

FUNCIONAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS CÚPULAS GEODÉSICAS.

**ESTUDIO COMPARATIVO ESTRUCTURAL DE LAS CÚPULAS GEODÉSICAS
TRADICIONALES Y LAS DE PROYECCIÓN POR PASOS.**



arquitectura

Escuela Técnica Superior
Universidad de Sevilla

CURSO 2016-2017

AUTORA: TATIANA FERRER SARMIENTO.

TUTOR: JOSÉ SANCHEZ PEREZ

GRADO EN FUNDAMENTOS ARQUITECTÓNICOS.

FUNCIONAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS CÚPULAS GEODÉSICAS.

ESTUDIO COMPARATIVO ESTRUCTURAL DE LAS CÚPULAS GEODÉSICAS
TRADICIONALES Y LAS DE PROYECCIÓN POR PASOS.

ÍNDICE

1 ABSTRACTO Y PALABRAS CLAVE

2 INTRODUCCIÓN

2.1 Relevancia, oportunidad y motivación.

2.2 Estado de la cuestión.

2.3 Delimitación del ámbito de estudio.

3 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS.

4 METODOLOGÍA USADA EN EL TRABAJO.

5 DESARROLLO.

6 DISCUSIÓN.

Síntesis de los resultados alcanzados.

7 CONCLUSIONES.

Limitaciones, valoración crítica del ejercicio desarrollado y potencialidad de la temática.

8 BIBLIOGRAFÍA.

9 ANEXOS.

9.1 Definición geométrica de las cúpulas.

9.2 Cálculo estructural mediante sap 2000

1 ABSTRACTO Y PALABRAS CLAVE

Abstracto:

El objetivo de este estudio es el de llevar a cabo una comparación entre el funcionamiento estructural entre cúpulas geodésicas tradicionales y las de proyección por pasos, partiendo de modelos con las mismas características geométricas: radio y frecuencia; y material, se utilizó el mismo tipo de perfil en todos los modelos, con la intención de revelar cuales de ellas poseen un mejor funcionamiento estructural.

Para ello, mediante varios modelos tridimensionales a los que se les asignó el mismo perfil, se procedió al cálculo de estos, obteniendo los desplazamientos y el aprovechamiento de las barras.

Esto dio como resultado estructuras muy rígidas debido a su geometría, por lo que se aplicaron multiplicadores de mayoración a las cargas con los que se obtuvo deformaciones mínimas y fallos casi equivalentes en ambos modelos geométricos, aunque de mayor valor en las cúpulas de proyección por pasos.

En conclusión, el funcionamiento más óptimo de la estructura se produce en las cúpulas generadas de manera tradicional.

Palabras clave: *cúpula, geodésica, proyección por pasos, funcionamiento estructural, aprovechamiento,*

2 INTRODUCCIÓN

2.1 Relevancia, oportunidad y motivación.

La demanda de espacios de grandes luces en la arquitectura es significativa. Un sistema estructural que lo solventa son las estructuras espaciales; capaces de cubrir grandes dimensiones. Mediante el uso de cúpulas logramos un gran espacio con una gran altura libre central, a la par de un eficiente funcionamiento estructural. Una tipología de cúpula a destacar es las geodésica.

Tras tiempo utilizando las cúpulas geodésicas según la definición geométrica tradicional, un estudio de Ramtin Haghazadeh, Hoshyar Nooshin y Mahmood Golabchi, de las universidades de Teheran (Irán) y Surrey (Guilford, UK), confirma la mejora de la regularidad de las barras de las cúpulas mediante una nueva definición geométrica de estas, pudiéndose reducir así los costes y convirtiéndolas en una opción más viable.

En este trabajo se compararán ambas definiciones geométricas, con el fin de evaluar su funcionamiento estructural.

2.2 Estado de la cuestión.

¿Qué es una cúpula geodésica?

Para comprenderlo bien, recurriremos primero a algunas de las definiciones que utiliza Fuller en su patente:

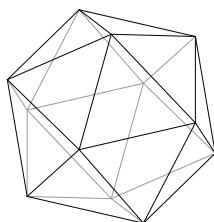
- Línea geodésica: aquella que une dos puntos de una esfera con la mínima longitud.
- Esfera geodésica: poliedro generado a partir de un icosaedro o dodecaedro, el cual, todos sus vértices coinciden con la esfera que lo define.

Por lo tanto, una cúpula geodésica es una fracción de esfera geodésica, ya sea una semiesfera, o un casquete.

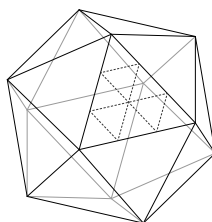
¿Cómo se genera una cúpula geodésica?

Para obtener una cúpula geodésica se toma una de geometría base, icosaedro o dodecaedro, siendo la más habitual el icosaedro. Las caras de estas geometrías se dividen mediante triángulos equiláteros según se muestra en la imagen, y la proyección de lo obtenido sobre la esfera circunscrita a la geometría de base, será la esfera geodésica. Para obtener una cúpula se proyectará la sección deseada.

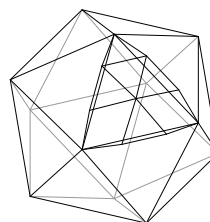
La triangulación de las caras de las geometrías base variarán en función de la frecuencia de la cúpula que queramos obtener, es decir, si queremos obtener una cúpula de frecuencia 2 la triangulación de la cara del icosaedro la realizaremos de manera que cada arista se divida en 2 segmentos. Por lo tanto, a mayor frecuencia, siempre obtendremos mayor número de barras, y estas serán de menor dimensión que las de una cúpula de menor frecuencia y mismo radio.



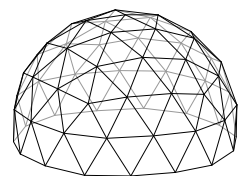
T01



T02



T03



T04

[D01] Dibujo explicativo generación de cúpulas geodésicas por el método tradicional.

Reseña de cúpulas geodésicas.

Primeras construidas: Palacio Imperial de China y Planetario de los Talleres de Zeiss.

A pesar de que suele nombrarse a Buckminster Fuller como inventor de las cúpulas geodésicas, lo cierto es que existen algunas construidas previas a él. En dos palacios de china, pueden observar dos esferas similares: ambas responden a la subdivisión geodésica de un icosaedro, estos palacios datan del 1885. Walter Bauerfeld construyó el planetario de los Talleres de Zeiss a partir de una cúpula geodésica de frecuencia 16 en el año 1922

Patente de Fuller.

El 29 de Junio de 1954 R. B. Fuller obtuvo la patente número 2.682.235, en la cual define una estructura tridimensional ligera. Esta estructura consiste en “un bastidor de forma esférica en el cual los elementos estructurales principales están interconectados con un patrón geodésico ... intersectando entre ellos para formar una parrilla tridimensional”(Fuller, 1954, p6).

A lo largo de la patente se describe como generar la geometría, la necesidad de una cimentación para este tipo de estructuras y su rigidez una vez finalizado el montaje. También aborda temas como los nudos de la estructura, solucionados mediante una pieza con muelles que permite el posicionamiento del perfil en el ángulo necesario en función de la situación de las barras y posibles variaciones de la estructura, modificando la posición de las barras para conseguir mayor inercia, por lo tanto un mejor funcionamiento en cúpulas de mayor tamaño.

Fuller dibuja la geometría de esta estructura a partir de un icosaedro proyectado sobre una esfera, obteniendo lo que él llama “triángulos esféricos”(Fuller 1954,p7). Para obtener la malla tridimensional, divide las aristas de estos triángulos en módulos del mismo tamaño, y une esas divisiones mediante arcos paralelos a las aristas de los triángulos, para así obtener triángulos “substancialmente equiláteros” (Fuller 1954,p6). El número de módulos en los que se divide cada arco lo denomina frecuencia, especificando que para los dibujos de esta patente él utiliza la frecuencia 16, aunque podría ser cualquiera; y recomienda utilizar mayores frecuencias a mayor dimensión de la estructura.

Proyección por pasos.

Una de las motivaciones para la realización de este trabajo fue el hallazgo de un artículo en el cual describían de manera diferente a la tradicional la geometría de las cúpulas o esferas geodésicas y gracias a ello mejoraban la regularidad de las barras que las forman.

Esta mejora consiste en la proyección por pasos, es decir, si en la definición geométrica tradicional de las cúpulas se prepara un único patrón plano sobre las caras de un icosaedro que se proyectará directamente sobre la esfera circunscrita, en este método se prepara un primer patrón plano sobre las caras del icosaedro y se consigue una cúpula con una frecuencia prima (1,2,3,5,7,...), y sobre las caras de estas cúpulas se prepara el nuevo patrón que se proyectará igualmente sobre la esfera, este segundo paso puede repetirse las veces necesarias, y a base de multiplicar las frecuencias se obtienen la cúpula de la frecuencia deseada. Ej: una cúpula de frecuencia 6 se obtendría a partir de una cúpula de frecuencia 3 sobre la que se dibujaría un patrón de frecuencia 2 ($3 \times 2 = 6$).

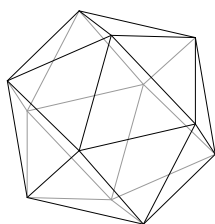
Tipologías: definición geométrica de las cúpulas.

Tradicional.

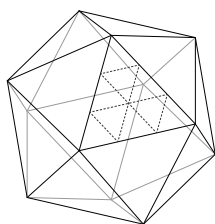
Para dibujar una cúpula geodésica según el modo tradicional, partiremos de una geometría base, en este caso el icosaedro por ser la más utilizada habitualmente. (T01)

Modularemos una de las caras del icosaedro con triángulos equiláteros, teniendo en cuenta que el número de divisiones que se genere en las aristas del icosaedro será la frecuencia de nuestra cúpula. En el ejemplo se trata de una frecuencia 3. (T02)

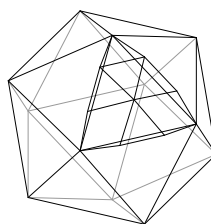
Proyectamos la triangulación base sobre la esfera circunscrita al icosaedro, y copiamos al resto de caras. Al tratarse de una cúpula de frecuencia 3, impar, no existe la opción de obtener una semiesfera geodésica, por lo que en este caso obtenemos un casquete. (T03 y T04)



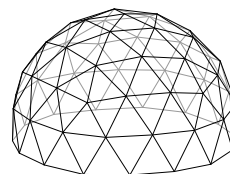
T01



T02



T03



T04

[D01]Dibujo explicativo generación de cúpulas geodésicas por el método tradicional.

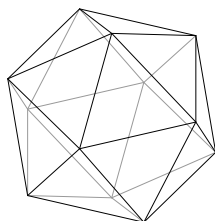
Proyección por pasos.

Para dibujar una cúpula geodésica mediante el método de proyección por pasos tomaremos de base una cúpula geodésica dibujada según el modo tradicional de frecuencia prima, en este caso frecuencia 3. (P01, P02 y P03)

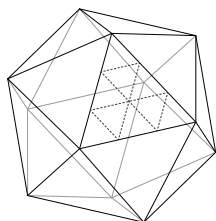
Modularemos una de las caras de la cúpula con triángulos equiláteros, teniendo en cuenta que el número de divisiones que se genere en las aristas del icosaedro multiplicado por la frecuencia de base, será la frecuencia de nuestra cúpula. En el ejemplo se trata de una frecuencia de base 3 multiplicada por 2, o sea, frecuencia 6. (P04)

Proyectamos la triangulación base sobre la esfera circunscrita, y copiamos al resto de caras.

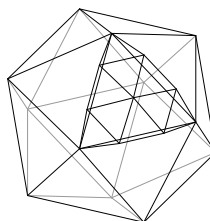
En este caso sí podemos obtener una semiesfera geodésica. (P05 y P06)



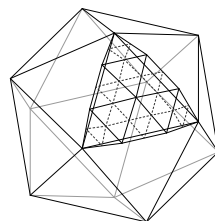
P01



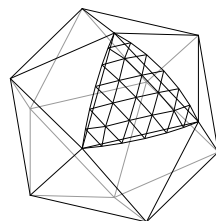
P02



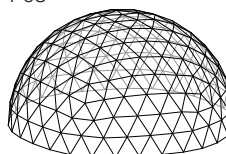
P03



P04



P05



P06

[D02]Dibujo explicativo generación de cúpulas geodésicas por el método de proyección por pasos.

Estudio de casos de cúpulas geodésicas.

- Biosphère de Montreal

Autoría: Buckminster Fuller.

Ubicación: Montreal, Canadá.

Año de construcción: 1967.

Altura libre: 62 metros.

Diámetro: 76 metros.

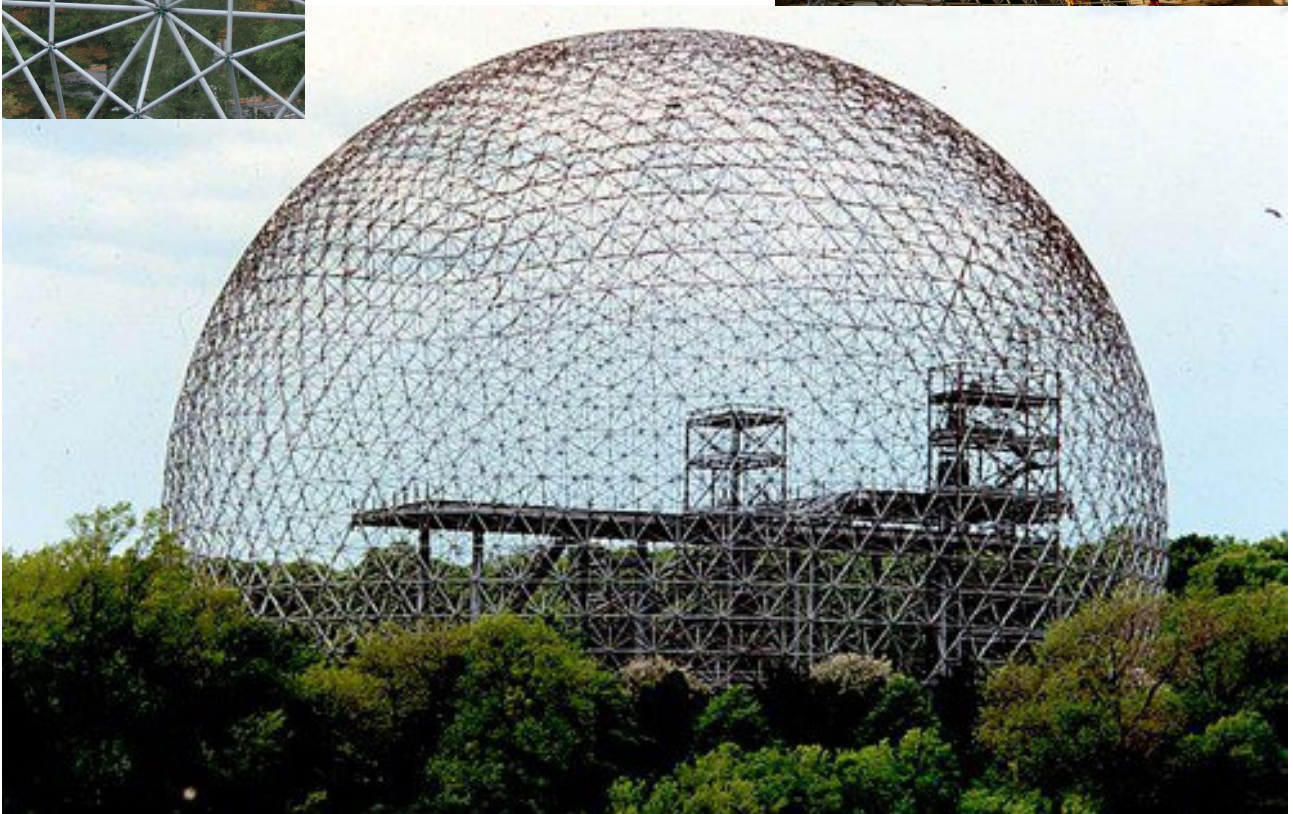
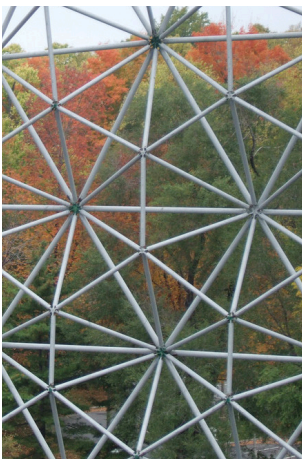
Frecuencia: 16.

Material: tubos de acero 3"

Descripción: La cúpula forma parte del conjunto de pabellones que se llevaron a cabo para la Exposición Mundial de 1967, este fue el de Estados Unidos. En su interior alberga un edificio de siete pisos que funcionó como exposición.

Originalmente estaba cubierta con una membrana de acrílico que difuminaba la visión de la estructura. Este recubrimiento se eliminó por completo tras ser dañado en un incendio en 1976, quedando la Biosfera cerrada al público.

En 1990 se reabre como exposición ambiental.



- Cúpula sobre Museo Dalí

Autoría: Emilio Pérez Piñero.

