



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos,
Canales y Puertos

Proyecto de definición y diseño de un sistema para la
estandarización e industrialización de domos geodésicos
para edificaciones. Aplicación práctica en Picasent
(Valencia)

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

AUTOR/A: Esquer Roch, Ivan Francisco

Tutor/a: Sánchez Carratalá, Carlos Rafael

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIERÍA DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).

Presentado por

ESQUER ROCH, IVÁN FRANCISCO

Para la obtención del

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Curso: 2021/2022

Fecha: 05/09/2022

Tutor: CARLOS R. SÁNCHEZ CARRATALÁ



AGRADECIMIENTOS

Valoro en gran medida haber tenido la oportunidad de estudiar el Máster de Caminos, Canales y Puertos en la Universidad Politécnica de Valencia, que sin duda me ha traído unas vivencias inolvidables que me han hecho crecer como ingeniero y mucho más como persona.

En el transcurso de esta etapa he conocido a personas que han marcado muchísimo en el desarrollo de este proyecto y en mi vida.

Agradezco a Nuño y Silwya, por darme a conocer el mundo de las construcciones geodésicas y por las aventuras que están por llegar. A mis compañeros de máster, por estar siempre unidos dentro y fuera de clase. A mi pareja por darme la motivación que necesitaba. Y sobre todo a mis padres por darme la capacidad de poder hacerlo todo.

ÍNDICE PROYECTO:

DOCUMENTO Nº 1. MEMORIA Y ANEJOS

MEMORIA DESCRIPTIVA

ANEJO Nº1. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

ANEJO Nº2. MÉTODOS Y ANÁLISIS DE SUBDIVISIÓN DE ESFERAS

ANEJO Nº3. PROPUESTA DE MODELOS ESTANDARIZADOS

ANEJO Nº4. DISEÑO ARQUITECTÓNICO

ANEJO Nº5. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA

ANEJO Nº6. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

ANEJO Nº7. DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL

ANEJO Nº8. CÁLCULO DE UNIONES

ANEJO Nº9. PLAN DE OBRA

DOCUMENTO Nº 2. PLANOS

00.GENERALES

00.01 ÍNDICE

00.02. SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO

00.03. LOCALIZACIÓN DE LA PARCELA CATASTRAL

00.04. PLANTA GENERAL DE ACTUACIÓN

00.05 REPLANTEO

01. DOMO 1 C1/V4/10M

01.01. ESTADO PROYECTADO

01.02. ESTRUCTURA

01.03. MONTAJE ESTRUCTURA

01.04. MONTAJE DE TRIÁNGULOS

01.05. FABRICACIÓN ESTRUCTURA

01.06. FABRICACIÓN PUERTA

01.07. FABRICACIÓN TABLERO

01.08. UNIONES

01.09. CIMENTACIÓN

02. DOMO 2 C1/V2/6M

02.01. ESTADO PROYECTADO

02.02. ESTRUCTURA

02.03. MONTAJE ESTRUCTURA

02.04. MONTAJE DE TRIÁNGULOS

02.05. FABRICACIÓN ESTRUCTURA

02.06. FABRICACIÓN PUERTA

02.07. FABRICACIÓN TABLERO

02.08. UNIONES

02.09. CIMENTACIÓN

03. DOMO 3 C2/V2/8M

03.01. ESTADO PROYECTADO

03.02. ESTRUCTURA

03.03. MONTAJE ESTRUCTURA

03.04. MONTAJE DE TRIÁNGULOS

03.05. FABRICACIÓN ESTRUCTURA

03.06. FABRICACIÓN PUERTA

03.07. FABRICACIÓN TABLERO

03.08. UNIONES

03.09. CIMENTACIÓN

DOCUMENTO Nº 3. PRESUPUESTO

1. MEDICIONES
2. CUADRO DE PRECIOS Nº 1
3. PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL.
4. PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN

MEMORIA DESCRIPTIVA

DENOMINACIÓN	TITULACIÓN	MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
	PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).	
	CENTRO EDUCATIVO	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.

