar este problema habrá que incluir barras diagonales en el caso del hexaedro y una adecuada triangulación en el caso del dodecaedro. Finalmente, como dicen los estructurales: Se triangula para estabilizar una estructura.

2. Formación geométrica de una cúpula geodésica.

Para generar un domo bastará, con inscribir uno de estos cinco poliedros en una esfera y empezar a proyectar los diferentes puntos obtenidos por la frecuencia o subdivisión de cada una de las caras del poliedro a los diferentes círculos que forman la esfera y que pasan por los vértices del poliedro.

“La construcción de estas cúpulas consiste básicamente en lograr una triangulación homogénea de la esfera. Una triangulación con una mínima variedad de elementos constructivos de modo que las barras y sus uniones puedan ser prefabricadas.” [iv]

Como vemos en la figura N°1, cada poliedro regular tiene su propia y particular forma de inscribirse en una esfera y de formar triángulos esféricos, cuadrados esféricos o en el caso de dodecaedro, pentágonos esféricos.

Estructura y Frecuencia

Partiendo del concepto que un domo se genera a partir de un poliedro regular, tenemos que la frecuencia será el número de divisiones en las que se puede dividir cada una de las caras de dicho poliedro, de esta manera la frecuencia dos resultará de dividir las aristas en dos partes iguales con la consecuente intersección del radio que pasa por el punto medio de estas intersecciones hasta intersecar con uno de los círculos de la esfera que pasa por dichos vértices. La frecuencia tres dividirá las aristas en tres partes y así sucesivamente.

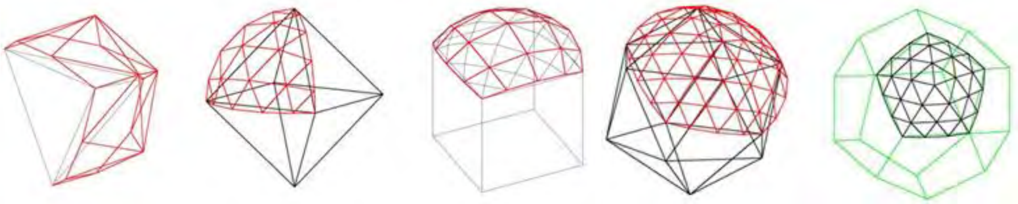

Figura N°1: Formación de secciones esféricas a partir de los cinco poliedros regulares.

De esta manera podemos seguir dividiendo las caras de un poliedro aumentando la frecuencia a fin de obtener mejor curvatura esférica en la estructura geodésica y mayor resistencia estructural.

Las barras que conforman una estructura de este tipo se comportarán como cualquier elemento horizontal en cuanto a su deformación, es decir que si bien es cierto que el triángulo es una figura indeformable las barras estarán sometidas a los diferentes esfuerzos a los que está sometida tradicionalmente una viga.

"Las cargas se transfieren a la cimentación por las fuerzas axiales (tensión y compresión) sobre los miembros de la estructura. Bajo la acción de una carga uniforme sobre un domo hemisférico todos los elementos superiores (aquellos con ángulos mayores de aproximadamente 45°) estarán en compresión; los miembros con ángulos más pequeños casi horizontales estarán en tensión, mientras que los miembros casi verticales estarán en compresión. La forma de los domos determina la dirección de las reacciones del empuje en la cimentación."[v]

Es lógico pensar que para obtener una mayor resistencia estructural habrá que disminuir las luces aumentando la frecuencia o aumentar la sección de la estructura como sucedería en cualquier estructura común.

También se puede aumentar la resistencia del domo añadiendo estructuras adicionales al interior de cada triángulo que pueden ser elementos rígidos o de *tensegridad* lo cual abre otro universo de posibilidades topológicas al introducir, por decirlo de alguna manera, un nuevo sistema estructural dentro de una estructura geodésica ya conocida.

De esta manera al aumentar la frecuencia de un domo las barras serán de menor tamaño, más resistentes y por consiguiente se tendrá una superficie más redondeada.

Dentro del grupo de domos poliédricos regulares tenemos dos casos particulares, el cubo y el dodecaedro.