Ubicación: Figueres(Girona, España)

Año de construcción: 1972-1981

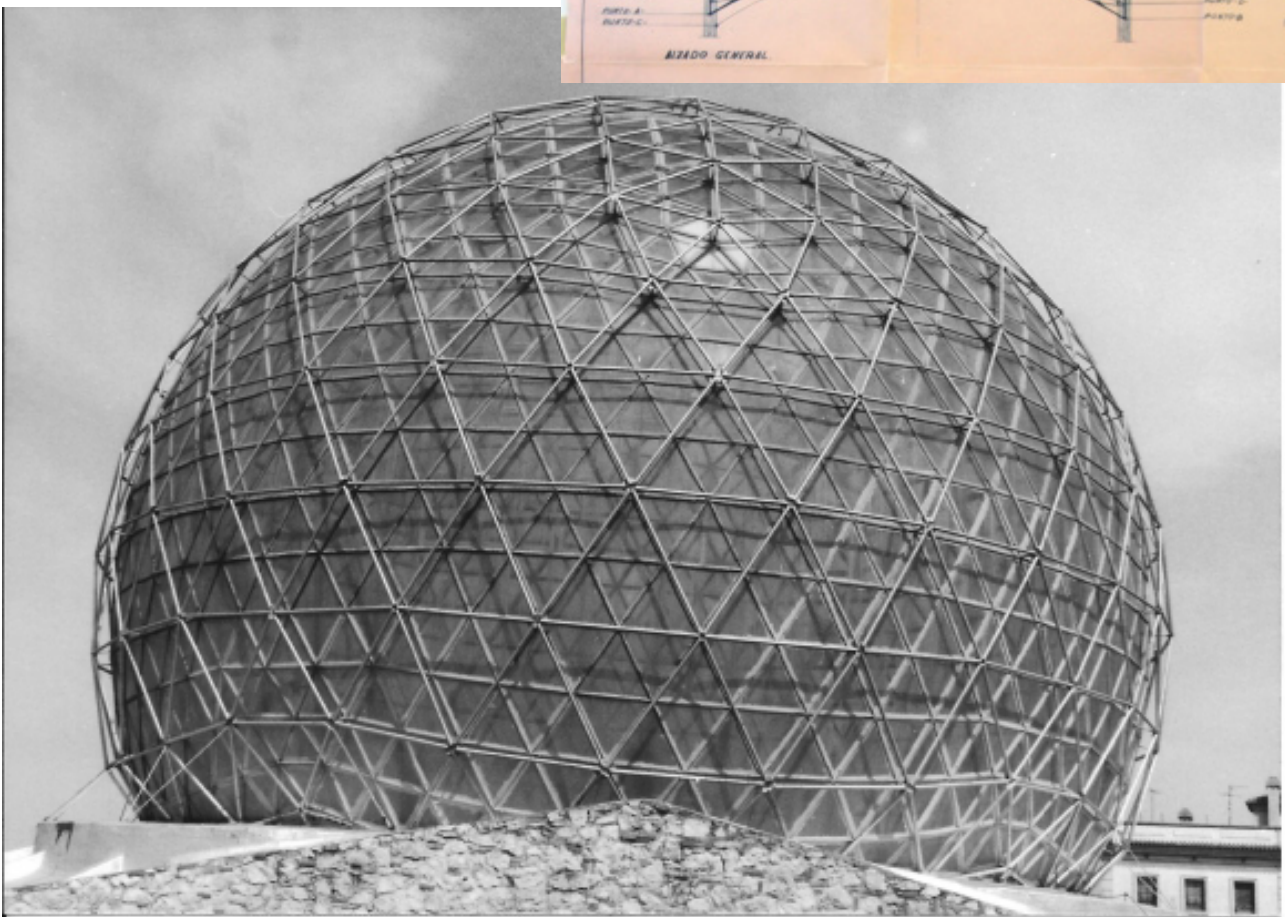
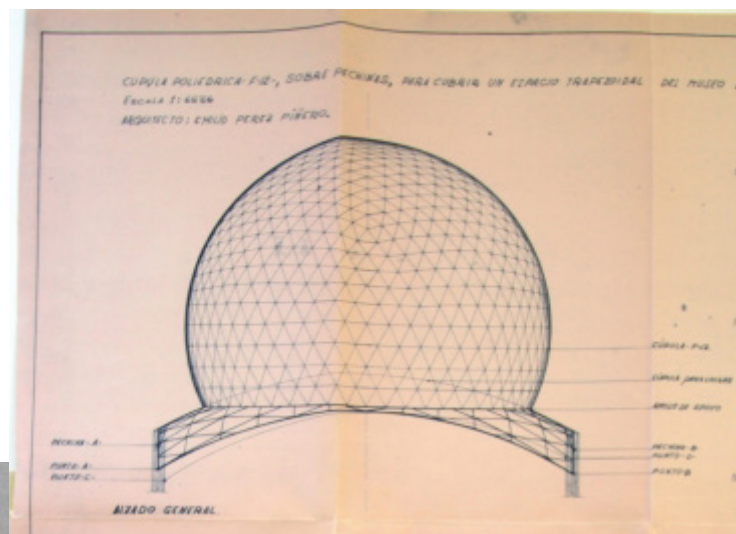
Altura libre: 10 m

Diámetro: 14 m

Frecuencia: 12

Material: Barras metálicas.

Descripción: Cuando Salvador Dalí vio una imagen de una cúpula geodésica de Fuller, quiso que una estructura como esa cubriera su museo en España. Finalmente, le hablaron de Emilio Pérez Piñero, y fue este quien la construyó. Se trata de una cúpula geodésica, que se alza sobre pechinas, también de desarrollo geodésico.



- Ejercicio de escuela.

Autoría: ETSAS.

Ubicación: Sevilla.

Año de construcción: 2016.

Altura libre:

Diámetro:

Frecuencia: 4

Material: lamas de persiana

Descripción: Esta cúpula fue construida durante la Semana Cultural del curso 2015/2016 en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de la Universidad de Sevilla. El taller lo llevó a cabo el colectivo CTRL+Z, y se ejecutó con materiales reciclado.

En la actualidad, la cúpula forma parte del mobiliario de la escuela.



- Cúpulas geodésicas desmontables.

Distribuidora: Polidomes international

Ubicación: itinerante.

Año de construcción: -

Altura libre: 3'8 a 15 metros

Diámetro: 6'2 a 30 metros

Frecuencia: 3, 5 y 6

Material: tubos de acero galvanizado.

Descripción: Se trata de un sistema estandarizado de cúpulas geodésicas de 8 tamaños distintos, combinables entre si. Todas las cúpulas se construyen bajo el cumplimiento de la normativa DIN 1615, 1984.



- Cúpula de papel.

Autoría: Shigeru Ban.

Ubicación: Leidschen Rijn, Utrecht.

Año de construcción: 2003

Altura libre: -.

Diámetro: 30 metros.

Frecuencia: 10

Material: tubos de cartón de 20 cm de diámetro.

Descripción: La cúpula se construyó inicialmente en Ámsterdam para un grupo de mimos, respondiendo a la demanda de un fácil desmontaje de la cúpula y el uso de materiales asequibles y reutilizables.

El los apoyos de la cúpula se realizan mediante un perfil perimetral a toda esta que traslada las cargas de manera puntual. Un dato a destacar de esta cúpula es que respeta la geometría de los triángulos que forman el icosaedro inicial que la genera.



Sistema constructivo: nudos y barras.

Como ya hemos comentado, las cúpulas geodésicas se definen geométricamente mediante la triangulación de una esfera a base de triángulos casi equiláteros. Estas estructuras se pueden llevar a cabo de diversas maneras, la primera clasificación sería:

Lineal: La estructura se desarrolla mediante perfiles de diversos materiales, como podremos ver en los casos de estudio, desde perfiles metálicos a tubos de cartón, sin olvidar la madera, ni elementos reciclados. De este tipo de estructuras, cabe destacar que las secciones de perfil utilizadas son muy variadas, desde tubos, a elementos lineales, o perfiles de carpintería.

Superficies: En este caso, las cúpulas se llevan a cabo mediante las caras triangulares definidas por las líneas. Como materiales posibles, cualquier tipo de panel con cierta rigidez, que en función de las dimensiones de la cúpula podrán ser desde paneles de madera, elementos plásticos, etc...

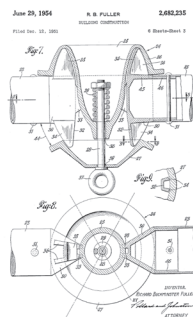
Mixto: la mayoría de estructuras en este caso se realizan mediante una estructura portante linear, que cierra sus caras. Entre los materiales de cerramiento más habituales se encuentran el vidrio para cúpulas fijas y los elementos textiles que recubren estructuras itinerantes.

Los encuentros con el terreno de esta estructura aparecen de nuevo de diversos modos, el hecho de ser semiesferas o fracciones de cúpulas influye de manera notable en esto. Las cúpulas pueden tener anclajes articulados, anclajes rígidos y apoyos. Cualquiera de los casos, se puede dar en todo el perímetro, o de manera puntual (p.e: cúpula de papel de Shigeru Ban).

Este tipo de estructuras nudos rígidos, y articulados. En los vértices de las cúpulas se han de unir de tres a seis perfiles o paneles, lo que hace que esta sea una cuestión bastante interesante a la hora de llevarlas a cabo.

Las cúpulas geodésicas que se construyen a base de elementos lineales tienen que combinar los distintos perfiles en cada extremo de estos, lo que se traduce en uno de los inconvenientes de la construcción de cúpulas geodésicas, la complejidad de los nudos, que a su vez, limita la tipología de los perfiles a utilizar. En cúpulas de tamaño reducido, se observan soluciones de nudos más rudimentarias que pasan por la superposición de las barras o perfiles. Mientras que en tamaños superiores se procura solventar de manera más ingeniosa, bien teniendo en cuenta el corte de los perfiles para su correcta unión o soldado o mediante sistemas como el explicado

en la patente de B.Fuller (Img1), o el empleado en cúpulas desmontables (Img 2 y 3).



Img 1: Nudo definido por Fuller en su Patente.



Img 2: Nudo de estructura itinerante (exterior).



Img 3: Nudo de estructura itinerante (interior).

2.3 Delimitación del ámbito de estudio.

Teniendo en cuenta la información recabada, procedo a delimitar el ámbito de estudio.

Para la comparación de las distintas cúpulas geodésicas, se procederá primero a la definición geométrica de estas, para así poder comparar las y ver sus diferencias. Las cúpulas a analizar serán las generadas de manera tradicional, y las de proyección por pasos. Ya que las segundas respecto a las primeras se generan con dimensiones de menor desviación en las barras, y la manera mas habitual y factible de llevarlas a cabo es de manera lineal, las analizaremos de este modo.

Por lo tanto, se comparará el funcionamiento estructural de cúpulas geodésicas obtenidas mediante proyección por pasos y su símil obtenida del modo tradicional. Las cúpulas a analizar serán las de frecuencia 4, 6, 8, 9 y 10.

Se tomarán como hipótesis cúpulas de diámetro 25m, longitud que ofrece una gran espacio libre interior.

A la hora de generar las cúpulas, se procurará que estas sean lo más similares entre ellas, se opta por una cúpula con apoyos en todo su perímetro, ya que es la tipología más habitual. Siempre que sea posible se utilizarán semiesferas geodésicas, cuando no lo sea, debido a la frecuencia de la cúpula, se optará por el casquete más pequeño que incluya la semiesfera.

3 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS.

El objetivo general de este trabajo es confirmar que tipología de cúpula geodésica tiene un mejor funcionamiento estructural.

Para conseguir este objetivo se abordarán también los siguientes:

- Validar los distintos tipos de definición geométricas de las cúpulas.
- Confirmar que tipología tiene menor longitud de barras.
- Comparar las estructura de las distintas cúpulas en función de su deformada y el aprovechamiento del la sección asignada.

4 METODOLOGÍA USADA EN EL TRABAJO.

El desarrollo de este trabajo ha consistido en la búsqueda de información previa, para ser capaz de definir correctamente estas estructuras. Desde una búsqueda de información histórica, patentes, posibles usos para las cúpulas, sistemas constructivos, materiales, etc... Se hace una pequeña reseña de casos interesantes para el trabajo realizado, que me ayudan a decidir las dimensiones y de las cúpulas a analizar.

Tras una correcta definición geométrica de estas, observamos qué cúpulas de las dos tipologías se compararán, es decir, las frecuencias que no se generan del mismo modo en las cúpulas tradicionales y en las de proyección por pasos.

Para llevar a cabo las comparaciones se han dibujado las dos tipologías de cúpula con el programa Rhinoceros, mediante modelado 3D a línea, se han obtenido las distintas cúpulas de las dos tipologías de frecuencia 1 a 10. Con esto, se ha llevado a cabo el recuento de número de barras, longitudes, y comparación entre ellas.

Cada cúpula ha sido generado a modo de modelo estructural, y mediante el programa SAP 2000, se le han asignado características de apoyo/encuentro con el terreno, sección de barra, nudos internos y cargas y mayoración de estas. Con esto se han obtenido los distintos datos que permiten la comparación de las deformadas de las estructuras y el aprovechamiento de la sección.

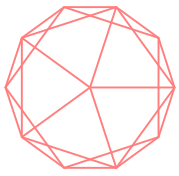
5 DESARROLLO.

5.1 Modelos

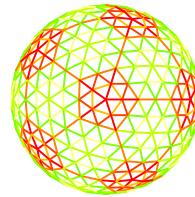
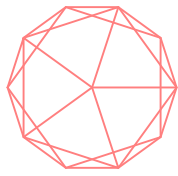
Cada cúpula de frecuencia 1 a 10, se ha dibujado en 3D de manera lineal, con este recurso, se ha podido realizar una comparación entre cúpulas en función de las longitudes de barra, la frecuencia, o la tipología.

En la siguiente tabla podemos observar la comparación de longitudes entre las distintas frecuencias y tipologías.

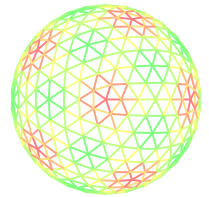
FREQ	Nº BARRAS	FREQ COMBI	Nº DE LONG			DESVIACIÓN LONG	
			TRAD	PP	PP/TRAD	TRAD	PP
1		1	1		1,00		
2	65	2	2		1,00	0,88	
3	165	3	3		1,00	0,85	
4	250	2x2	6	5	0,83	0,78	0,85
5	425	5	9		1,00	0,76	
6	555	3x2	9	7	0,78	0,75	0,83
7	850	7	16		1,00	0,75	
8	980	2x2x2	18	14	0,78	0,73	0,84
9	1170	3x3	18	14	0,78	0,72	0,83
10	1525	5x2	28	23	0,82	0,71	0,75



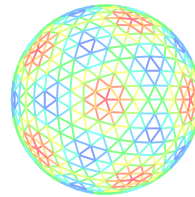
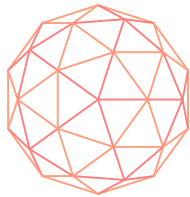
FRECUENCIA 1:
Desviación de longitudes de barras:
0 m
0%



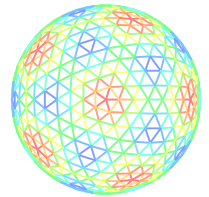
FRECUENCIA 6:
Desviación de longitudes de barras:
2,36 m
0,17%



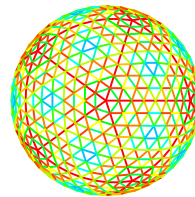
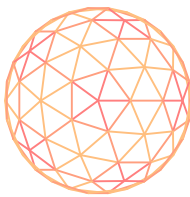
FRECUENCIA 2:
Desviación de longitudes de barras:
0 m
0%



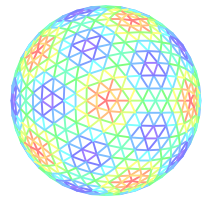
FRECUENCIA 7
Desviación de longitudes de barras:
0 m
0%



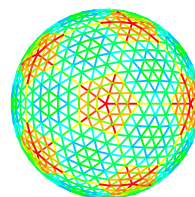
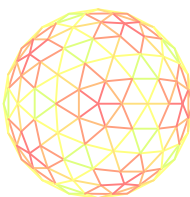
FRECUENCIA 3:
Desviación de longitudes de barras:
0 m
0%



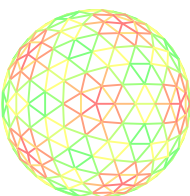
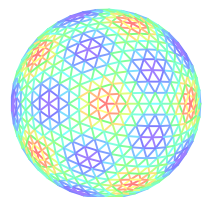
FRECUENCIA 8:
Desviación de longitudes de barras:
4,1 m
0,22%



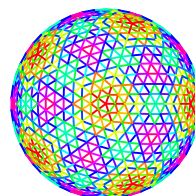
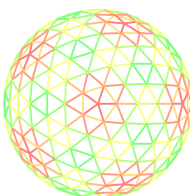
FRECUENCIA 4:
Desviación de longitudes de barras:
8,54 m
0,91%



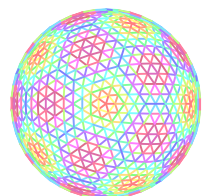
FRECUENCIA 9:
Desviación de longitudes de barras:
3,81 m
0,20 %



FRECUENCIA 5:
Desviación de longitudes de barras:
0 m
0%



FRECUENCIA 8:
Desviación de longitudes de barras:
1,54 m
0,07 %



5.2 Mejor funcionamiento estructural:

Se obtendrá observando los desplazamientos globales que se generen en la estructura, buscando siempre el cumplimiento de la normativa, CTE SE-A 5.4.1: Tabla 5.8 Imperfecciones locales de barra, desplazamiento máximo $L/350$. También se tendrá en cuenta el aprovechamiento de los perfiles según el Eurocódigo -1993.

Todo esto se calculará con el programa SAP2000.