ÍNDICE

1. ANTECEDENTES	4
2. OBJETIVOS DEL PROYECTO	4
3. RESUMEN DEL PROYECTO	4
4. EMPLAZAMIENTO DE LA APLICACIÓN PRÁCTICA	5
5. DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS PROYECTADAS	5
6. REVISIÓN DE ESTADO DEL ARTE	7
7. MÉTODOS Y ANÁLISIS DE SUBDIVISIÓN DE ESFERAS	7
8. PROPUESTA DE MODELOS ESTANDARIZADOS	8
9. ESTUDIOS PREVIOS	9
9.1. COMPATIBILIDAD URBANÍSTICA	9
9.2. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA	9
10. DISEÑO ARQUITECTÓNICO	10
11. ANÁLISIS ESTRUCTURAL	10
12. DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL	11
13. CÁLCULO DE UNIONES	13
14. PLAZO DE EJECUCIÓN DE LAS OBRAS	14
15. PRESUPUESTO DE LAS OBRAS	15
16. DOCUMENTOS QUE INTEGRAN EL PROYECTO	15
17. CONCLUSIONES	16

Listado de ilustraciones

Ilustración 1. Emplazamiento de las obras.....	5
Ilustración 2. Localización de la parcela catastral en el término municipal de Picassent.....	5
Ilustración 3. Estado proyectado de la actuación.....	6
Ilustración 4. Vista 3D del domo geodésico 1.....	6
Ilustración 5. Vista 3D del domo geodésico 2.....	6
Ilustración 6. Vista 3D del domo geodésico 3.....	6
Ilustración 7. Ejemplo de diferentes frecuencias de un domo icosaedro.....	8
Ilustración 8. Modelo estandarizado con base icosaedro de frecuencia V4 con clase de subdivisión 1.....	8
Ilustración 9. Modelo estandarizado de un domo icosaedro de frecuencia V2 con clase de subdivisión 1.....	8
Ilustración 10. Modelo estandarizado de un domo icosaedro de frecuencia V2 con clase de subdivisión 2.....	9
Ilustración 11. Zona de actuación.....	9
Ilustración 12. Localización de la zona de actuación en el mapa geológico de España N°747.....	10
Ilustración 13. Área tributaria asignada (sombreado en amarillo) a cada una de las barras.....	11
Ilustración 14. Esquema de cargas triangulares.....	11
Ilustración 15. Modelo de cimentación en CYPECAD - Domo 1.....	12
Ilustración 16. Modelo de cimentación en CYPECAD - Domo 2.....	12
Ilustración 17. Modelo de cimentación en CYPECAD- Domo 3.....	13
Ilustración 18. Ángulos de corte axial - Good Kharma.....	13
Ilustración 19. Sistema de unión carpintera Good Kharma para domos geodésicos.....	13
Ilustración 20. Unión para el montaje de triángulos.....	13
Ilustración 21. Uniones entre triángulos.....	14
Ilustración 22. Representación del programa de trabajos.....	14

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Cargas por superficie por cada acción.....	10
---	----

1. ANTECEDENTES

El presente proyecto surge del interés personal y profesional del autor en la construcción de domos geodésicos, y en enlazar estas aspiraciones con la redacción del Trabajo de Fin de Máster. El objetivo estratégico de este documento es aumentar los conocimientos sobre las técnicas de diseño y construcción de cúpulas geodésicas, sumando las investigaciones, análisis y conclusiones aquí realizados a la experiencia previa en la construcción de domos. El fin último es el de aplicar los criterios científicos e ingenieriles desarrollados en la formación como Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos para mejorar, tecnificar, optimizar el diseño y la ejecución de domos geodésicos.

Por esta razón, en este documento se encontrará información detallada desde la concepción de la cúpula geodésica y la parte del diseño conceptual, hasta los últimos detalles necesarios para su fabricación y ejecución; analizando cada elemento que configura este tipo de construcciones con el fin de buscar una solución optimizada, preparada para ser industrializada y competitiva dentro del sector de construcciones geodésicas.

2. OBJETIVOS DEL PROYECTO

El presente proyecto, denominado “PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).”, se fija los siguientes objetivos específicos:

- Conocer y analizar la evolución histórica referente al conocimiento y aplicación de este tipo de construcciones geodésicas.
- Conocer y analizar las técnicas actuales de diseño y construcción de domos geodésicos, revisando el estado del arte de las mismas.
- Aplicar y conocer los diferentes sistemas de diseño de domos.
- Analizar y definir cuáles son las técnicas de diseño que ofrecen resultados más óptimos y ventajosos para la industrialización de este tipo de estructuras.
- Crear información gráfica básica de una amplia gama de cúpulas para obtener un catálogo de modelos geodésicos tipo optimizados.