Cuando analizamos la geometría del hexaedro y del dodecaedro para estudiar la frecuencia, tendremos el inconveniente que no están formados por triángulos sino con cuadrados o pentágonos, esto supone un problema ya que el triángulo es indeformable pero no así estos polígonos, entonces tendremos que recurrir a un sistema de diagonales para estabilizar el conjunto.

Procedimiento de Diseño

Como se mencionó anteriormente, partimos del hecho que una esfera está conformada por infinitos círculos de los cuales algunos de ellos determinarán la geometría de un domo. En la figura N°2 se aprecian los círculos que envuelven un octaedro los cuales tienen como centro el mismo centro del poliedro el cual en este caso estará determinado por la intersección de las alturas.

Del centro del poliedro trazamos diversos círculos que intersecarán al volumen en los vértices determinando triángulos esféricos y dividimos las aristas según la frecuencia que se desee, tres en este caso particular.

Luego hacemos coincidir los radios por los puntos de división en las aristas hasta intersecar los círculos esféricos, según la frecuencia que se esté empleando. De esta manera podremos seguir trazando otros círculos hasta determinar las secciones del triángulo esférico que será una de las secciones de un domo geodésico.

Como se puede apreciar en el ejemplo de la figura N°2, este procedimiento se repite en todas las caras del poliedro; en este ejemplo se ha realizado una cúpula geodésica de frecuencia tres, basada en la geometría de un octaedro. El procedimiento es similar a otros domos poliédricos.

Es interesante notar que los domos generados a partir de un octaedro siempre formarán una media esfera compuesta por cuatro triángulos esféricos lo cual hace que sea muy fácil de armar y sea muy bien aprovechado a la hora de realizar un elemento arquitectónico, aunque esto no esté muy difundido pues como se comentó al inicio, pareciera que la única forma de hacer un domo es partiendo del icosaedro.

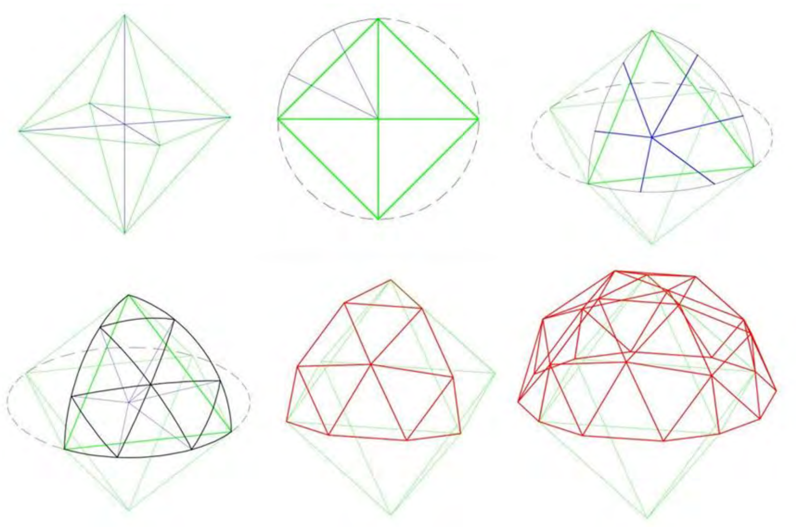

Figura N°2: En el ejemplo se aprecian los círculos esféricos que determinan un domo octaédrico de frecuencia tres.

Constante Matemática Para Diseñar Un Domo

Tal como se puede apreciar en el gráfico N°2, tenemos que son los radios los que, al pasar por los puntos en los que se divide la arista del poliedro según la frecuencia, determinan las diferentes secciones esféricas que nos permitirán encontrar todas y cada una de las barras de los domos.

Empleando un poco de trigonometría elemental es fácil relacionar la dimensión de cada una de las barras del domo con el ángulo formado por los radios.

Una vez realizado los diferentes modelos en CAD se pueden medir los ángulos que formados por los radios determinan las diferentes barras del domo. En el gráfico N°3 se explica este sencillo procedimiento matemático el cual determinará una constante “K” relativa a cada barra, de esta manera tendremos KAB; KBB; KBD, etcétera.