5.3 Acciones de cálculo:

Se han introducido los distintos modelos vistos en el documento anterior en el programa SAP 200 como estructuras a base de barras y nudos. A las barras se les ha aplicado una sección tubular de 42,4mm de diámetro y espesor 4mm, de material acero S275.

De cada cúpula se comprobará la deformada de la estructura, y el aprovechamientos de la sección.

Según el CTE DB SE 4.3.3.1 Flechas, la flecha máxima permitida en este tipo de estructura (el resto de los casos) es de $1/300$. Puesto que las cúpula son de diámetro 25m, la luz máxima admisible será de 0,0833 m.

El aprovechamiento de la sección se comprobará mediante el cálculo del programa SAP200.

Para el cálculo de las estructuras se propone una hipótesis en la que se tiene en cuenta el peso propio de las barras, una hipótesis de recubrimiento mediante un textil de 0,1 kN/m, y una posible carga de nieve de 0,2 kN/m.

Puesto que se trata de estructuras muy rígidas debido a que su base geométrica es la triangulación, con las cargas propuestas no se producirá fallo, por lo que se le aplicará a estas un multiplicador obtenido a base de las cargas entre el peso propio.

Cada encuentro con el terreno ha sido definido como apoyo, de manera que las estructuras funcionan como un elemento independiente al terreno. Los nudos internos se han definido como rígidos, ya que aunque fuesen articulados, debido a la geometría de la estructura, a penas habría cambios, y con esta hipótesis estamos trabajando con la más desfavorable.

FRECUENCIA 4													
TRADICIONAL					POR PASOS								
			Coef. Seg					Coef. Seg					
	PP barras	35,385	kN	1,35	47,76975	kN		PP barras	35,498	kN	1,35	47,9223	kN
	PP recubrimiento	98,17477042	kN	1,35	132,5359401	kN		PP recubrimiento	98,17477042	kN	1,35	132,5359401	kN
	S Nieve	73,63083911	kN	1,5	110,4462587	kN		S Nieve	73,63083911	kN	1,5	110,4462587	kN
	TOTAL	207,1906095	kN		290,7519487	kN		TOTAL	207,3036095	kN		290,9044987	kN
	MULTIPLICADOR ELS	5,855323146		ELU	8,216813586			ELS	5,839867303		ELU	8,19495461	

FRECUENCIA 6													
TRADICIONAL					POR PASOS								
			Coef. Seg					Coef. Seg					
	PP barras	52,541	kN	1,35	70,93035	kN		PP barras	52,658	kN	1,35	71,0883	kN
	PP recubrimiento	98,17477042	kN	1,35	132,5359401	kN		PP recubrimiento	98,17477042	kN	1,35	132,5359401	kN
	S Nieve	73,63083911	kN	1,5	110,4462587	kN		S Nieve	73,63083911	kN	1,5	110,4462587	kN
	TOTAL	224,3466095	kN		313,9125487	kN		TOTAL	224,4636095	kN		314,0704987	kN
	MULTIPLICADOR ELS	4,269934138		ELU	5,974620748			ELS	4,262668722		ELU	5,964345375	

FRECUENCIA 8													
TRADICIONAL					POR PASOS								
			Coef. Seg					Coef. Seg					
	PP barras	69,708	kN	1,35	94,1058	kN		PP barras	69,708	kN	1,35	94,1058	kN
	PP recubrimiento	98,17477042	kN	1,35	132,5359401	kN		PP recubrimiento	98,17477042	kN	1,35	132,5359401	kN
	S Nieve	73,63083911	kN	1,5	110,4462587	kN		S Nieve	73,63083911	kN	1,5	110,4462587	kN
	TOTAL	241,5136095	kN		337,0879987	kN		TOTAL	241,5136095	kN		337,0879987	kN
	MULTIPLICADOR ELS	3,464646949		ELU	4,835714678			ELS	3,464646949		ELU	4,835714678	

FRECUENCIA 9													
TRADICIONAL					POR PASOS								
			Coef. Seg					Coef. Seg					
	PP barras	82,716	kN	1,35	111,6666	kN		PP barras	82,873	kN	1,35	111,87855	kN
	PP recubrimiento	98,17477042	kN	1,35	132,5359401	kN		PP recubrimiento	98,17477042	kN	1,35	132,5359401	kN
	S Nieve	73,63083911	kN	1,5	110,4462587	kN		S Nieve	73,63083911	kN	1,5	110,4462587	kN
	TOTAL	254,5216095	kN		354,6487987	kN		TOTAL	254,6786095	kN		354,8607487	kN
	MULTIPLICADOR ELS	3,077054131		ELU	4,287547739			ELS	3,073119225		ELU	4,281982657	

FRECUENCIA 10													
TRADICIONAL					POR PASOS								
			Coef. Seg					Coef. Seg					
	PP barras	86,827	kN	1,35	117,21645	kN		PP barras	86,883	kN	1,35	117,29205	kN
	PP recubrimiento	98,17477042	kN	1,35	132,5359401	kN		PP recubrimiento	98,17477042	kN	1,35	132,5359401	kN
	S Nieve	73,63083911	kN	1,5	110,4462587	kN		S Nieve	73,63083911	kN	1,5	110,4462587	kN
	TOTAL	258,6326095	kN		360,1986487	kN		TOTAL	258,6886095	kN		360,2742487	kN
	MULTIPLICADOR ELS	2,978711801		ELU	4,148463597			ELS	2,977436432		ELU	4,146659861	

6 DISCUSIÓN.

Síntesis de los resultados alcanzados.

Se ha llevado el cálculo y análisis estructural de cada par de cúpulas. A continuación, se observan los datos más relevantes. La información completa del cálculo se encuentra en el anexo 10.2 Cálculo estructural mediante SAP 200.

Frecuencia 4

La estructura presenta fallo en el aprovechamiento de las barras al aplicar el multiplicador base (x1): ELS 5,8 y ELU 8,2.

La deformada máxima de la estructura es de 1,8 mm; 2,16% de la permitida por el CTE.

Las barras con rango mayor que 1 en el aprovechamiento aparecen en la cúpula de proyección por pasos, mientras que la de proyección tradicional estaría dentro de los rangos de correcto funcionamiento.

Frecuencia 6

La estructura presenta fallo en el aprovechamiento de las barras al aplicar el cuarto multiplicador (x4): ELS 18,4 y ELU 24,2.

La deformada máxima de la estructura es de 6,6 mm; 7,92 % de la permitida por el CTE.

Las barras con rango mayor que 1 en el aprovechamiento aparecen ambas cúpulas y los valores más altos en barras equivalentes, siendo los datos más desfavorables los del modelo de proyección por pasos.

Frecuencia 8

La estructura presenta fallo en el aprovechamiento de las barras al aplicar el séptimo multiplicador (x7): ELS 24,5 y ELU 33,6.

La deformada máxima de la estructura es de 6,6 mm; 11,16 % de la permitida por el CTE.

Las barras con rango mayor que 1 en el aprovechamiento aparecen ambas cúpulas y los valores más altos no se dan en barras equivalentes, siendo los datos más desfavorables los del modelo de proyección por pasos.

Frecuencia 9

La estructura presenta fallo en el aprovechamiento de las barras al aplicar el noveno multiplicador (x9): ELS 27,9 y ELU 38,7.

La deformada máxima de la estructura es de 9,3 mm; 11,16 % de la permitida por el CTE.

Las barras con rango mayor que 1 en el aprovechamiento aparecen ambas cúpulas y los valores más altos no se dan en barras equivalentes, siendo los datos más desfavorables los del modelo de proyección por pasos.

Frecuencia 10

La estructura presenta fallo en el aprovechamiento de las barras al aplicar el onceavo multiplicador (x11): ELS 32,8 y ELU 45,6.

La deformada máxima de la estructura es de 12,5 mm; 15,00 % de la permitida por el CTE.

Las barras con rango mayor que 1 en el aprovechamiento aparecen ambas cúpulas y los valores más altos no se dan en barras equivalentes, y a pesar de que en la cúpula tradicional se dan más número de barras con fallo, los datos más desfavorables son los del modelo de proyección por pasos.

Todas las barras que fallan lo hacen a compresión.

7 CONCLUSIONES.

Limitaciones, valoración crítica del ejercicio desarrollado.

Con los datos recabados podemos concluir que:

Que las diferencias geométricas entre cúpulas de distinto modelo son:

Longitud total de barras: mayor en proyección por pasos.

Número de longitudes de barras: mayor en modelo tradicional.

Desviación de longitudes de barras en cada cúpula: mayor en modelo tradicional.

Por lo tanto, respecto a la geometría, podría decirse que en cuanto a la construcción compensaría la cúpula de proyección por pasos por tener menor número de longitudes de barras. Sin embargo, al tratarse de una longitud total de barras mayor la de las cúpulas de proyección por pasos el coste de material sería mayor, lo cual podría verse compensado, de nuevo, por tener menor número de longitudes de barras.

Respecto al cálculo estructural, las mayores deformaciones se dan en la cúpula de proyección por pasos, al igual que los fallos de las barras. Sin embargo, la única frecuencia en fallar con el primer multiplicador es la menor (F4), es decir, al resto de frecuencias se les aplica una gran mayoración hasta que estas presentan fallo.

Por lo tanto, podría decirse que el funcionamiento más óptimo de la estructura se produce en las cúpulas generadas de manera tradicional.

Potencialidad de la temática.

Debido a la envergadura del trabajo, quedan muchos campos de estudio abarcables, como por ejemplo:

Confirmación de que los datos obtenidos son equivalentes en cúpulas de distintas dimensiones

Comparación del funcionamiento de las cúpulas geodésicas tradicionales con las de Buckminster Fuller.

Comparación del funcionamiento estructural de cúpulas geodésicas generadas mediante paneles.

¿Cómo afecta el sistema constructivo de los nudos de las cúpulas geodésicas a su funcionamiento estructural?

Desarrollo de nudos de cúpulas geodésicas.

Dibujo de cúpulas geodésicas de manera paramétrica.

9 BIBLIOGRAFÍA.

Dibujos:

[D01]. Dibujo de la autora.

[D02]. Dibujo de la autora.

Imágenes:

[Cúpula fuller]. Recuperado de <http://blog.rtve.es/travesias/2010/11/dise%C3%B1ar-un-campo-de-refugiados.html>

[Cúpula piñero] Recuperado de <https://midas.revues.org/101>

Libros:

F. Escrig. (2012). *MODULAR, LIGERO, TRANSFORMABLE Un paseo por la arquitectura ligera móvil*. Sevilla: Universidad de Sevilla.

Patentes:

UNITED STATES PATENT OFFICE: Richard Buckminster Fuller. *Building construction*. no 2,682,235. 12 diciembre 1951.

Revistas:

R. Haghnazar, H. Nooshin & M. Golabchi. . (2014). Improving the Regularity of Geodesic Domes Using the Concept of Stepping Projection. *International Journal of Space Structures*, 29 n°2, pp.81-95.

Fenández-Galiano, L. (2010). Exploraciones geométricas: de la esfera al planeta. *AV Monografías*, 12-13.

Fenández-Galiano, L. (2010). Una revolución geodésica: cúpulas para el mundo. *AV Monografías*, 16-17.

Sadao, S. (2010). Breve historia de las cúpulas geodésicas. *AV Monografías* , 86-93.

Turner, F. (2010). Un tecnócrata para la contracultura. *AV Monografías* , 102-115.

Webs:

Almagro, M. C. (26 de marzo de 2013). MIDAS. Recuperado el 14 de junio de 2017, de Las estructuras de Emilio Pérez Piñero en la musealización de dos espacios singulares: <http://midas.revues.org/101> ; DOI : 10.4000/midas.101

CTRL+Z NOT A COLLECTIVE. (s.f.). Recuperado el 15 de marzo de 2017, de <http://control-zeta.org/archives/4548>

Shigeru Ban Architects. (s.f.). Recuperado el 15 de marzo de 2017, de http://www.shigerubanarchitects.com/works/2003_paper-theater/index.html

Plataformaarquitectura. (s.f.). Recuperado el 15 de marzo de 2017. <http://www.plataformaarquitectura.cl/cl/758384/clasicos-de-arquitectura-biosfera-de-montreal-buckminster-fuller>

Desert domes. (s.f.). Recuperado el 22 de febrero de 2016, de <http://www.desertdomes.com/index.html>

Teoría de construcción. (s.f.). Recuperado el 22 de febrero de 2016, de <http://teoriadeconstruccion.net/blog/cupulas-geodesicas-y-bucky-fuller/>

10 ANEXOS.

10.1 Definición geométrica de las cúpulas.

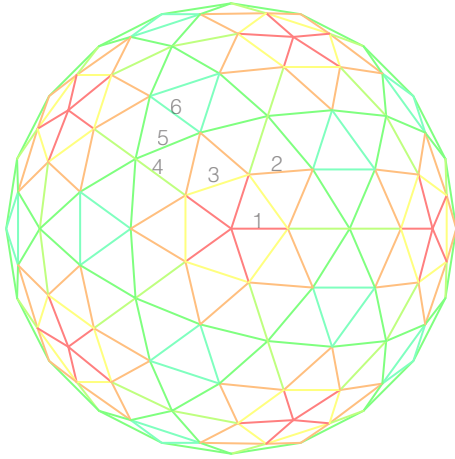
Cada cúpula se ha dibujado, y clasificado sus barras por longitudes.

En la siguiente tabla se comparan los pares de cúpulas y entre ellas.

FREQ	Nº BARRAS	FREQ COMBI	Nº DE LONG			DESVIACIÓN LONG	
			TRAD	PP	PP/TRAD	TRAD	PP
1		1	1		1,00		
2	65	2	2		1,00	0,88	
3	165	3	3		1,00	0,85	
4	250	2x2	6	5	0,83	0,78	0,85
5	425	5	9		1,00	0,76	
6	555	3x2	9	7	0,78	0,75	0,83
7	850	7	16		1,00	0,75	
8	980	2x2x2	18	14	0,78	0,73	0,84
9	1170	3x3	18	14	0,78	0,72	0,83
10	1525	5x2	28	23	0,82	0,71	0,75

Frecuencia 4.

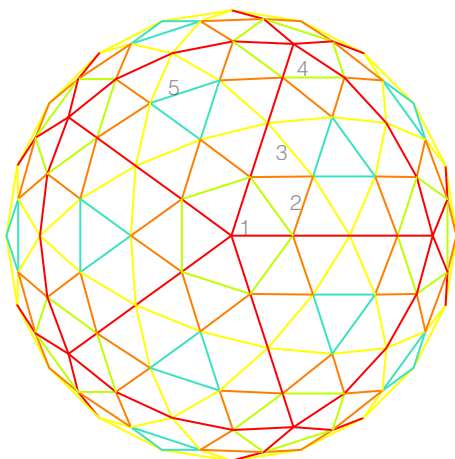
Proyección tradicional:



	LONGITUDES	NÚMERO DE BARRAS
1	3,165	30
2	3,682	60
3	3,691	30
4	3,732	30
5	3,911	70
6	4,061	30
		250

DESVIACIÓN (m) 0,896
DESVIACIÓN (%) 22,06

Proyección por pasos:

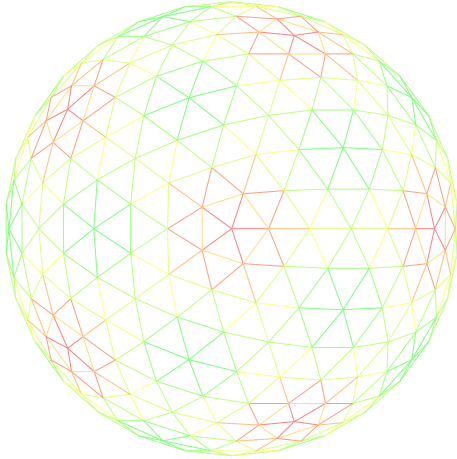


	LONGITUDES	NÚMERO DE BARRAS
1	3,449	60
2	3,568	60
3	3,991	70
4	4,016	30
5	4,061	30
		250

DESVIACIÓN (m) 0,612
DESVIACIÓN (%) 15,07

Frecuencia 6.

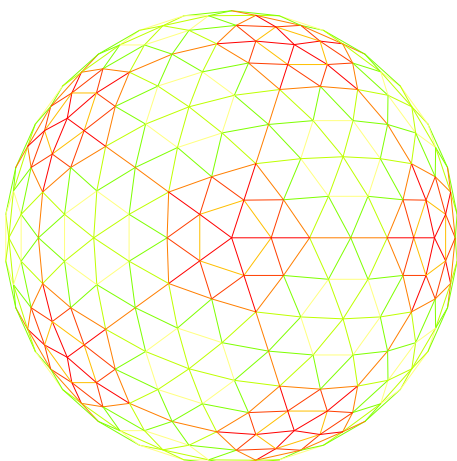
Proyección tradicional:



DESVIACIÓN (m) 0,676
DESVIACIÓN (%) 24,96

	LONGITUDES	NÚMERO DE BARRAS
1	2,032	30
2	2,274	60
3	2,342	30
4	2,381	30
5	2,475	60
6	2,535	90
7	2,574	130
8	2,692	65
9	2,708	60
		555

Proyección por pasos:

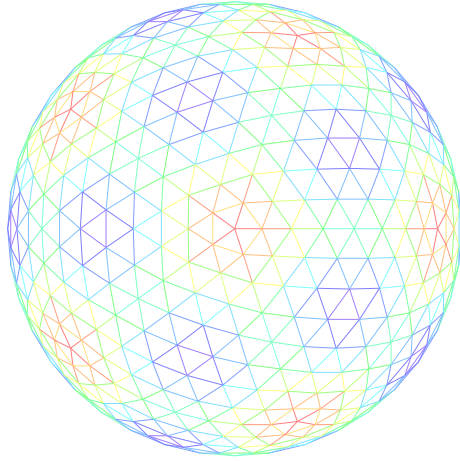


DESVIACIÓN (m) 0,446
DESVIACIÓN (%) 16,94

	LONGITUDES	NÚMERO DE BARRAS
1	2,187	60
2	2,218	60
3	2,535	90
4	2,561	30
5	2,578	65
6	2,592	120
7	2,633	130
		555

Frecuencia 8.