- Escoger 3 modelos optimizados del catálogo creado y proceder a definir la información necesaria para su fabricación y construcción en una aplicación práctica definida en un entorno rural en el municipio de Picassent.
- Estudiar los diferentes sistemas de cerramiento, cimentación, aperturas y cualquier otro elemento arquitectónico.
- Realizar el análisis estructural y dimensionamiento de los diferentes elementos de los modelos seleccionados.
- Realizar la definición geométrica y el cálculo estructural de las uniones.
- Presentar información gráfica, planos 2D, 3D y de detalle necesarios para la definición completa de su geometría, destinados a la fabricación, montaje y construcción.
- Articular un plan de obra realista para la fabricación y montaje de la estructura.
- Realizar un presupuesto de los 3 modelos con el nivel de detalle requerido en un proyecto constructivo.

3. RESUMEN DEL PROYECTO

En resumen, el presente proyecto trata de articular un sistema de estandarización e industrialización de domos geodésicos que podrían ser competitivos dentro del mercado, para ser utilizados como viviendas unifamiliares, o espacios destinados para dar un servicio de hotel, de camping o camping de lujo (glamping); podrían ser utilizados también como salas de exposición de productos en ferias o salas de congreso, salas multiusos para multitud de actividades económicas, e incluso invernaderos o simplemente como elementos decorativos. También se utilizan en zonas con ambientes fríos extremos, ya que por su curvatura los hace más eficientes estructuralmente para resistir el peso de la nieve. En definitiva, el sistema que se plantea puede ser la base para crear configuraciones de cubiertas geodésicas para formar espacios únicos y singulares con multitud de aplicaciones.

Por consiguiente, se pretende fomentar el uso de este tipo de construcciones, demostrando la viabilidad económica que tienen y su cabida dentro del mercado, apostando por soluciones más sostenibles con el medio ambiente, fabricando estructuras con madera y otros materiales naturales, a fin de reducir la huella de carbono sobre el medio con sistemas realmente atractivos por su singularidad y estética, que quedan perfectamente integrados en el entorno.

El proyecto es desarrollado por capítulos y epígrafes clasificados de manera coherente para cumplir los objetivos operativos y estratégicos, desarrollando los siguientes capítulos: revisión del estado del arte, métodos y análisis de subdivisión, propuesta de modelos estandarizados, diseño arquitectónico, geología y geotecnia, análisis estructural, dimensionamiento, cálculo de uniones, plan de obra valorado, planos y presupuesto.

Finalmente, con la entrega de este documento se pretende cumplimentar el requisito de redactar un Trabajo de Fin de Máster para completar el Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, impartido por la Universidad Politécnica de Valencia.

4. EMPLAZAMIENTO DE LA APLICACIÓN PRÁCTICA

El proyecto tiene su aplicación práctica en el término municipal de Picassent en la parcela catastral con la siguiente referencia: 46196A05200122.

A continuación, se muestran unas ilustraciones de la localización de las obras:

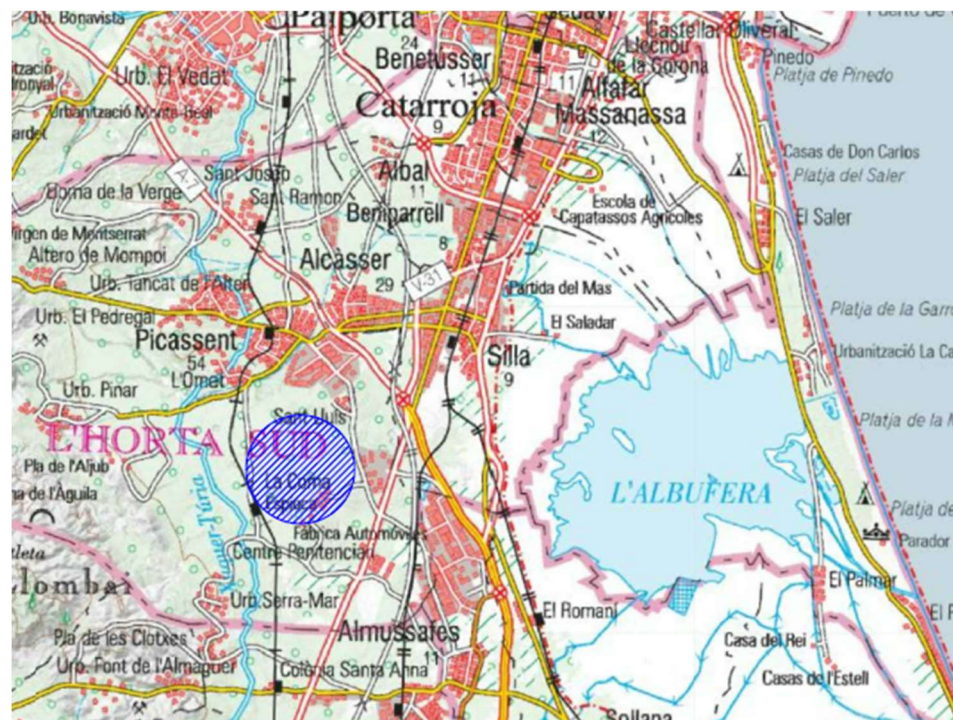


Ilustración 1. Emplazamiento de las obras.



Ilustración 2. Localización de la parcela catastral en el término municipal de Picassent.

5. DESCRIPCIÓN DE LAS OBRAS PROYECTADAS

Tras el desarrollo y el estudio de un sistema de diseño de domos geodésicos estandarizados, se plantea la construcción de tres de ellos, para los cuales se ha realizado un análisis y dimensionamiento estructural, y se ha definido y calculado el tipo de cimentación, así como el sistema de cerramiento de los domos.

El estado proyectado se ha definido para la construcción de tres estructuras geodésicas para la ejecución de un Glamping, a modo de unas viviendas de uso vacacional. El proyecto no incluye, la urbanización ni adecuación del entorno, y solo se centra en la definición de las estructuras geodésicas planteadas, y la creación de un sistema de industrialización que sirva como base para el diseño de nuevas formas geodésicas optimizadas.

A continuación, se expone una planta proyectada donde se ubican las tres cúpulas geodésicas en la zona de actuación. Posteriormente, se definen las características principales de cada una de ellas.

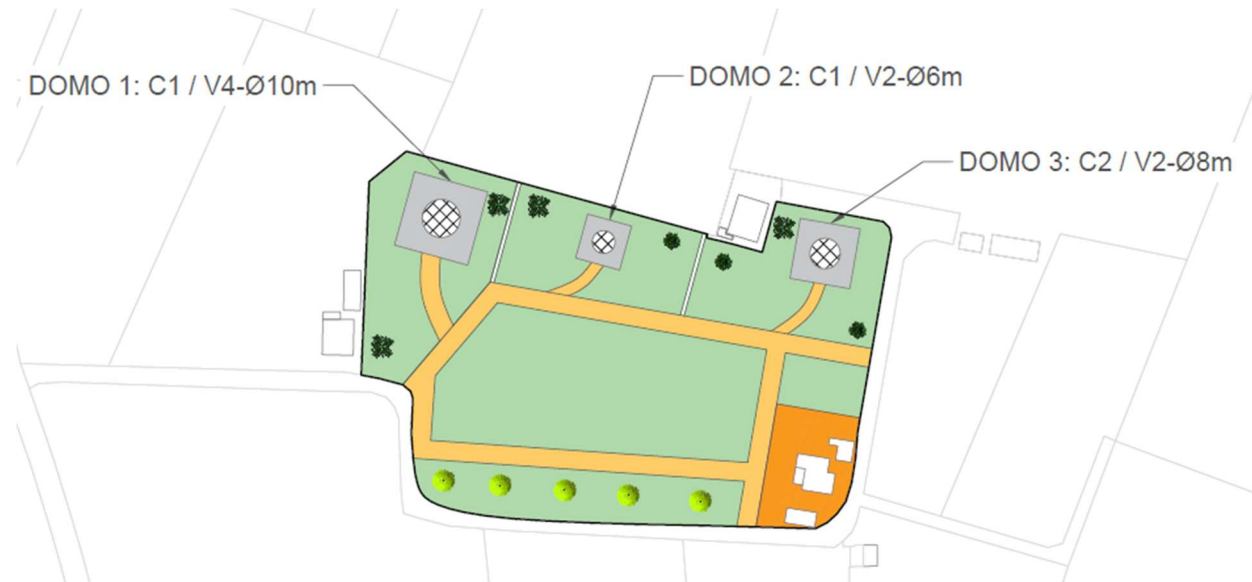


Ilustración 3. Estado proyectado de la actuación.