La forma de obtener matemáticamente esta denominada constante K es la siguiente:

- Centro de radios de la esfera que encierra el poliedro; **ce**
- Radio de la esfera; **r**
- Angulo entre radios; **Φ**
- Barra de la geodésica: **AB**

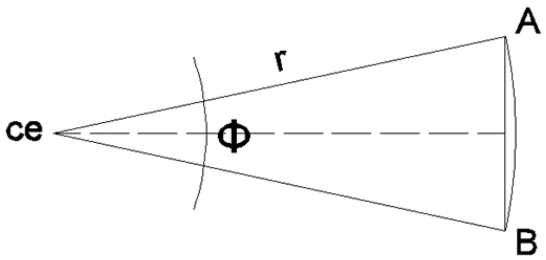

Figura N°3: Ángulo que forman los radios de cada una de las barras del domo.

Tenemos por trigonometría elemental:

Sen $\Phi/2 = (AB/2)/r$

$AB = 2.r.$ Sen$\Phi/2$

Hacemos $k = 2$ Sen $\Phi/2$

De modo que tenemos la siguiente fórmula:

$$\mathbf{AB = r\ KAB} \qquad \mathbf{(1)}$$

De esta forma, para encontrar las medidas de las diferentes barras que forman una cúpula geodésica, bastará con multiplicar el radio de la esfera que contiene el poliedro con la constante relativa a cada barra.[vi]

En algunas ocasiones es complicado relacionar el radio de la esfera con el lado del poliedro que encierra, de tal modo que en las tablas donde se indican las diferentes constantes relativas a cada barra de los domos poliédricos que a continuación se presentan, se incluirá una constante “t” que permitirá utilizar el lado del poliedro en vez del radio. Esta constante relaciona matemáticamente el lado del poliedro con el radio.

3.0 Domos poliédricos regulares

Cúpula Geodésica Tetraédrica

Partimos de la geometría de un tetraedro e incluimos las constantes para realizar domos de frecuencia tres y frecuencia cuatro.

Al igual que en todos los casos, para hallar la dimensión de una cualquiera de las aristas o barras del domo, multiplicamos el radio (r) de la esfera que contiene al poliedro por el factor K relativo a dicha barra o, en su defecto empleamos el factor de relación “t” que en el caso particular del tetraedro será: tt= 0. 612372435. Para el caso de los demás domos poliédricos se empleará una constante relativa “t” particular para cada tipo de domo las cuales estarán en cada tabla correspondiente.

De tal manera que, para calcular por ejemplo la barra AB de una geodésica tetraédrica podremos emplear cualquiera de las dos formas:

Este procedimiento será común a todas las cúpulas geodésicas que proyectemos y deseemos calcular.

$AB = K_{AB} \times R$

$AB = K_{AB} \times L \times 0.612372435$

Donde **R** es el radio de la esfera que encierra el tetraedro y **L** es la arista.[vii]

TETRAEDRO F3	Diedro	Constante t:.	tt= 0.612372435	
ϴ AB	29.496		**K** AB=	0.50913638
ϴ BB	50.479		**K** BB=	0.85280597
ϴ BC	58.518		**K** BC=	0.97751657

TETRAEDRO F4	Diedro	Constante t:.	tt= 0.612372435	
ϴ AB	19.471		**K** AB=	0.33820016
ϴ BB	33.557		**K** BB=	0.57734509
ϴ BC	35.264		**K** BC=	0.60580441
ϴ BD	30.000		**K** BD=	0.51763809
ϴ CD	45.000		**K** CD=	0.76536686
ϴ DD	60.000		**K** DD=	1

Figura N°5: Constantes para calcular las barras de una geodésica tetraédrica de frecuencia 3, 4 y 5.

Cúpula Geodésica Octaédrica

Partimos de la geometría de un octaedro e incluimos las constantes para realizar domos de frecuencia tres y frecuencia cuatro. Puede apreciarse a simple vista la diferencia entre los triángulos esféricos del domo anterior, esto debido a que el octaedro tiene el doble de caras del tetraedro. La diferencia se hará más notoria con el icosaedro.