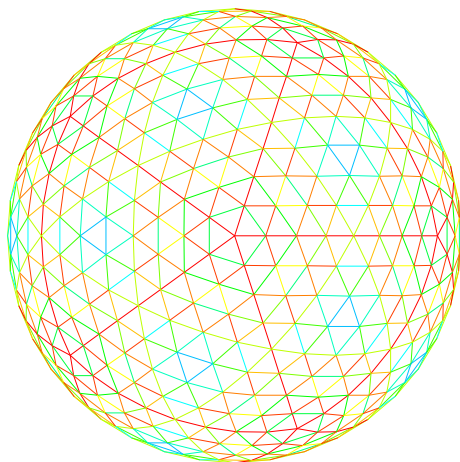
Proyección tradicional:



DESVIACIÓN (m) 0,565
DESVIACIÓN (%) 27,45

	LONGITUDES	NÚMERO DE BARRAS
1	1,493	30
2	1,678	30
3	1,692	60
4	1,752	30
5	1,757	60
6	1,818	60
7	1,829	30
8	1,850	60
9	1,858	60
10	1,908	60
11	1,912	70
12	1,914	30
13	1,935	60
14	1,955	90
15	2,004	90
16	2,011	70
17	2,038	60
18	2,058	30
		980

Proyección por pasos:

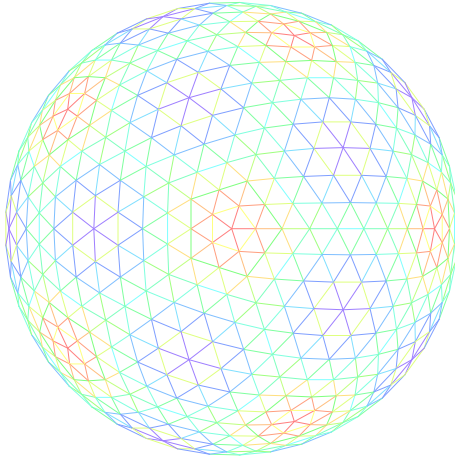


DESVIACIÓN (m) 0,329
DESVIACIÓN (%) 15,99

	LONGITUDES	NÚMERO DE BARRAS
1	1,729	120
2	1,744	120
3	1,789	120
4	1,804	60
5	1,805	60
6	1,961	140
7	1,975	60
8	1,981	60
9	2,014	60
10	2,027	30
11	2,029	30
12	2,038	60
13	2,056	30
14	2,058	30
		980

Frecuencia 9.

Proyección tradicional:

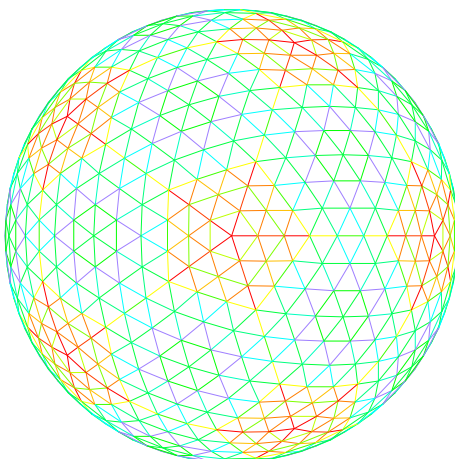


DESVIACIÓN (m) 0,505
DESVIACIÓN (%) 27,70

	LONGITUDES	NÚMERO DE BARRAS
1	1,318	30
2	1,425	60
3	1,466	30
4	1,528	60
5	1,547	30
6	1,578	60
7	1,594	30
8	1,617	60
9	1,627	60
10	1,677	110
11	1,681	90
12	1,700	120
13	1,713	40
14	1,749	50
15	1,768	110
16	1,781	110
17	1,818	60
18	1,823	60

1170

Proyección por pasos:



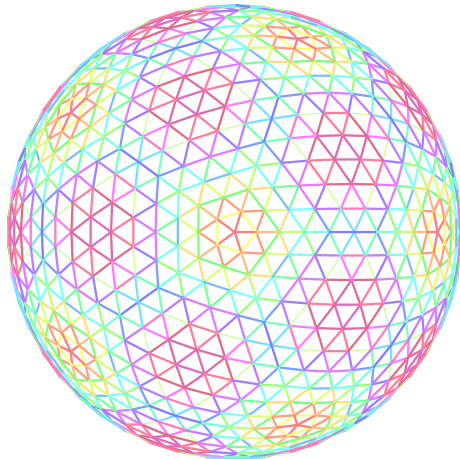
DESVIACIÓN (m) 0,303
DESVIACIÓN (%) 17,31

	LONGITUDES	NÚMERO DE BARRAS
1	1,452	60
2	1,473	30
3	1,475	120
4	1,482	60
5	1,681	90
6	1,705	30
7	1,709	60
8	1,713	40
9	1,714	60
10	1,718	230
11	1,751	120
12	1,752	50
13	1,755	110
14	1,756	110

1170

Frecuencia 10.

Proyección tradicional:

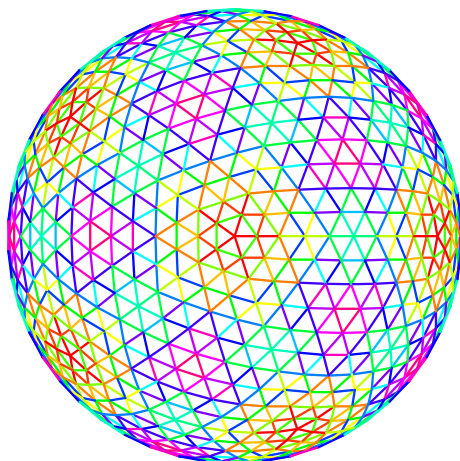


DESVIACIÓN (m) 0,47
DESVIACIÓN (%) 28,50

	LONGITUDES	NÚMERO DE BARRAS
1		
2	1,179	30
3	1,266	60
4	1,300	30
5	1,351	60
6	1,385	30
7	1,391	60
8	1,409	30
9	1,426	60
10	1,451	60
11	1,475	60
12	1,485	60
13	1,491	30
14	1,497	60
15	1,500	60
16	1,519	70
17	1,522	30
18	1,524	60
19	1,536	30
20	1,542	60
21	1,569	60
22	1,572	120
23	1,584	60
24	1,594	70
25	1,595	30
26	1,621	95
27	1,625	60
28	1,639	60
	1,649	30

1525

Proyección por pasos:



DESVIACIÓN (m) 0,409
DESVIACIÓN (%) 24,80

	LONGITUDES	NÚMERO DE BARRAS
1	1,240	60
2	1,245	60
3	1,413	120
4	1,420	60
5	1,421	60
6	1,450	60
7	1,451	60
8	1,456	30
9	1,458	90
10	1,535	120
11	1,536	30
12	1,543	70
13	1,544	60
14	1,545	30
15	1,548	120
16	1,555	60
17	1,557	70
18	1,598	120
19	1,607	60
20	1,608	60
21	1,639	60
22	1,648	35
23	1,649	30

1525

10.2 Cálculo estructural mediante SAP 2000.

Se han introducido los distintos modelos vistos en el documento anterior en el programa SAP 200 como estructuras a base de barras y nudos. A las barras se les ha aplicado una sección tubular de 42,4mm de diámetro y espesor 4mm, de material acero S275.

De cada cúpula se comprobará la deformada de la estructura, y el aprovechamientos de la sección.

Según el CTE DB SE 4.3.3.1 Flechas, la flecha máxima permitida en este tipo de estructura (el resto de los casos) es de 1/300. Puesto que las cúpula son de diámetro 25m, la luz máxima admisible será de 0,0833 m.

El aprovechamiento de la sección se comprobará mediante el cálculo del programa SAP200.

Para el cálculo de las estructuras se propone una hipótesis en la que se tiene en cuenta el peso propio de las barras, una hipótesis de recubrimiento mediante un textil de 0,1 kN/m, y una posible carga de nieve de 0,2 kN/m.

Puesto que se trata de estructuras muy rígidas debido a que su base geométrica es la triangulación, con las cargas propuestas no se producirá fallo, por lo que se le aplicará a estas un multiplicador obtenido a base de las cargas entre el peso propio.

FRECUENCIA 4									
TRADICIONAL					POR PASOS				
	PP barras	35,385	kN	1,35	47,76975	kN	1,35	47,9223	kN
	PP recubrimiento	98,17477042	kN	1,35	132,5359401	kN	1,35	132,5359401	kN
	S Nieve	73,63083911	kN	1,5	110,4462587	kN	1,5	110,4462587	kN
	TOTAL	207,1906095	kN		290,7519487	kN		290,9044987	kN
MULTIPLICADOR	ELS	5,855323146		ELU	8,216813586		ELU	8,19495461	
FRECUENCIA 6									
TRADICIONAL					POR PASOS				
	PP barras	52,541	kN	1,35	70,93035	kN	1,35	71,0883	kN
	PP recubrimiento	98,17477042	kN	1,35	132,5359401	kN	1,35	132,5359401	kN
	S Nieve	73,63083911	kN	1,5	110,4462587	kN	1,5	110,4462587	kN
	TOTAL	224,3466095	kN		313,9125487	kN		314,0704987	kN
MULTIPLICADOR	ELS	4,269934138		ELU	5,974620748		ELU	5,964345375	
FRECUENCIA 8									
TRADICIONAL					POR PASOS				
	PP barras	69,708	kN	1,35	94,1058	kN	1,35	94,1058	kN
	PP recubrimiento	98,17477042	kN	1,35	132,5359401	kN	1,35	132,5359401	kN
	S Nieve	73,63083911	kN	1,5	110,4462587	kN	1,5	110,4462587	kN
	TOTAL	241,5136095	kN		337,0879987	kN		337,0879987	kN
MULTIPLICADOR	ELS	3,464646949		ELU	4,835714678		ELU	4,835714678	
FRECUENCIA 9									
TRADICIONAL					POR PASOS				
	PP barras	82,716	kN	1,35	111,6666	kN	1,35	111,8755	kN
	PP recubrimiento	98,17477042	kN	1,35	132,5359401	kN	1,35	132,5359401	kN
	S Nieve	73,63083911	kN	1,5	110,4462587	kN	1,5	110,4462587	kN
	TOTAL	254,5216095	kN		354,6487987	kN		354,8607487	kN
MULTIPLICADOR	ELS	3,077054131		ELU	4,287547739		ELU	4,281982657	
FRECUENCIA 10									
TRADICIONAL					POR PASOS				
	PP barras	86,827	kN	1,35	117,21645	kN	1,35	117,29205	kN
	PP recubrimiento	98,17477042	kN	1,35	132,5359401	kN	1,35	132,5359401	kN
	S Nieve	73,63083911	kN	1,5	110,4462587	kN	1,5	110,4462587	kN
	TOTAL	258,6326095	kN		360,1986487	kN		360,2742487	kN
MULTIPLICADOR	ELS	2,978711801		ELU	4,148463597		ELU	4,146659861	1

Frecuencia 4

Perfil: 42,4 mm e=4mm

Peso propio:

Tradicional: 35,385 kN

Proyección por pasos: 35,498 kN

Multiplicadores (x1):

ELS: 5,8

ELU: 8,2

DEAD

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0003 m

Proyección por pasos: 0,0003 m

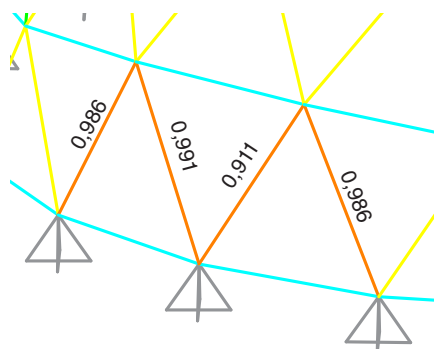
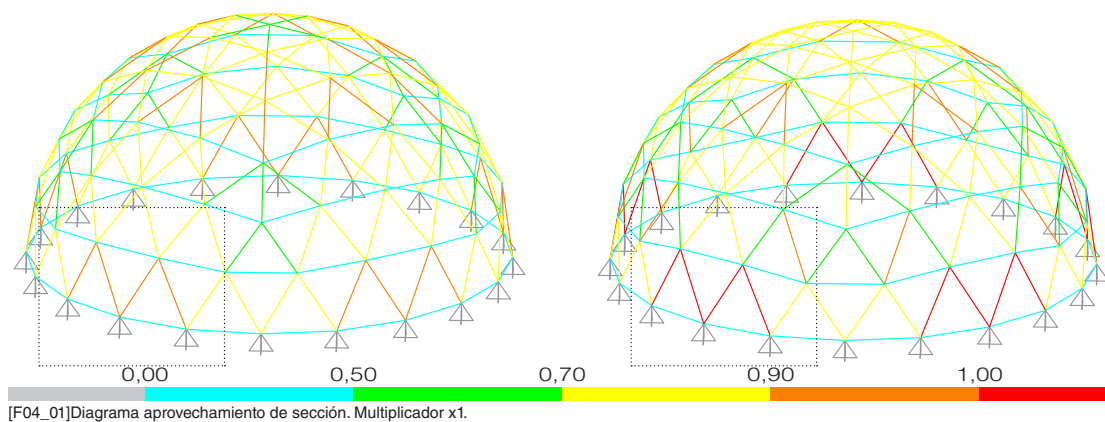
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0018 m

Proyección por pasos: 0,0018 m

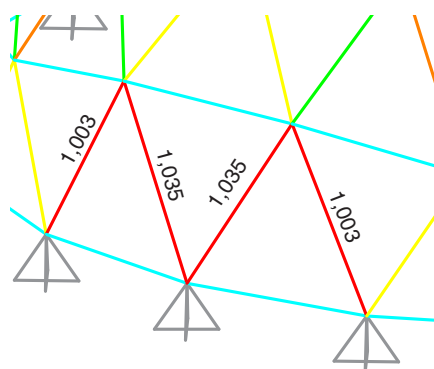
Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual podemos observar que en el modelo de proyección por pasos fallan algunas barras.



[F04_02] Barras equivalentes al fallo en modelo tradicional.

Frame ID	516	Analysis Section	TUB042.4/4
Design Code	EUROCODE 3:1993	Design Section	TUB042.4/4

COMBO	STATION	LOC	RATIO	AXL + B-MAJ + B-MIN	MAJ-SHR	MIN-SHR	RATIO
ELU	0,00	0,667 (C)	= 0,667 + 0,000 + 0,000	0,008	0,000	0,000	0,000
ELU	0,91	0,765 (C)	= 0,765 + 0,000 + 0,000	0,008	0,000	0,000	0,000



[F04_03] Barras con fallo en modelo proyección por pasos.