Los domos que se han desarrollado han sido los siguientes:

- DOMO GEODÉSICO 1 (C1/V4/10m). Definido por las siguientes características:
 - Método de subdivisión aplicado: Clase 1 – Medios Arcos.
 - Frecuencia geodésica: V4
 - Tamaño: 10 metros de diámetro

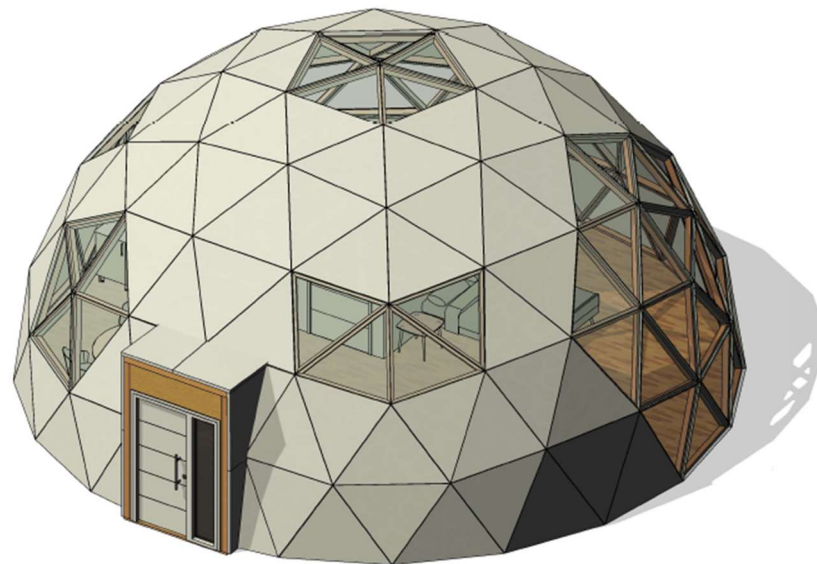


Ilustración 4. Vista 3D del domo geodésico 1.

- DOMO GEODÉSICO 2 (C1/V2/6m). Definido por las siguientes características:
 - Método de subdivisión aplicado: Clase 1 – Medios Arcos.
 - Frecuencia geodésica: V2
 - Tamaño: 6 metros de diámetro

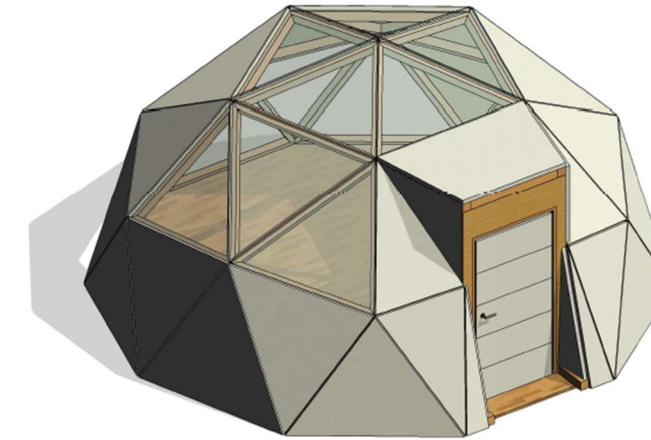


Ilustración 5. Vista 3D del domo geodésico 2.

- DOMO GEODÉSICO 3 (C2/V2/8m). Definido por las siguientes características:
 - Método de subdivisión aplicado: Clase 2 – Triacon.
 - Frecuencia geodésica: V2
 - Tamaño: 8 metros de diámetro

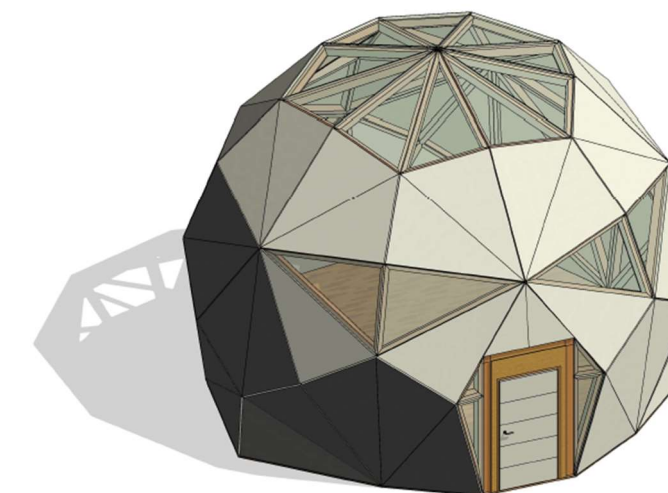


Ilustración 6. Vista 3D del domo geodésico 3.