OCTAEDRO F3	Diedro	To=0.70710668		
ϴ AB	26.565		**K** AA=	0.45950497
ϴ BB	36.870		**K** BB=	0.63245723
ϴ BC	39.232		**K** BC=	0.67142926

OCTAEDRO F4	Diedro	To=0.70710668		
ϴ AB	18.435		**K** AB=	0.32036537
ϴ BB	25.842		**K** BB=	0.44721474

ϴ BD	25.352		**K** BD=	0.43887511
ϴ DC	30.000		**K** DC=	0.51763809
ϴ BC	26.565		**K** BC=	0.45950497
ϴ DD	33.557		**K** DD=	0.57734509

Figura N°6: Constantes para calcular las barras de una geodésica octaédrica de frecuencia 3 y 4.

En la figura N°7 se aprecia a un grupo de estudiantes de la carrera de Arquitectura y Urbanismo Ambiental de la Universidad Científica del Sur participando en la construcción de un domo octaédrico de frecuencia cuatro.

Figura N°7: Domo octaédrico de frecuencia cuatro, construido por un grupo de estudiantes para una demostración en un evento académico.

Cúpula Geodésica Icosaédrica

Este es el domo que comúnmente podemos encontrar en diferentes medios y que ha sido desarrollado un sinnúmero de veces. En la figura N°4 podemos apreciar que la diferencia entre las barras que forman los diferentes triángulos esféricos se hace más sutil en comparación con los otros casos.

Debido a que este domo es generado por un icosaedro tendremos algunos aspectos a considerar:

- A diferencia de la geodésica octaédrica donde hacíamos media esfera con tan sólo cuatro triángulos esféricos, aquí necesitaremos cinco triángulos esféricos enteros y las secciones de otros triángulos esféricos, tal como puede apreciarse en el gráfico N°8.
- Solamente una geodésica de frecuencia par podrá generar media esfera, si tenemos frecuencias impares obtendremos formas que serán o bien un poco menos que una media esfera o bien un poco más que una media esfera.
- El casquete de una geodésica icosaédrica se apoya en cinco puntos no coplanares, la distancia entre estos cinco puntos será la distancia de una de las aristas del icosaedro. En este caso puede

resultar muy útil emplear el factor de relación “ti” ya que no siempre será fácil encontrar el radio del icosaedro.

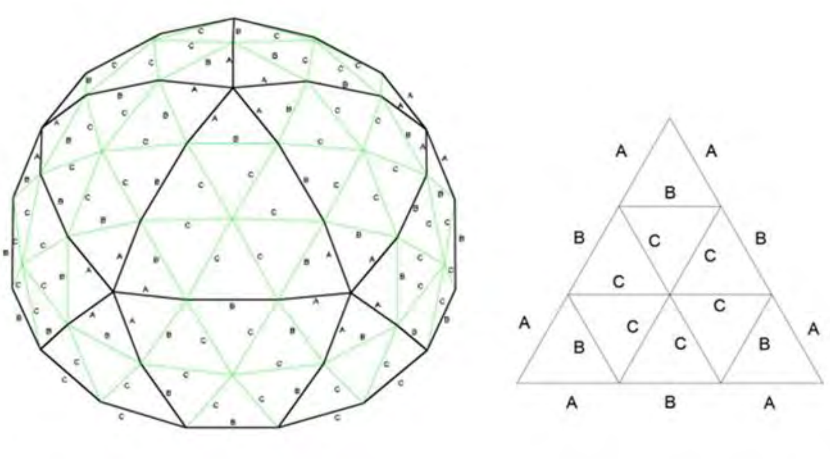

Figura N°8: Diagrama de ensamblaje de un domo Icosaédrico de frecuencia tres. Se puede notar que para lograr media esfera hay que emplear cinco triángulos esféricos para el casquete superior y secciones de triángulos esféricos para completar el volumen.