Frame ID	210	Analysis Section	TUB042.4/4
Design Code	EUROCODE 3:1993	Design Section	TUB042.4/4

COMBO	STATION	LOC	RATIO	AXL + B-MAJ + B-MIN	MAJ-SHR	MIN-SHR	RATIO
ELU	0,00	0,762 (C)	= 0,762 + 0,000 + 0,000	0,009	0,000	0,000	0,000
ELU	4,06	0,656 (C)	= 0,656 + 0,000 + 0,000	0,009	0,000	0,000	0,000

Frecuencia 6

Perfil: 42,4 mm $e=4\text{mm}$

Peso propio:

Tradicional: 35,385 kN

Proyección por pasos: 35,498 kN

Multiplicadores(x1):

ELS: 4,6

ELU: 6,0

DEAD

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0003 m

Proyección por pasos: 0,0004 m

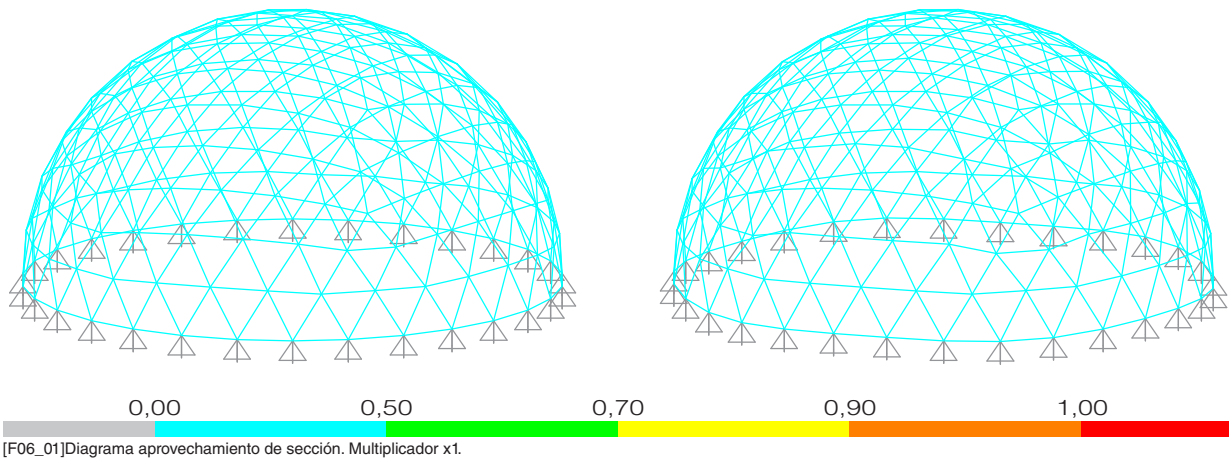
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0016 m

Proyección por pasos: 0,0017 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x2):

ELS: 9,2

ELU: 12,0

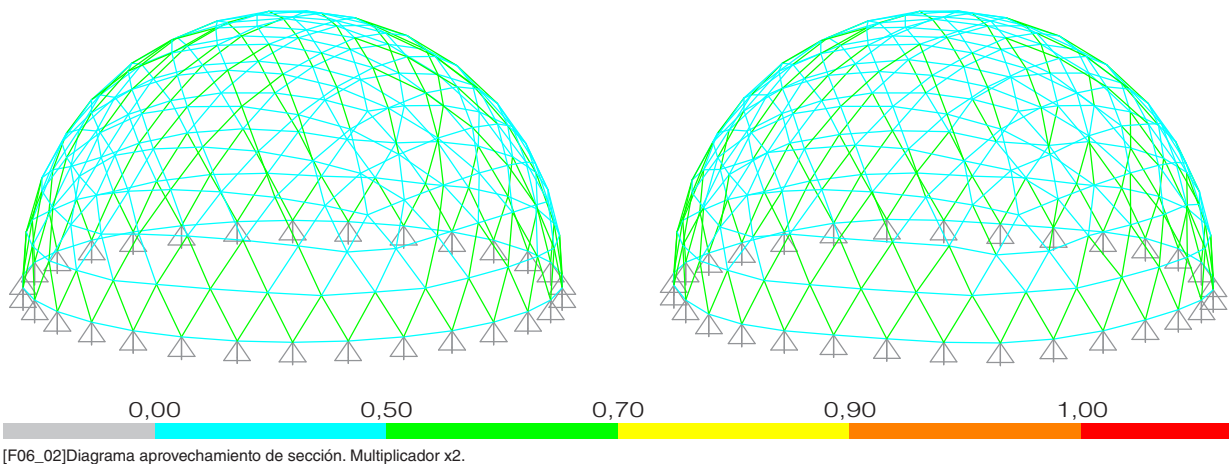
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0032 m

Proyección por pasos: 0,0033 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x3):

ELS: 13,8

ELU: 18,0

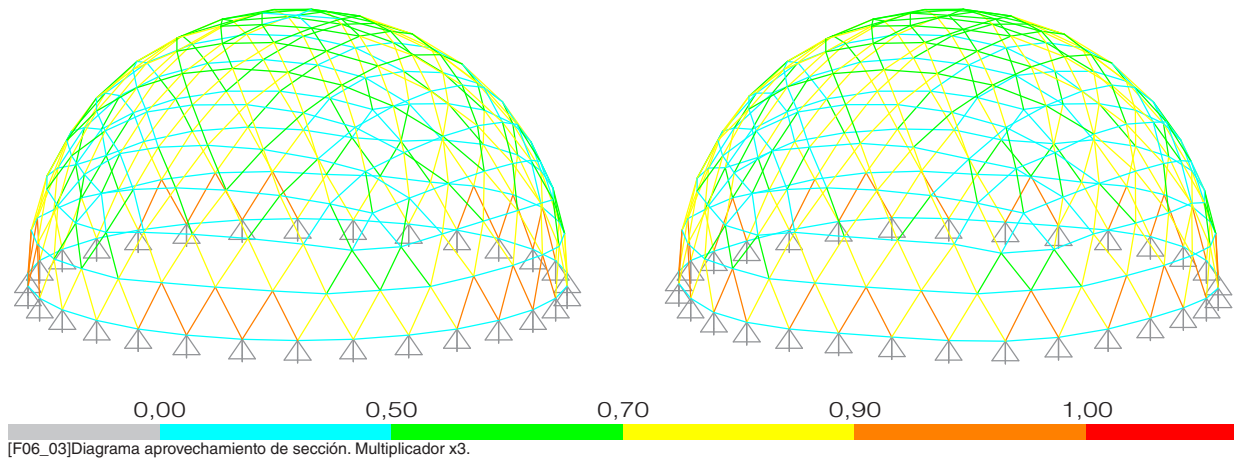
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0048 m

Proyección por pasos: 0,0050 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x4):

ELS: 18,4

ELU: 24,0

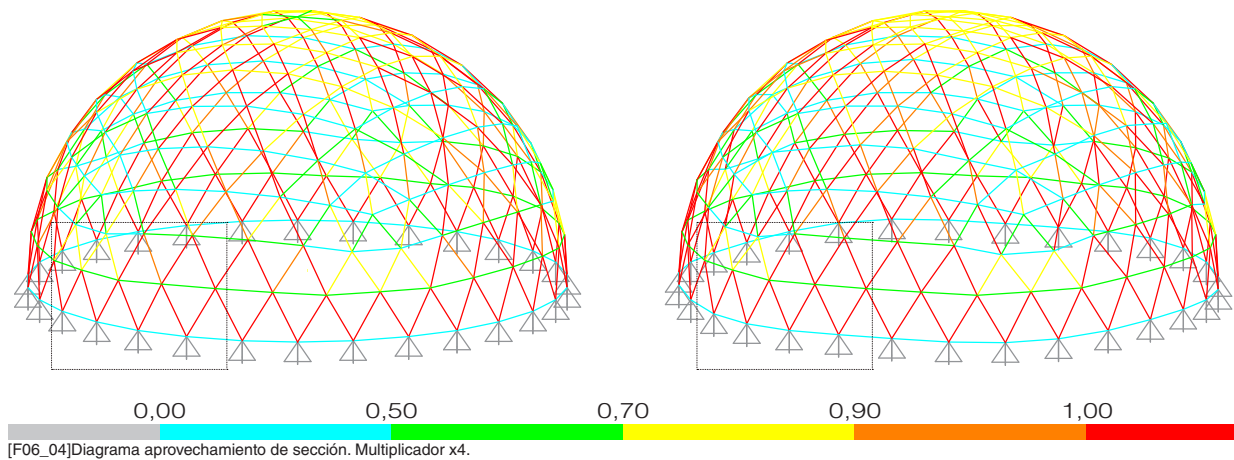
ELS

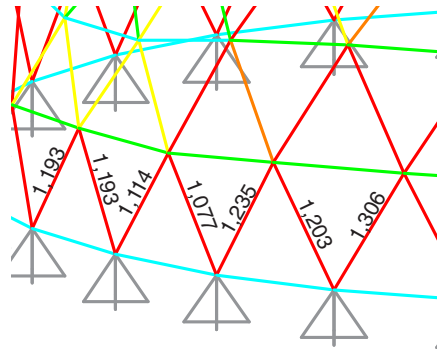
Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0064 m

Proyección por pasos: 0,0066 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual podemos observar en ambas cúpulas fallan las mismas barras. Observamos las barras que tienen mayor aprovechamiento.

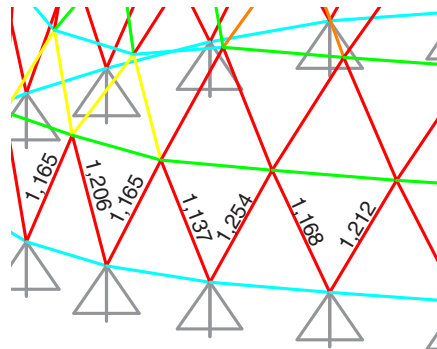




[F04_02] Barras equivalentes al fallo en modelo tradicional.

Frame ID	1346	Analysis Section	TUB042.2x4
Design Code	EUROCODE 3:1993	Design Section	TUB042.2x4

COMBO	STATION	LOC	RAIO	AXL + B-MIN	AXL + B-MIN	AXL + B-MIN	AXL + B-MIN
EUU	0,00	1,201 (C)	=	0,946	+ 0,255	+ 0,016	0,015
EUU	1,29	1,092 (C)	=	0,989	+ 0,103	+ 0,000	0,000
EUU	2,57	1,235 (C)	=	1,032	+ 0,203	+ 0,009	0,014



[F04_03] Barras con fallo en modelo proyección por pasos.

Frame ID	174	Analysis Section	TUB042.2x4
Design Code	EUROCODE 3:1993	Design Section	TUB042.2x4

COMBO	STATION	LOC	RAIO	AXL + B-MIN	AXL + B-MIN	AXL + B-MIN	AXL + B-MIN
EUU	0,00	1,175 (C)	=	0,924	+ 0,251	+ 0,017	0,016
EUU	1,32	1,098 (C)	=	0,969	+ 0,129	+ 0,000	0,000
EUU	2,63	1,254 (C)	=	1,014	+ 0,239	+ 0,011	0,016

Podemos observar que las barras con el valor de aprovechamiento mayor que 1 son prácticamente las mismas en ambas estructuras, y que el valor más alto se da en ambas en barras equivalentes, siendo más desfavorable en el modelo de proyección por pasos.

Frecuencia 8

Perfil: 42,4 mm e=4mm

Peso propio:

Tradicional: 69,708 kN

Proyección por pasos: 69,708 kN

Multiplicadores(x1):

ELS: 3,5

ELU: 4,8

DEAD

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0004 m

Proyección por pasos: 0,0004 m

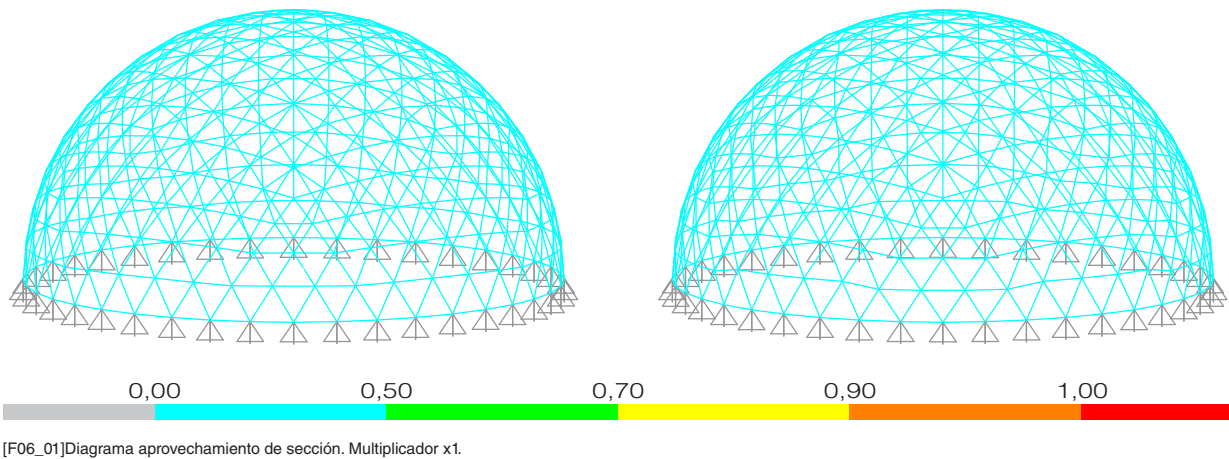
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0013 m

Proyección por pasos: 0,0017 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x2):

ELS: 7,0

ELU: 9,6

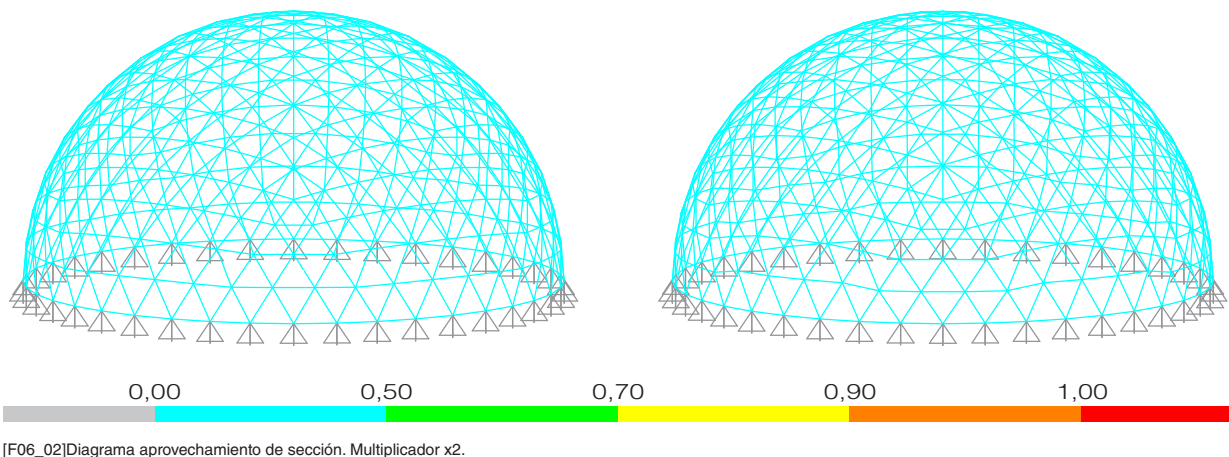
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0025 m

Proyección por pasos: 0,0027 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x3):

ELS: 10,5 ELU: 14,4

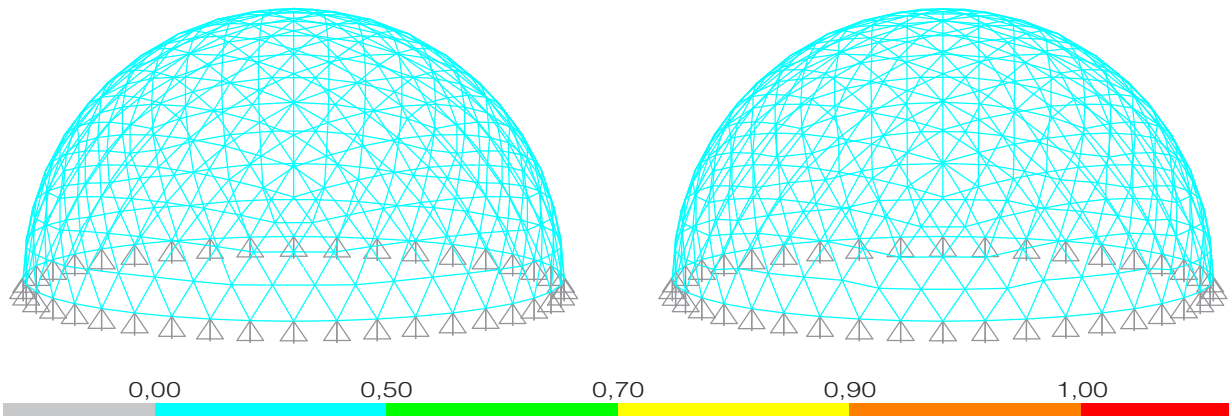
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0038 m

Proyección por pasos: 0,0040 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



[F06_03]Diagrama aprovechamiento de sección. Multiplicador x3.

Multiplicadores(x4):

ELS: 14,0 ELU: 19,2

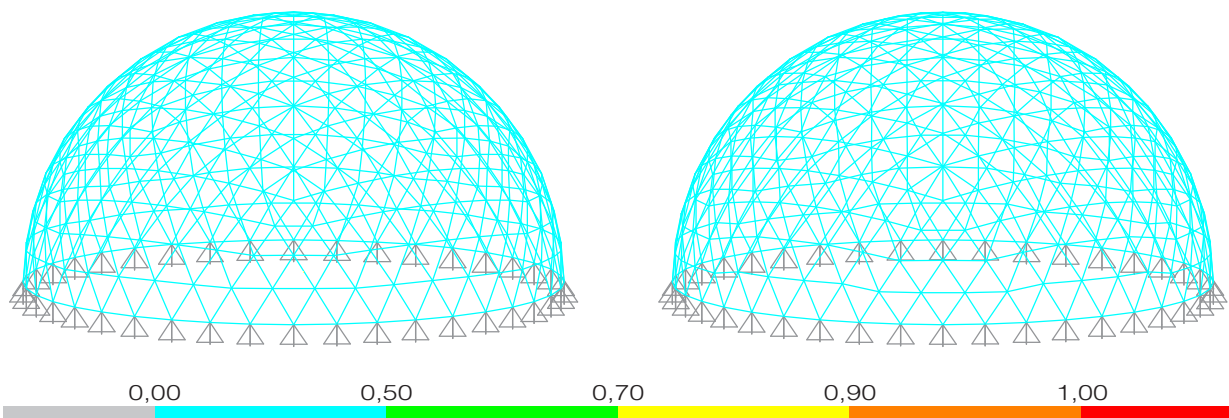
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0051 m

Proyección por pasos: 0,0053 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



[F06_04]Diagrama aprovechamiento de sección. Multiplicador x4.