6. REVISIÓN DE ESTADO DEL ARTE

En el primer anejo del proyecto se hace una revisión de la historia de las cúpulas geodésicas, desde la concepción de su forma hasta el diseño de los domos en la actualidad.

Como resumen, podemos destacar que estas formas geométricas simétricas eran concebidas ya en la antigua civilización griega, en la escuela pitagórica aproximadamente en el 530 a.C., quienes definieron por primera vez los cinco sólidos platónicos. Estos sólidos son la base de la creación del diseño de los domos en la actualidad, ya que la mayoría de ellos toman como base del poliedro principal al icosaedro y al octaedro.

En la actualidad, el uso de las cúpulas geodésicas se expandió en la década de los 50 en Estados Unidos gracias al que es reconocido como el padre de las cúpulas geodésicas, Richard Buckminster Fuller; aunque no fue el primero que construyó este tipo de estructuras, pero sí fue el autor que más apoyó a su desarrollo. Produjo gran cantidad de cúpulas, incluso para cuestiones militares, por ese motivo, muchos autores manifiestan la falta de transferencia del conocimiento de dicha tecnología, quedando los conocimientos en profundo secreto de estado, con el objeto de que la tecnología no pasara a las manos del bando enemigo.

7. MÉTODOS Y ANÁLISIS DE SUBDIVISIÓN DE ESFERAS

El anejo N° 2 representa la base teórica del desarrollo de los métodos de subdivisión de esferas a partir de poliedros simétricos como tetraedro, icosaedro y octaedro, cuyos vértices están contenidos en la esfera que circunscribe las figuras.

En este anejo se han estudiado los siguientes métodos de subdivisión de esferas, en búsqueda del más óptimo para la estandarización de domos geodésicos:

- Método de Clase 1
 - Método de Cuerdas Iguales. La subdivisión se produce sobre el plano del PPT (*Principal Polyhedral Triangle*) del poliedro, generando sobre este plano un mallado regular paralelo a las aristas del poliedro, posteriormente se proyectan los vértices de este mallado sobre la esfera. Es un método sencillo y da buenos resultados.
 - Método de Arcos Iguales (con dos grandes círculos). En este caso, la referencia del mallado son arcos iguales, se trazan arcos tangentes a los vértices del PPT, creando un PPT esférico y subdividiendo estos arcos. Para encontrar vértices en la parte central

del PPT esférico se trazan dos grandes círculos paralelos a 2 de sus aristas, la intersección de estos círculos marcará los vértices sobre la esfera. Es un resultado fácil de programar computacionalmente, pero los resultados no son muy satisfactorios.

- Método de Arcos Iguales (con tres grandes círculos). Del mismo modo que el anterior, se crea un triángulo esférico como PPT, y se trazan grandes círculos paralelos a las aristas en cada uno de sus lados, generando en el interior del triángulo unas “ventanas” que marcan las posibles posiciones de los vértices. Posteriormente, hallando el centroide del triángulo plano de estas ventanas y proyectándolo sobre la esfera se obtiene el vértice de referencia para la estructura. Este método es uno de los más empleados, obteniendo unos resultados significativamente uniformes.
- Medios arcos. Del mismo modo que el anterior se generan un PPT esférico mediante arcos tangentes a los vértices del poliedro, pero esta vez, los puntos de referencia son los puntos medios de estos arcos, no es necesario buscar la intersección de los mismos. Es un método fácil de aplicar y que ofrece los mejores resultados en cuanto a regularidad para la creación de cúpulas geodésicas que tiene la Clase 1, sin embargo, esta técnica es solo aplicable a frecuencias pares, por lo que no es apta para todas las cúpulas.
- Método de clase 2
 - Triacon. Lo característico de este método denominado “Triacon” es que el mallado generado es perpendicular a las aristas del poliedro, y estas aristas del poliedro no se utilizan como líneas de referencia, en su lugar, se crea el Triángulo de Schwarz (LCD, “Least Common Denominator triangle”) a partir de estas, con forma de diamante, que es dividido en 4 triángulos rectángulos. La subdivisión se produce en uno de estos triángulos rectángulos y se va replicando al resto de triángulos; aplicando simetría y rotación se hace llegar a todos los triángulos Schwarz del domo. Este método fue pensado precisamente para industrializar cúpulas geodésicas, los resultados son claramente ventajosos, el número de diferentes longitudes de elementos es muy reducido, el único inconveniente es que el mallado es más denso, se emplea un porcentaje mayor de material estructural. Se analizará más detenidamente para determinar si es el método más viable, pero a priori, es el que tiene más posibilidades.