ICOSAEDRO F3			Ti=0.95105652	
1	ϴ AB	20.077	**K** AB=	0.348619763
2	ϴ BB	23.281	**K** BB=	0.403540584
3	ϴ BC	23.800	**K** BC=	0.412408371
ICOSAEDRO F4				
1	ϴ AB	14.545	**K** AB=	0.253177038
2	ϴ BC	17.172	**K** BC=	0.29858748
3	ϴ BB	16.978	**K** BB=	0.295239062
4	ϴ BD	16.937	**K** BD=	0.294531298
5	ϴ CD	18.000	**K** CD=	0.31286893
6	ϴ DD	18.699	**K** DD=	0.324912686

Figura N°9: Constantes para calcular las barras de una geodésica icosaédrica de frecuencia 3 y 4.

En el siguiente ejemplo, mostrado en la figura N° 10, se aplicó el concepto de la *tensegridad* en un domo icosaédrico de frecuencia tres en el cual se han reemplazado las barras interiores de los hexágonos y de los pentágonos por elementos compuestos por cables de acero y barras centrales de PVC. Esta es una particular forma de fabricar un domo que tendrá menos piezas rígidas y una volumetría compuesta por elementos que desafiando la gravedad parecen flotar en el aire.

Figura N°10: Cúpula geodésica tensegrítica icosaédrica de frecuencia tres. Escuela de Arquitectura de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad San Martín de Porres

Aunque no se ajuste exactamente a la definición purista del término “tensegrítico” [viii], el efecto no deja de ser sorprendente pues el observador ve como flotan las barras sin llegar a comprender cómo es esto posible. “Quizás sea precisamente esto lo que a la gente le entusiasma de la Tensegridad, contemplar este fenómeno "mágico" que son incapaces de entender”[ix]

Cúpula Geodésica Hexaédrica

A diferencia de los casos anteriores, en este caso ya no hablaremos de triángulos esféricos sino de cuadrados esféricos.

Como se aprecia en la figura N°9 es necesario incluir barras diagonales de refuerzo para estabilizar la estructura.

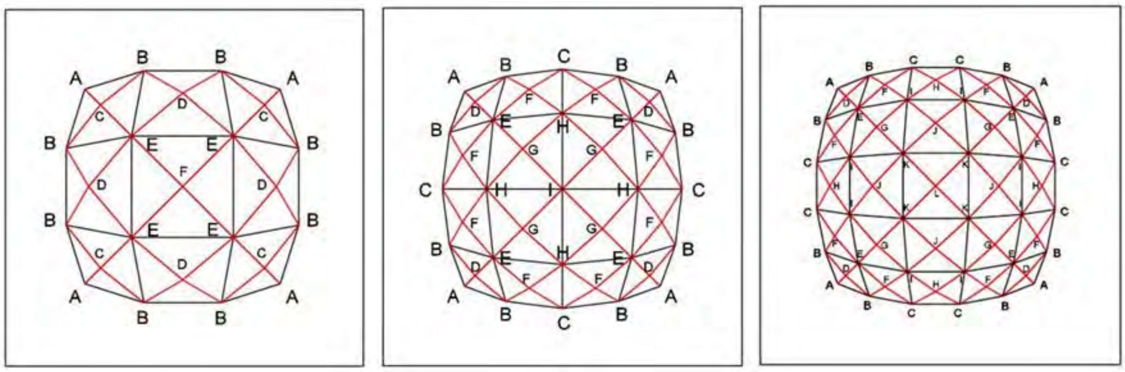

Figura N°9: Cuadrado esférico hexaédrico de frecuencia tres, frecuencia cuatro y frecuencia 5.

HEXAEDRO FRECUENCIA 3			th = 0.8660254	
ϴ AB	22.002		**K** AB=	0.38165226
ϴ BB	26.525		**K** BB=	0.45882549
ϴ BE	25.943		**K** BE=	0.44893271
ϴ EE	35.097		**K** EE=	0.603026
BARRAS DIAGONALES F3			BARRAS DE REFUERZO	
ϴ AC	11.422		**K** AC=	0.19902157
ϴ BC	18.932		**K** BC=	0.32892461
ϴ CE	18.074		**K** CE=	0.31414451
ϴ BD	17.364		**K** BD=	0.30190054
ϴ DE	23.093		**K** DE=	0.40032631
ϴ EF	25.239		**K** EF=	0.43695074

Tabla N°10: Constantes para calcular las barras de una geodésica hexaédrica de frecuencia 3 con las respectivas diagonales de refuerzo.