Multiplicadores(x5):

ELS: 17,5

ELU: 24,0

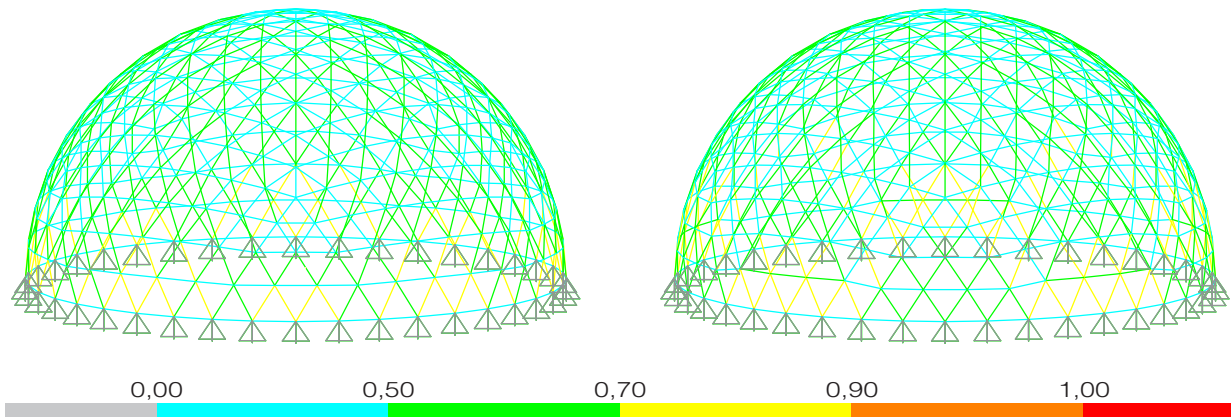
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0064 m

Proyección por pasos: 0,0066 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



[F06_05]Diagrama aprovechamiento de sección. Multiplicador x5.

Multiplicadores(x6):

ELS: 21,0

ELU: 28,8

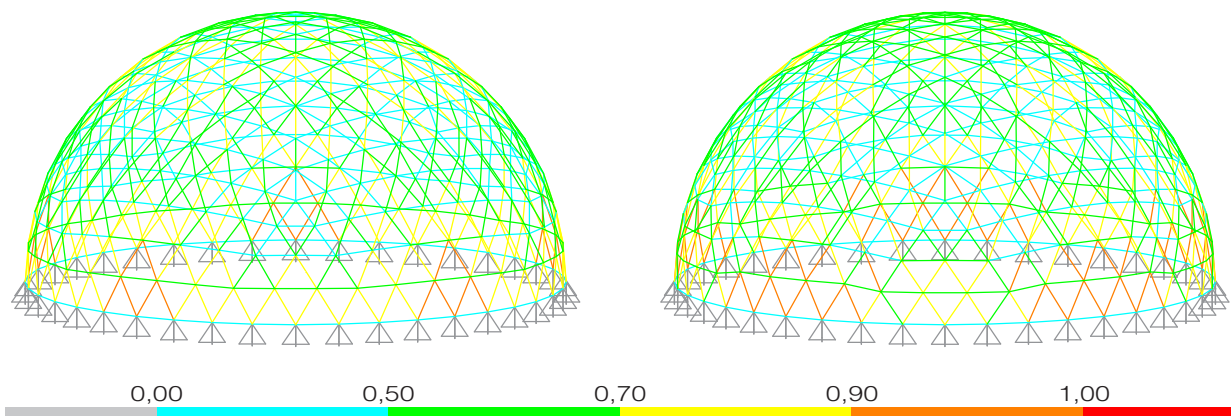
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0076 m

Proyección por pasos: 0,0080 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



[F06_06]Diagrama aprovechamiento de sección. Multiplicador x6.

Multiplicadores(x7):

ELS: 24,5

ELU: 33,6

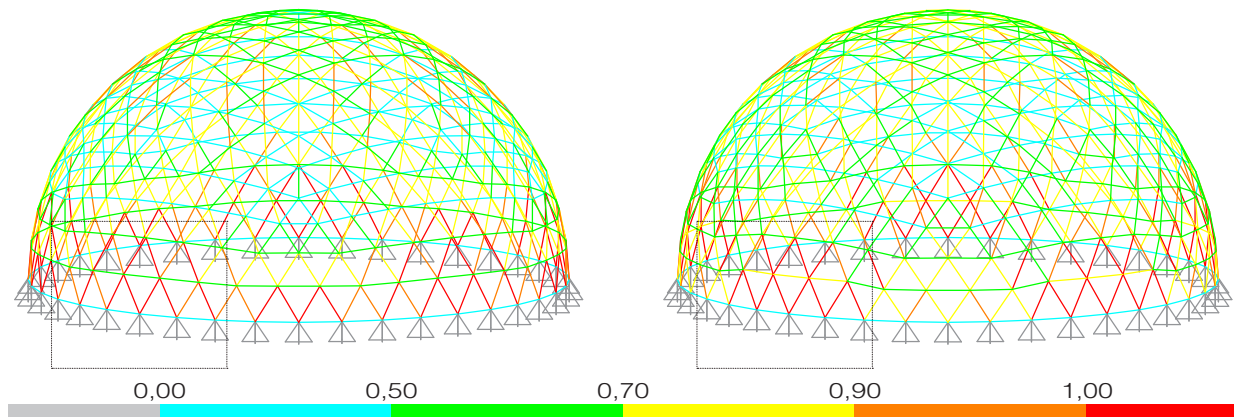
ELS

Deformación en punto más alto:

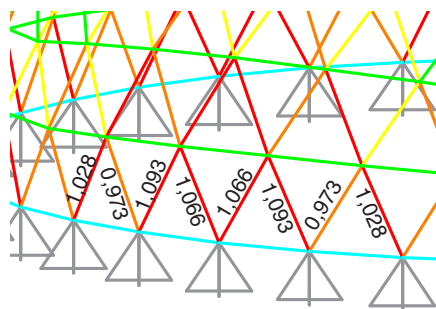
Tradicional: 0,0089 m

Proyección por pasos: 0,0093 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual podemos observar en ambas cúpulas fallan las mismas barras. Observamos las barras que tienen mayor aprovechamiento.



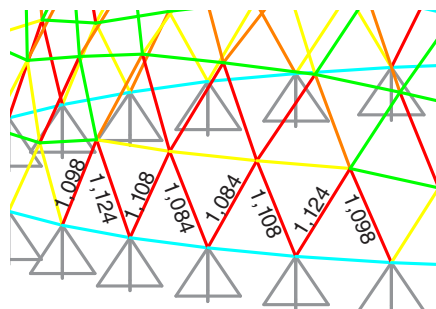
[F06_07]Diagrama aprovechamiento de sección. Multiplicador x7.



Frame ID	1597	Analysis Section	TUBO42 4x4
Design Code	EUROCODE 3:1993	Design Section	TUBO42 4x4

COMBO	STATION	LOC	RATIO	AXL + B-MAJ + B-MIN	MAJ-SHR	MIN-SHR
ELU	1,00	0,957 (C)	0,561	0,096	0,004	0,000
ELU	2,00	1,040 (C)	0,832	0,207	0,024	0,017

[F06_08] Barras con fallo en modelo tradicional.



Frame ID	3073	Analysis Section	TUBO42 4x4
Design Code	EUROCODE 3:1993	Design Section	TUBO42 4x4

COMBO	STATION	LOC	RATIO	AXL + B-MAJ + B-MIN	MAJ-SHR	MIN-SHR
ELU	1,03	0,975 (C)	0,856	0,119	0,003	0,000
ELU	2,06	1,035 (C)	0,825	0,208	0,023	0,018

[F06_9] Barras con fallo en modelo proyección por pasos.

Podemos observar que las barras con el valor de aprovechamiento mayor que 1 son prácticamente las mismas en ambas estructuras, y que en esta caso el valor más alto no se da en barras equivalentes, siendo de nuevo, más desfavorable en el modelo de proyección por pasos.

Frecuencia 9

Perfil: 42,4 mm e=4mm

Peso propio:

Tradicional: 69,708 kN

Proyección por pasos: 69,708 kN

Multiplicadores(x1):

ELS:3,1

ELU:4,3

DEAD

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0004 m

Proyección por pasos: 0,0004 m

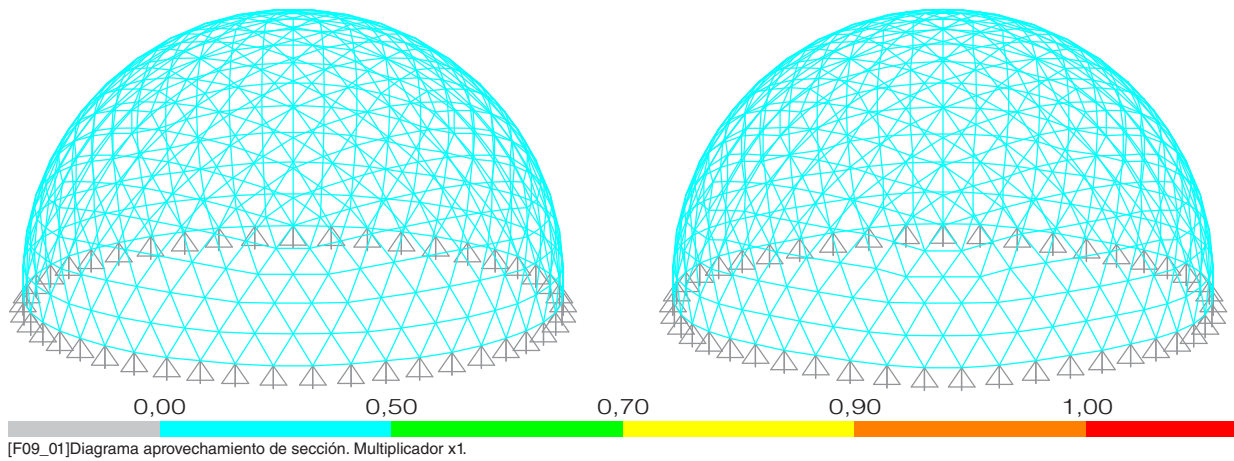
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0013 m

Proyección por pasos: 0,0017 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x2):

ELS:6,2

ELU:8,6

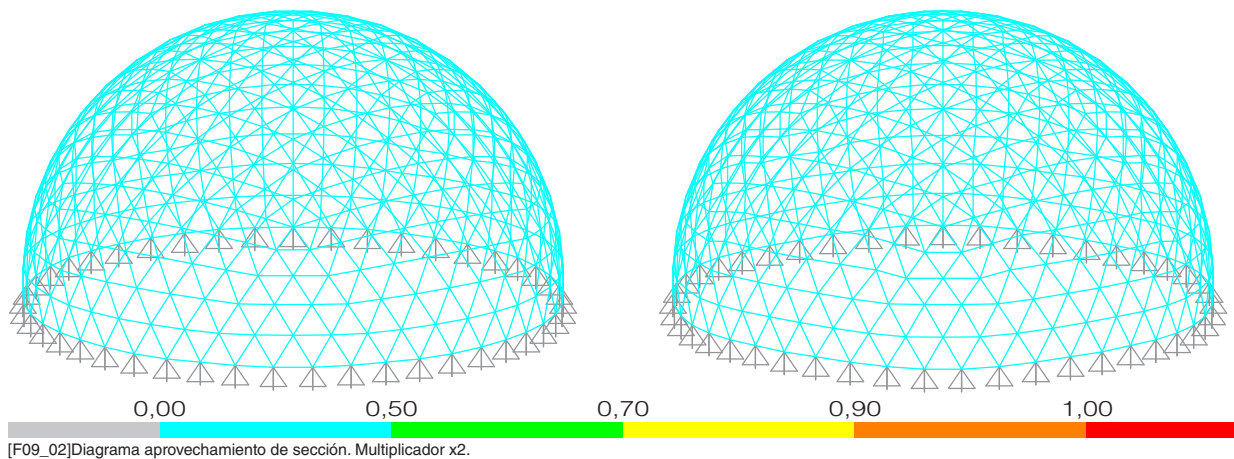
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0025 m

Proyección por pasos: 0,0027 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x3):

ELS:9,3

ELU:12,9

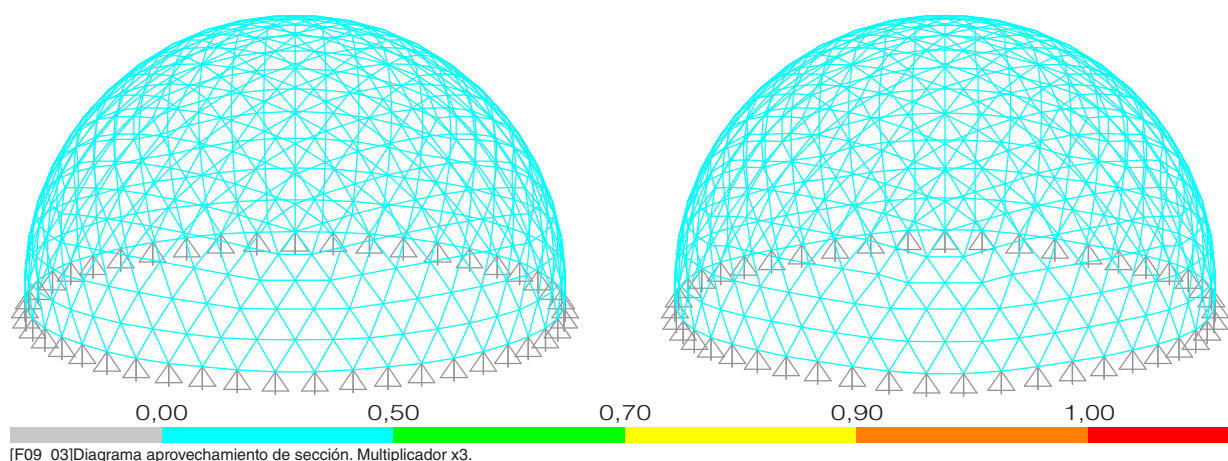
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0038 m

Proyección por pasos: 0,0040 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x4):

ELS:12,4

ELU:17,2

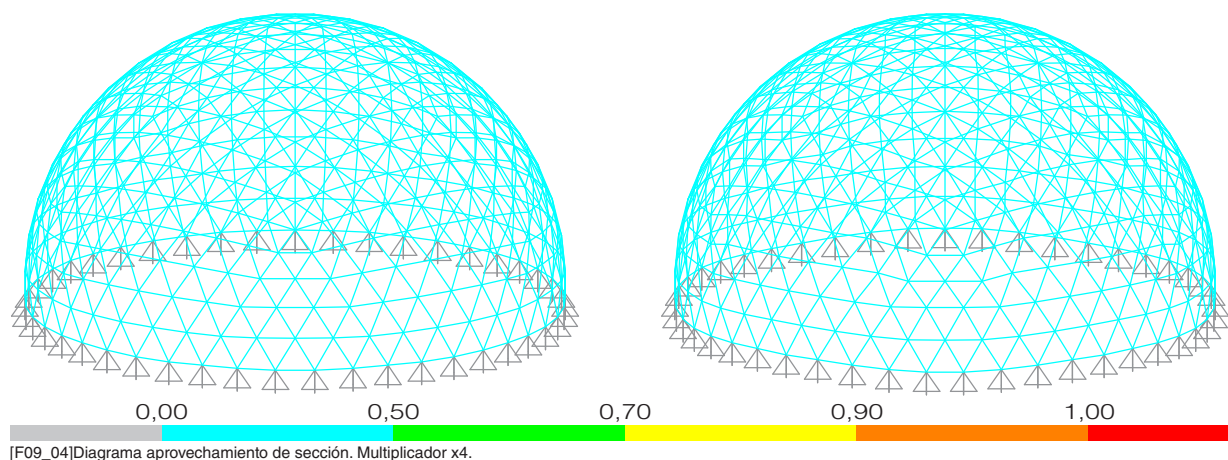
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0051 m

Proyección por pasos: 0,0053 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x5):

ELS: 15,5 ELU: 21,5

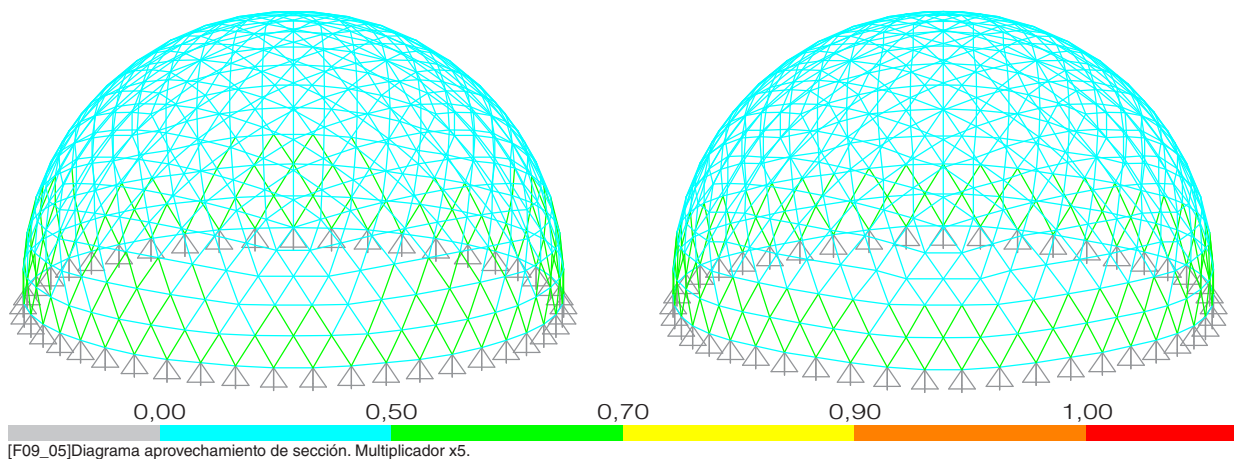
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0038 m

Proyección por pasos: 0,0040 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x6):