- Método de clase 3
 - Sesgada. Lo que lo diferencia del resto de métodos, es que sus mallados no son ni paralelos ni perpendiculares a las aristas del poliedro, sino que se cruzan en ángulos oblicuos. Existen muchos tipos de aplicaciones de Clase 3, puesto que se considera “la forma libre” de crear mallados. Consiste en crear mallados sin basarse en las referencias de las aristas del poliedro y proyectarlos sobre la esfera. Los resultados pueden ser muy dispares y asimétricos, no aplicables para cúpulas geodésicas, aunque si pueden ser útiles para otras aplicaciones que requieran subdivisión de esferas y no busquen la simetría como objetivo de diseño.

En este anejo también se ha desarrollado un concepto importante en el diseño de domos geodésicos que se denomina la frecuencia. Este término se refiere al grado de subdivisión con el que se ha creado el domo, es decir, las veces que ha sido subdividido cada triángulo del poliedro principal para la creación del domo.

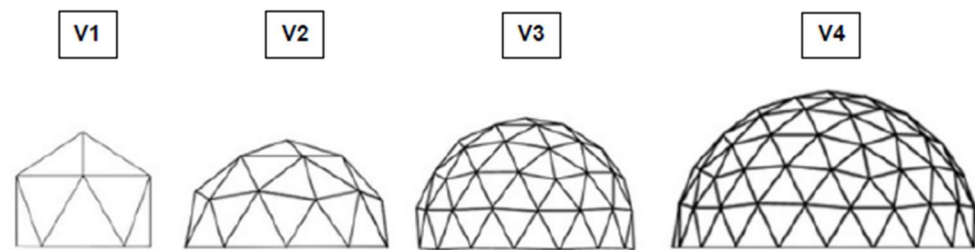


Ilustración 7. Ejemplo de diferentes frecuencias de un domo icosaedro.

Posteriormente al desarrollo de todos los métodos se realiza un análisis estadístico de los datos más importantes para la industrialización de domos, con son el número de piezas de cada domo, su simetría y sobre todo, que tengan el mínimo número de piezas diferentes.

8. PROPUESTA DE MODELOS ESTANDARIZADOS

Este anejo N° 3 propone qué método de subdivisión es más óptimo para cada tipo de frecuencia, sobre la base del análisis estadístico realizado en el anejo anterior. Con todo ello, se propone 11 modelos diferentes de domos geodésicos con el mayor grado de optimización para cada uno de ellos.

Con ello, se obtiene un modelo geométrico de la estructura de barras de cada uno de ellos con radio unitario, que es fácilmente escalable y que sirve como base para la creación y desarrollo de cualquiera de estas 11 posibles estructuras.

Finalmente, se eligen tres de estos modelos y se llevan a cabo en la aplicación práctica del presente proyecto.

Los modelos de geometría básicos de los tres domos seleccionados son los siguientes:

- Domo 1. Clase de subdivisión 1 – Medios Arcos, frecuencia V4.

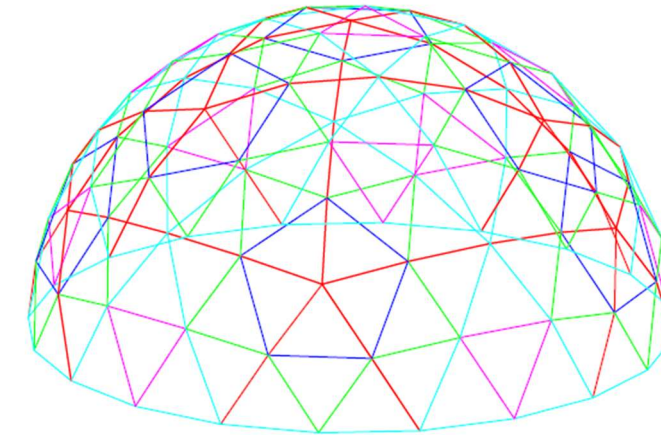


Ilustración 8. Modelo estandarizado con base icosaedro de frecuencia V4 con clase de subdivisión 1.

- Domo 2. Clase de subdivisión 1 – Medios Arcos, frecuencia V2.