Cúpula Geodésica Dodecaédrica

Este es un caso particular. El dodecaedro, como poliedro regular, no tiene la estabilidad estructural del octaedro o del icosaedro y mucho menos del tetraedro; por otro lado, la geometría del pentágono es mucho más complicada que la geometría del triángulo o del cuadrado donde de manera fácil y sencilla determinamos la frecuencia.

Una de las maneras para lograr que el sistema sea estable, es dividir cada una de las caras pentagonales en cinco triángulos que resultarán siendo isósceles, a diferencia de los casos anteriores donde trabajábamos con triángulos equiláteros o con cuadrados en el caso del hexaedro. Esto nos dará como resultado un primer domo de frecuencia uno. Este será el punto de partida para el cálculo de la frecuencia donde se trabajará como si se tratase de un poliedro compuesto por sesenta caras.

En la figura N°12 podemos ver dos ejemplos de pentágonos esféricos de frecuencia dos, frecuencia tres y frecuencia cuatro.

En la siguiente imagen, figura N°13, se muestra un esquema compuesto por tres pentágonos esféricos que formaron parte de un estudio para realizar una estructura fabricada primero en maqueta y luego con tubos de PVC con los extremos calentados y aplastados, figura N°13.

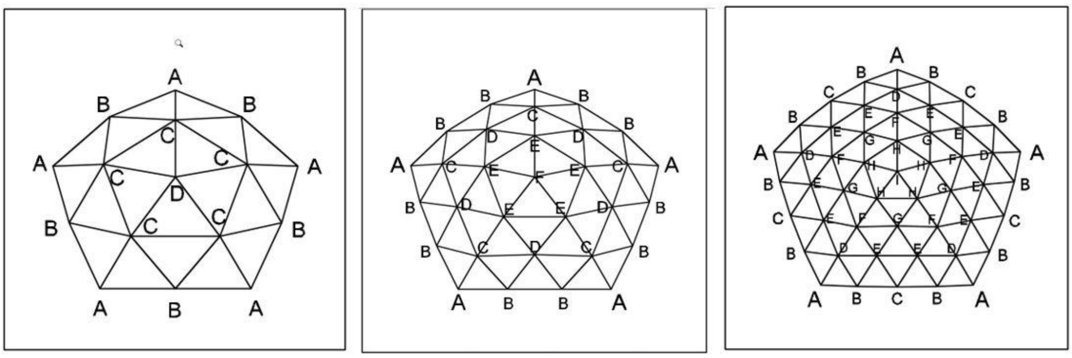

Figura N°12: Pentágonos esféricos de frecuencia dos, frecuencia tres y frecuencia cuatro.

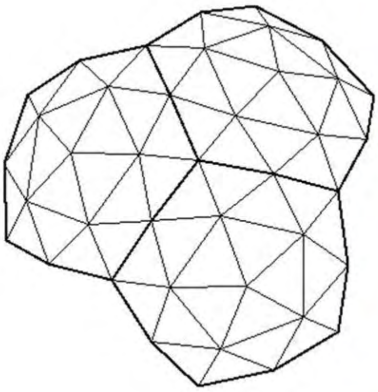


Figura N°13: Esquema de tres pentágonos esféricos que forman una cobertura basada en una estructura geodésica dodecaédrica, de frecuencia 2. A la derecha vemos una maqueta de este proceso

DODECAEDRO TRIANGULAR F-2				
1	ϴ AB	20.905	**K AB=**	0.362840628
2	ϴ AC	16.472	**K AC=**	0.286501601
3	ϴ CB	18.841	**K CB=**	0.32735788
4	ϴ CC	24.214	**K CC=**	0.41947604
5	ϴ CD	20.905	**K CD=**	0.362840628

Figura N°14: Constantes para calcular las barras de una geodésica dodecaédrica de frecuencia 2.