ELS: 18,6 ELU: 25,8

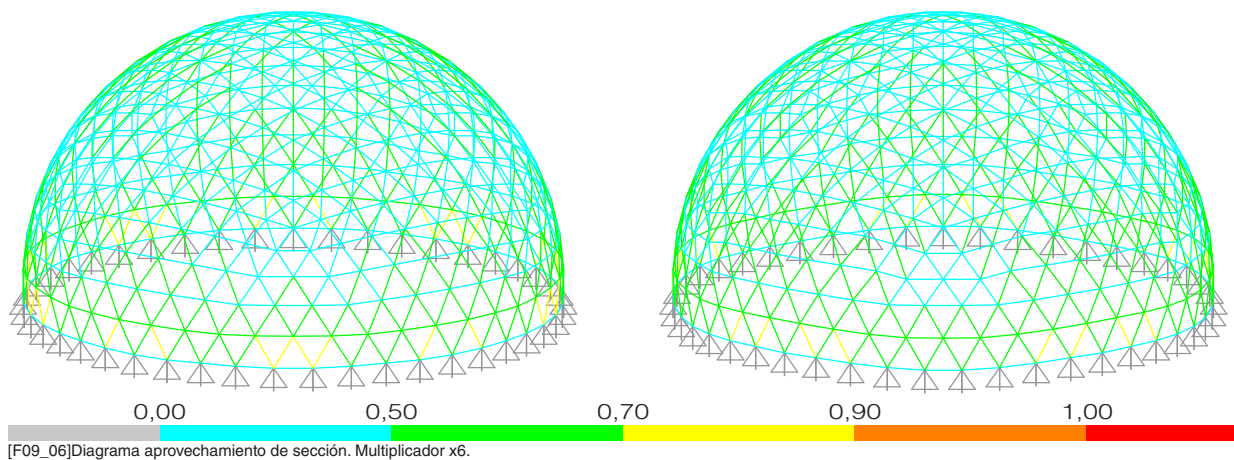
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0051 m

Proyección por pasos: 0,0053 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x7):

ELS:21,7

ELU:30,1

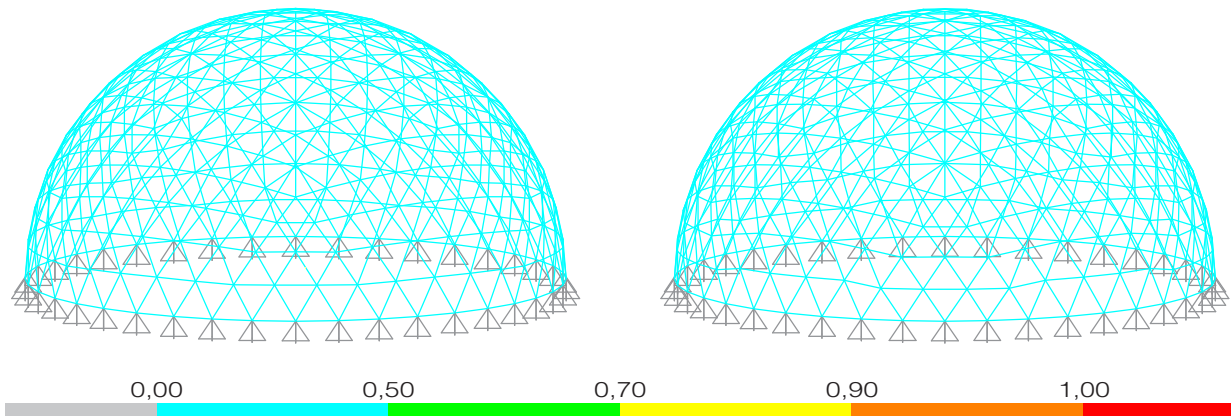
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0038 m

Proyección por pasos: 0,0040 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



[F09_07]Diagrama aprovechamiento de sección. Multiplicador x7.

Multiplicadores(x8):

ELS:24,8

ELU:34,4

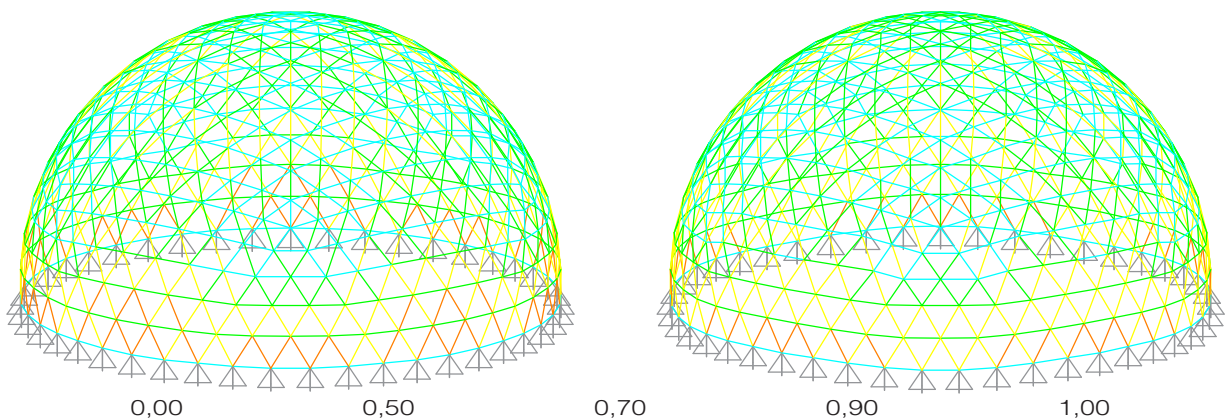
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0051 m

Proyección por pasos: 0,0053 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



[F09_08]Diagrama aprovechamiento de sección. Multiplicador x8.

Multiplicadores(x9):

ELS: 27,9

ELU: 38,7

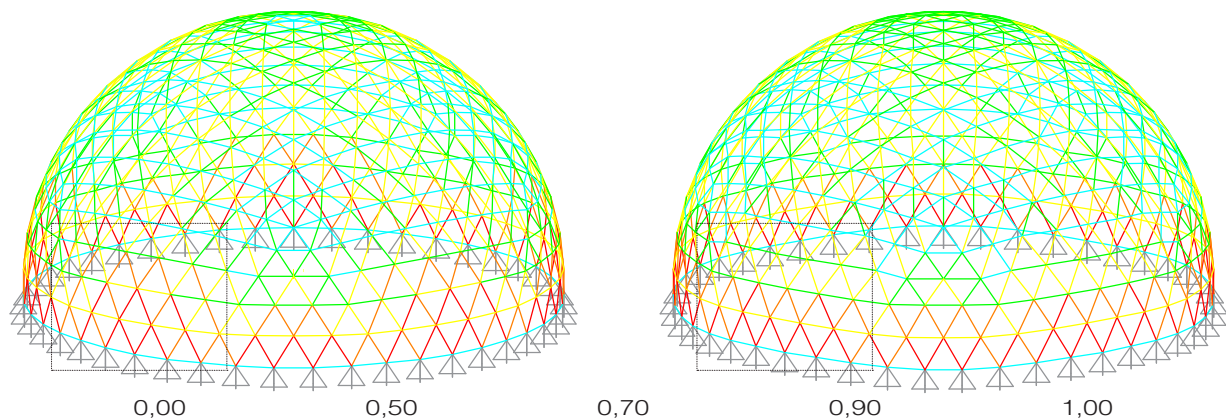
ELS

Deformación en punto más alto:

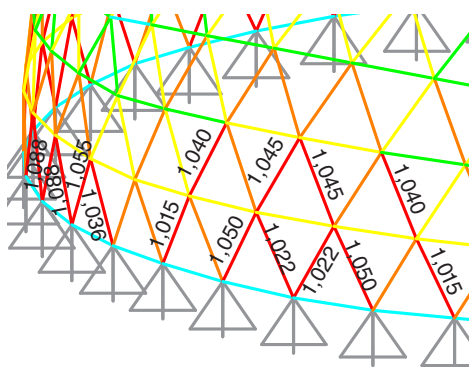
Tradicional: 0,0089 m

Proyección por pasos: 0,0093 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual podemos observar en ambas cúpulas fallan las mismas barras. Observamos las barras que tienen mayor aprovechamiento.

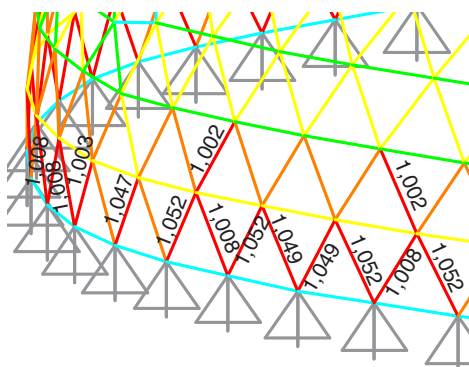


[F09_09]Diagrama aprovechamiento de sección. Multiplicador x9.



[F0_10] Barras con fallo en modelo tradicional.

Frame ID	409	Analysis Section	TUB042.2/4
Design Code	EUROCODE 3:1993	Design Section	TUB042.2/4
COMBO STATION / ---MOMENT INTERACTION CHECK---/ --MAJ-SHR--MIN-SHR--/			
LOC	RATIO	=	AXL + B-MAJ + B-MIN
ELU	0,00	1,038 (C)	= 0,547 + 0,250 + 0,019 0,019 0,003
ELU	0,89	0,939 (C)	= 0,843 + 0,095 + 0,017 0,000 0,003
ELU	1,75	0,993 (C)	= 0,519 + 0,165 + 0,055 0,017 0,003



[F09_11] Barras con fallo en modelo proyección por pasos.

Frame ID	872	Analysis Section	TUB042.2/4
Design Code	EUROCODE 3:1993	Design Section	TUB042.2/4

COMBO	STATION	-----MOMENT INTERACTION CHECK-----//MAJ-SHR--MIN-SHR--				
ELU	LOC	RATIO	AXL	B-MAJ	B-MIN	RATIO
ELU	0,00	1,052 (C)	= 0,240 + 0,211 + 0,018	0,018	0,003	
ELU	0,88	0,903 (C)	= 0,817 + 0,085 + 0,016	0,000	0,003	
ELU	1,75	0,954 (C)	= 0,794 + 0,151 + 0,052	0,016	0,003	

Podemos observar que las barras con el valor de aprovechamiento mayor que 1 son prácticamente las mismas en ambas estructuras, y que en esta caso el valor más alto no se da en barras equivalentes, siendo de nuevo, más desfavorable en el modelo de proyección por pasos.

Frecuencia 10

Perfil: 42,4 mm e=4mm

Peso propio:

Tradicional: 86,827 kN

Proyección por pasos: 86,883 kN

Multiplicadores(x1):

ELS :3,0

ELU:4,1

DEAD

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0004 m

Proyección por pasos: 0,0004 m

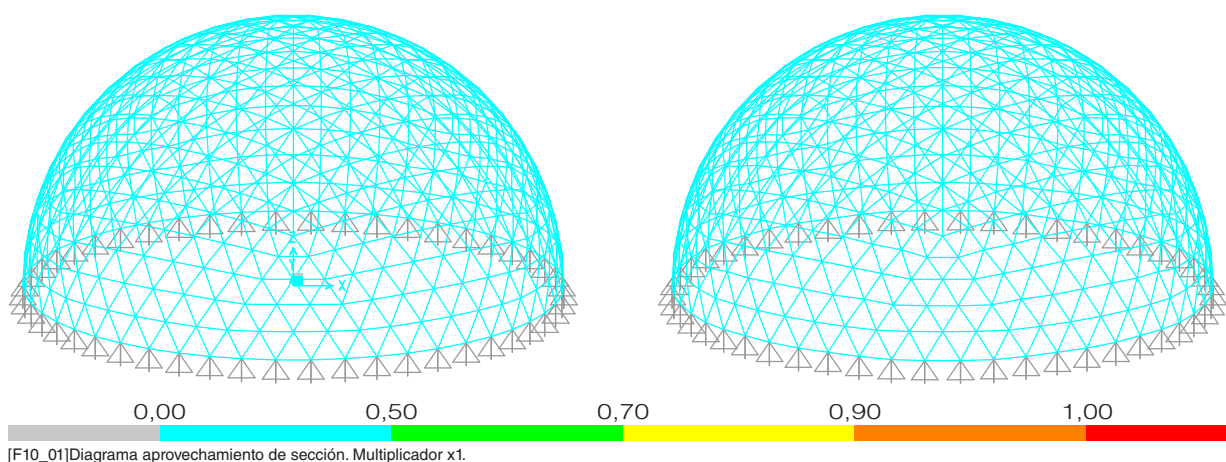
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0011 m

Proyección por pasos: 0,0011 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x2):

ELS: 6,0

ELU: 8,3

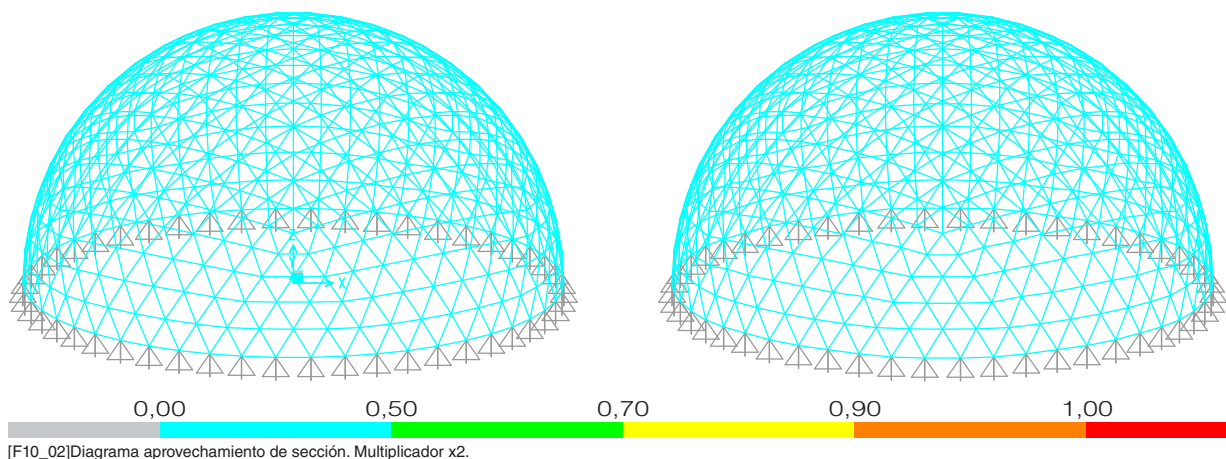
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0022 m

Proyección por pasos: 0,0023 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x3):

ELS: 8,9

ELU: 12,4

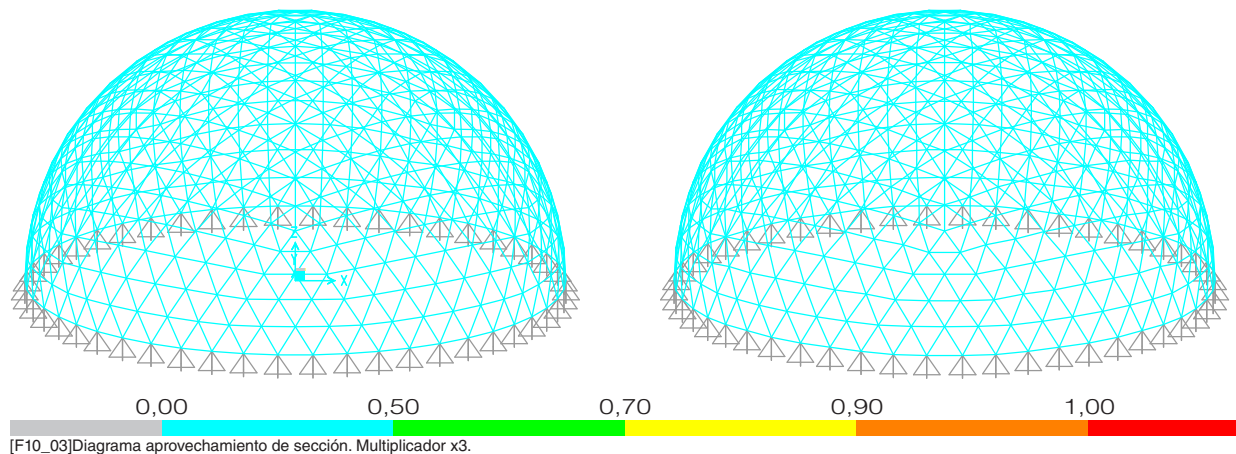
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0033 m

Proyección por pasos: 0,0034 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x4):

ELS: 11,9

ELU: 16,6

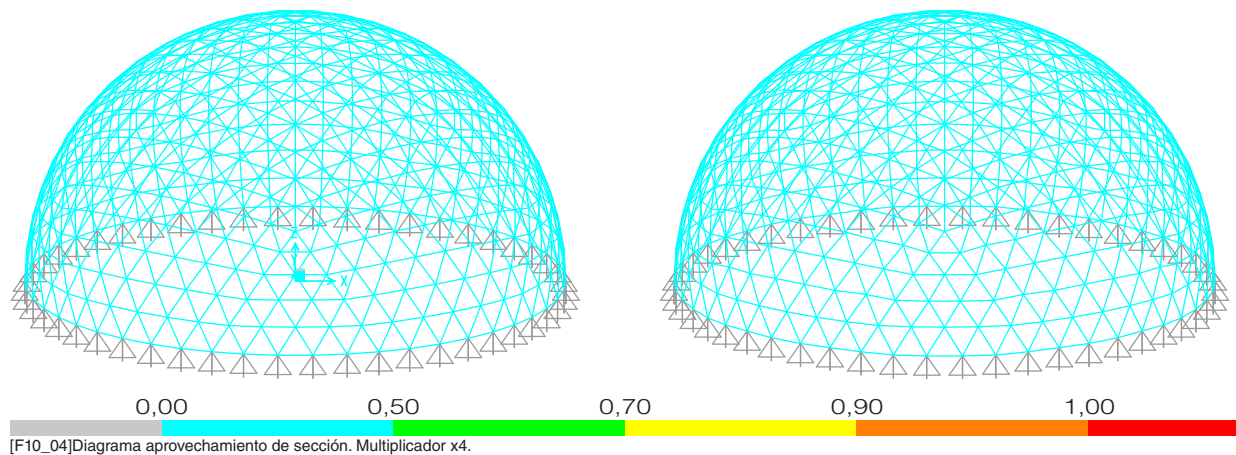
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0044 m

Proyección por pasos: 0,0045 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x5):

ELS: 14,9

ELU: 20,7

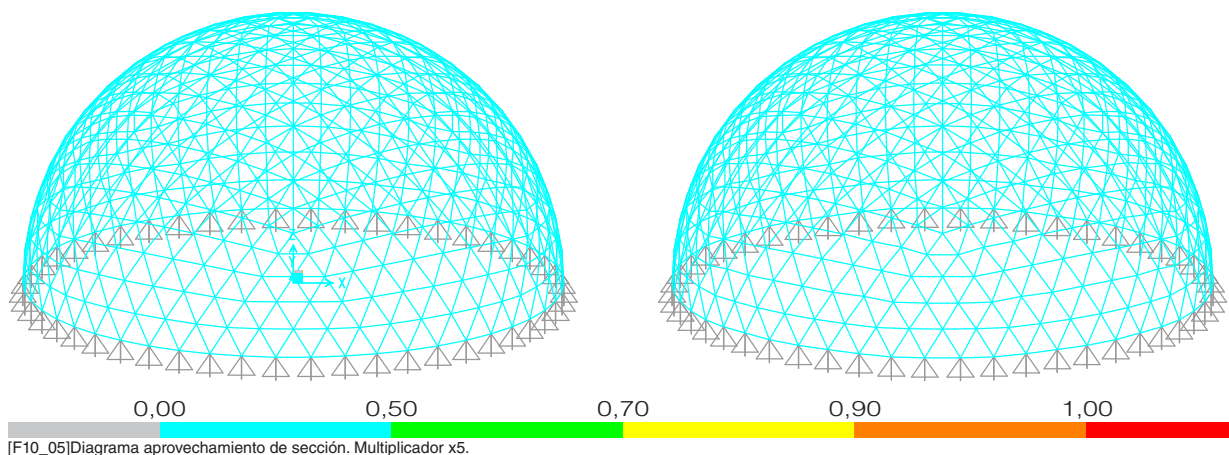
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0064 m

Proyección por pasos: 0,0066 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x6):

ELS: 17,9

ELU: 24,9

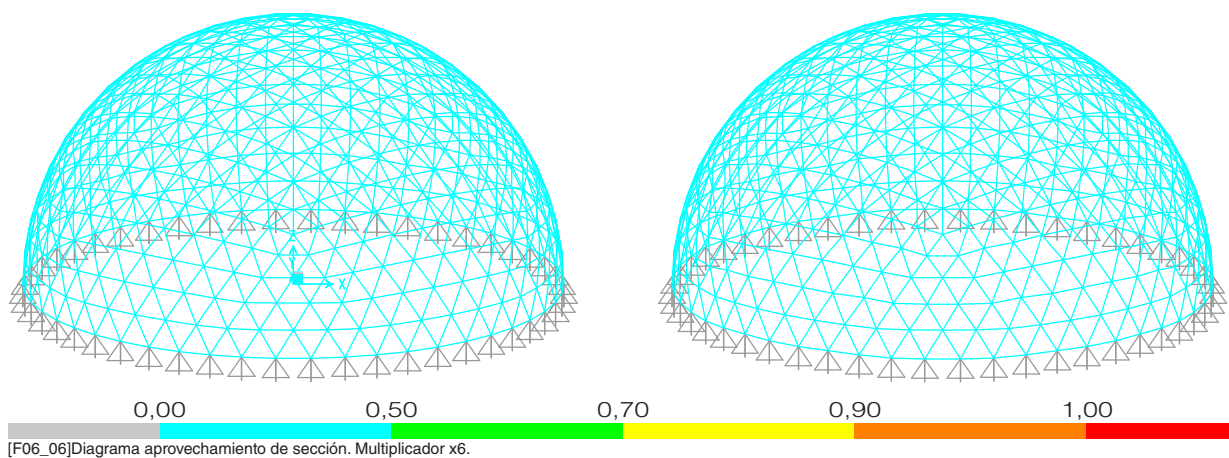
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0067 m

Proyección por pasos: 0,0068 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x7):

ELS:20,8

ELU:29,0

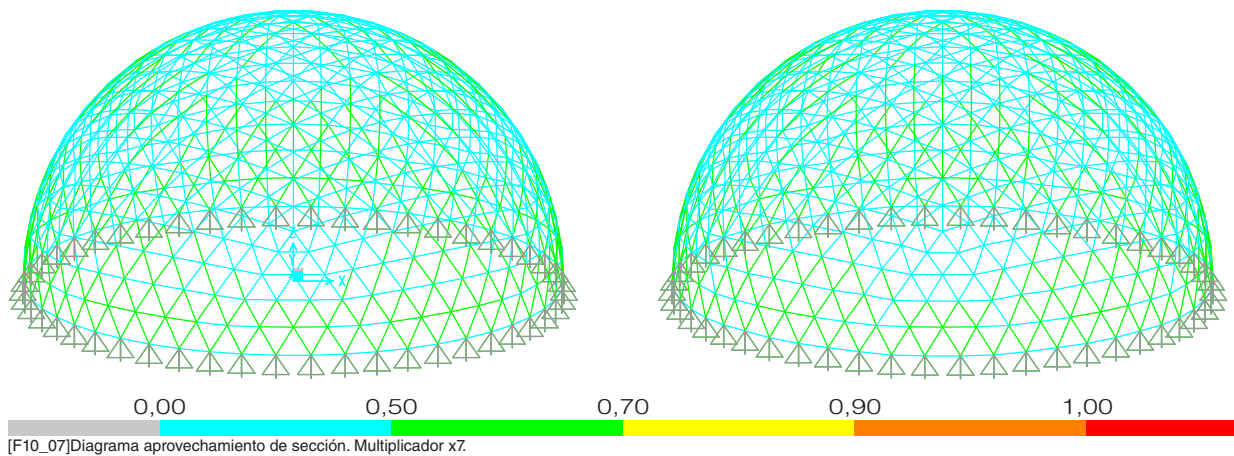
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0064 m

Proyección por pasos: 0,0066 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x8):

ELS:23,8

ELU:33,2

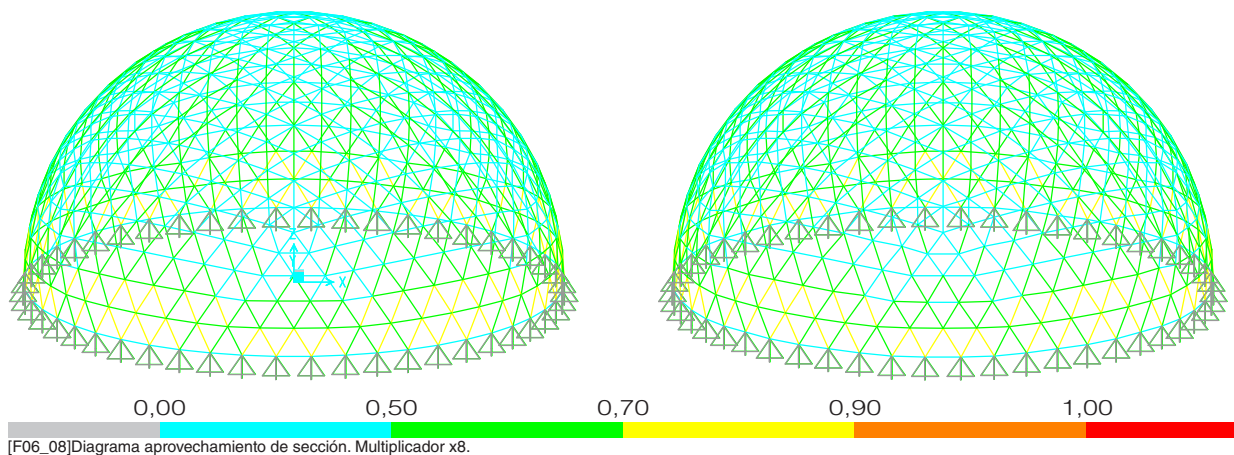
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0089 m

Proyección por pasos: 0,0091 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x9):

ELS:26,8

ELU:37,3

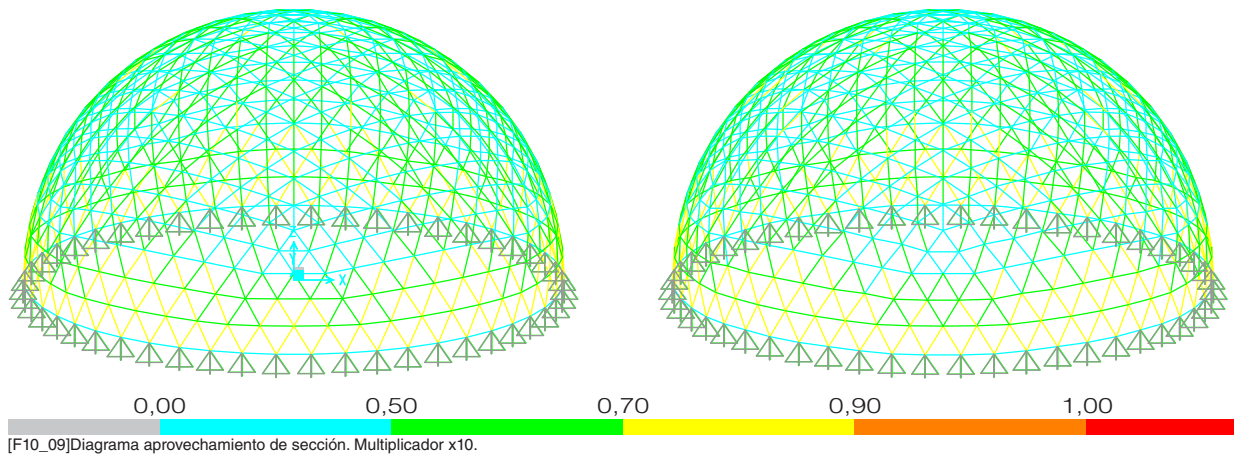
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0100 m

Proyección por pasos: 0,0102 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x10):

ELS:29,8

ELU:41,5

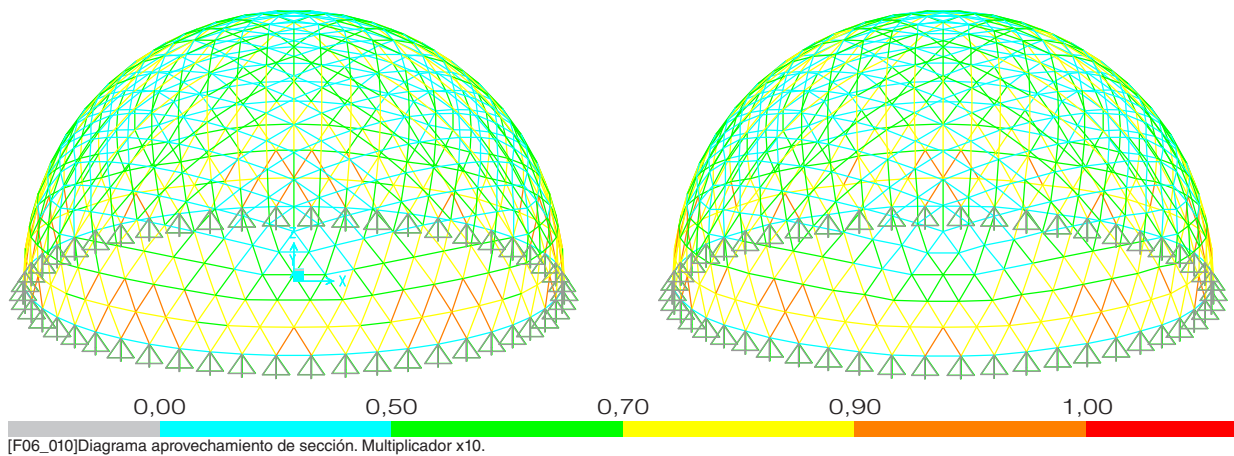
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0111 m

Proyección por pasos: 0,0113 m

Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual observamos que todas las barras funcionarían correctamente.



Multiplicadores(x11):

ELS:32,8

ELU:45,6

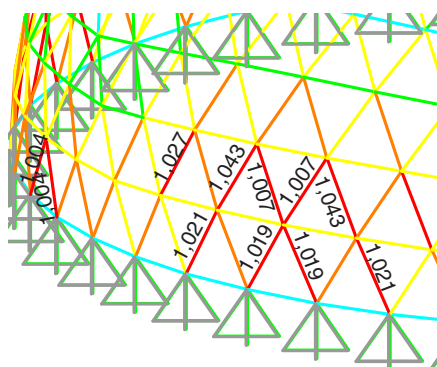
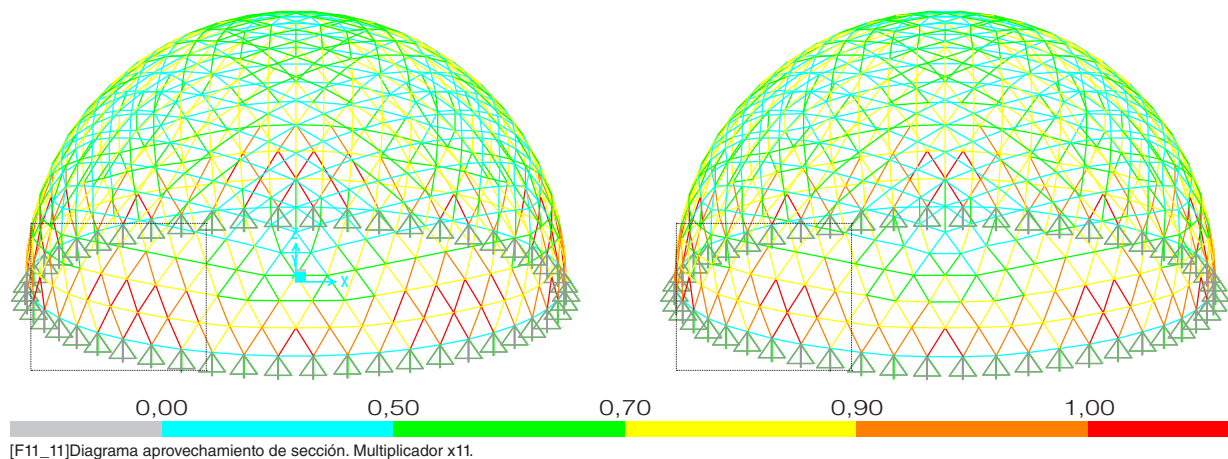
ELS

Deformación en punto más alto:

Tradicional: 0,0122 m

Proyección por pasos: 0,0125 m

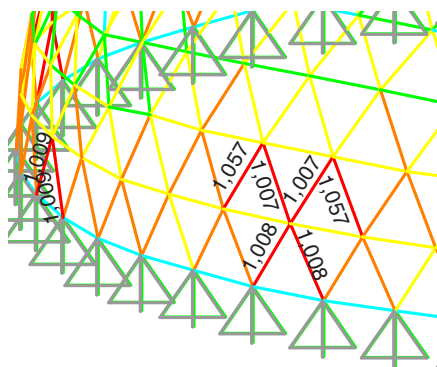
Al comprobar el aprovechamiento de la sección, obtenemos el siguiente diagrama, en el cual podemos observar en ambas cúpulas fallan las mismas barras. Observamos las barras que tienen mayor aprovechamiento.



[F10_12] Barras con fallo en modelo tradicional.

Frame ID	1597	Analysis Section	TUB042 4x4
Design Code	EUROCODE 3:1993	Design Section	TUB042 4x4

COMBO	STATION	LOC	RATIO	AXL + B-MAJ + B-MIN	MAJ-SHR	MIN-SHR
ELU	1,00	0,957 (C)	0,561	0,096	0,004	0,000
ELU	2,00	1,040 (C)	0,832	0,207	0,024	0,017



[F10_13] Barras con fallo en modelo proyección por pasos.

Frame ID	3073	Analysis Section	TUB042 4x4
Design Code	EUROCODE 3:1993	Design Section	TUB042 4x4

COMBO	STATION	LOC	RATIO	AXL + B-MAJ + B-MIN	MAJ-SHR	MIN-SHR
ELU	0,00	1,114 (C)	0,526	0,235	0,013	0,003
ELU	1,03	0,975 (C)	0,856	0,119	0,003	0,000
ELU	2,06	1,035 (C)	0,825	0,208	0,023	0,018

Podemos observar que las barras con el valor de aprovechamiento mayor que 1 son prácticamente las mismas en ambas estructuras, y que en esta caso el valor más alto no se da en barras equivalentes, siendo de nuevo, más desfavorable en el modelo de proyección por pasos.

**FUNCIONAMIENTO ESTRUCTURAL
DE LAS CÚPULAS GEODÉSICAS.**
ESTUDIO COMPARATIVO ESTRUCTURAL DE LAS CÚPULAS GEODÉSICAS
TRADICIONALES Y LAS DE PROYECCIÓN POR PASOS.

CURSO 2016-2017
AUTORA: TATIANA FERRER SARMIENTO.
TUTOR: JOSÉ SANCHEZ PEREZ
GRADO EN FUNDAMENTOS ARQUITECTÓNICOS.