Después de realizar los respectivos ensayos en CAD, los estudiantes realizaron un modelo de radio de 4.00m fabricado con tubos de PVC. Figura N° 15.

Figura N°15: Estudiantes de la carrera de Arquitectura y Urbanismo Ambiental de la facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Científica del Sur construyendo una estructura geodésica dodecaédrica de frecuencia dos fabricada con tubos de PVC.

4.0 Conclusiones

Por razones de espacio hemos limitado la cantidad de tablas donde se aprecian las frecuencias relativas a cada modelo, sin embargo, ha podido apreciarse a lo largo del presente artículo que es factible realizar estructuras geodésicas partiendo de los cinco poliedros regulares de Platón, sin embargo, esto nos lleva a la inevitable pregunta: ¿Es acaso esta la única manera de realizar domos?; ¿Se pueden fabricar domos utilizando otras técnicas y otro tipo de poliedros no regulares? Esto da pie a investigar la factibilidad de desarrollar otro tipo de modelos empleando tal vez otros poliedros no regulares pero que también se pueden inscribir en una esfera, o quizás la manera de proyectar polígonos en una bóveda esférica y encontrar patrones matemáticos para poder sistematizarlos y poder estudiarlos tal como se ha realizado.

El mundo del diseño es vasto y fascinante donde la única limitación es nuestra propia imaginación.

5.0 Referencias

- Aravena, D., Vásquez, H. (2015). *Diseño dinámico y estructural de una medialuna cubierta para training*" (Tesis de pregrado, Universidad Del Bio – Bio, Concepción, Chile, 2015). Accedido el 01 de noviembre, 2017

http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/1454/1/Aravena_Arratia_Diego.pdf

- Baixas, Juan. (2010). *Forma Resistente*. Santiago: Ediciones ARQ.
- Gómez Jáuregui, Valentín. (2007). *Tensegridad, Estructuras De Compresión Flotante*. Pp 1. Accedido el 10 de noviembre 2017.

http://www.tensegridad.es/Publications/Tensegridad-Estructuras_De_Compresi%C3%83%C2%B3n_Flotante_by_GOMEZ-JAUREGUI.pdf

- Gómez Jáuregui, Valentín. (207). *Tensegridad: Estructuras Tensegríticas en Ciencia y Arte*. Santander: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria.
- Martínez Cendra, Francisco. (2007). *De Cúpulas Geodésicas, Fractales, Tensegritys Y Algo Más*. Lima: Ediciones Universidad San Martín de Porres.
- Moore, Fuller. (2000). *Compresión de la Estructuras en Arquitectura*. México: McGraw-Hill Interamericana Editores.

---

[i] Diego Aravena y Hernan Vasquez, *Diseño dinámico y estructural de una medialuna cubierta para training* (Tesis de pregrado, Universidad Del Bio – Bio, Concepción, Chile, 2015), 10
[ii] Diego Aravena, 10
[iii] Diego Aravena, 11
[iv] Juan Baxias. *Forma Resistente.* (Santiago: Ediciones ARQ. 2010), 151
[v] Fuller Moore. *Compresión de la Estructuras en Arquitectura* (México: McGraw-Hill Interamericana Editores, 2000). 60-61

[vi] Francisco Martínez Cendra. *De Cúpulas Geodésicas, Fractales, Tensegritys Y Algo Más*. (Lima: Ediciones Universidad San Martín de Porres, 2014). 152

[vii] Francisco Martínez Cendra. 155
[viii] Valentín Gómez Jáuregui. *Tensegridad: Estructuras Tensegríticas en Ciencia y Arte*. (Santander: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, 2007). 57

[ix] Gómez Jáuregui, Valentín. "Tensegridad, Estructuras De Compresión Flotante". http://www.tensegridad.es/Publications/Tensegridad-Estructuras_De_Compresi%C3%83%C2%B3n_Flotante_by_GOMEZ-JAUREGUI.pdf

(Consultado el 5 de Diciembre de 2017)