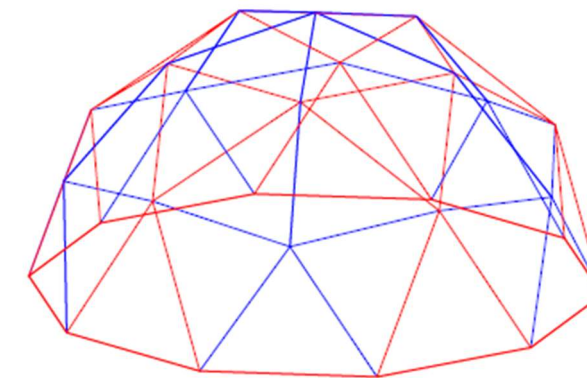


Ilustración 9. Modelo estandarizado de un domo icosaedro de frecuencia V2 con clase de subdivisión 1.

- Domo 3. Clase de subdivisión 2 – Triacon, frecuencia V2.

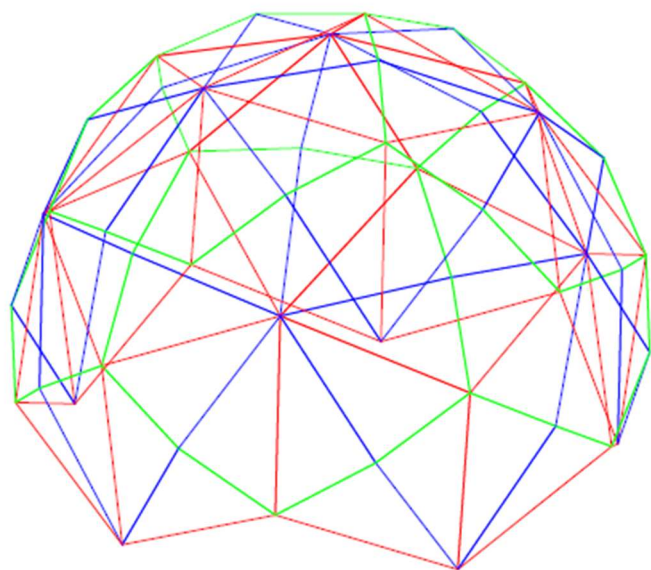


Ilustración 10. Modelo estandarizado de un domo icosaedro de frecuencia V2 con clase de subdivisión 2.

9. ESTUDIOS PREVIOS

9.1. COMPATIBILIDAD URBANÍSTICA

El terreno está clasificado como terreno agrícola con una superficie que supera los 10.000 m² y, por tanto, se puede edificar hasta un 2% de la superficie total, según la normativa urbanística municipal.

No obstante, se deberá de tramitar el cambio de uso puntual, como así lo permite el planeamiento, para poder obtener la licencia de actividad de uso hotelero.

La actuación cuenta con la ejecución de tres domos geodésicos que cuentan con las siguientes superficies:

- Domo geodésico 1: 78,54 m²
- Domo geodésico 2: 28,27 m²
- Domo geodésico 3: 50,26 m²

Por tanto, teniendo en cuenta que la edificación actual no supera los 40 m², la superficie ocupada no supera el límite de la ordenanza municipal en dicha parcela catastral.



Ilustración 11. Zona de actuación.

9.2. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA

En el anejo N^o 5 de geología y geotecnia se ha realizado un estudio de la información geológica existente a partir del Mapa Geológico de España en su Hoja N^o747, proporcionado los datos por el IGME.

Podemos observar según el mapa geológico de España que las obras proyectadas se encuentran principalmente sobre Dolomía cristalina masiva y también, aunque en menor medida, margas y calizas asociadas.

Debido a que se requiere el diseño de la cimentación para las estructuras y a falta de un estudio geotécnico específico de la zona, al tratarse de un estudio académico se han estimado los siguientes datos de resistencia del terreno para el dimensionamiento de la cimentación con el software Cypecad, suponiendo la existencia de un relleno superficial característico de esta zona:

- Resistencia del terreno en situaciones persistentes: 0,20 MPa.
- Resistencia del terreno en situaciones sísmicas y accidentales: 0,30 MPa.

- Módulo de balasto: $K30 = 100.000 \text{ kN/m}^3$ (Para el cálculo de la viga de cimentación se ha hallado el módulo de balasto equivalente a partir del K30 en función de las dimensiones de la viga).

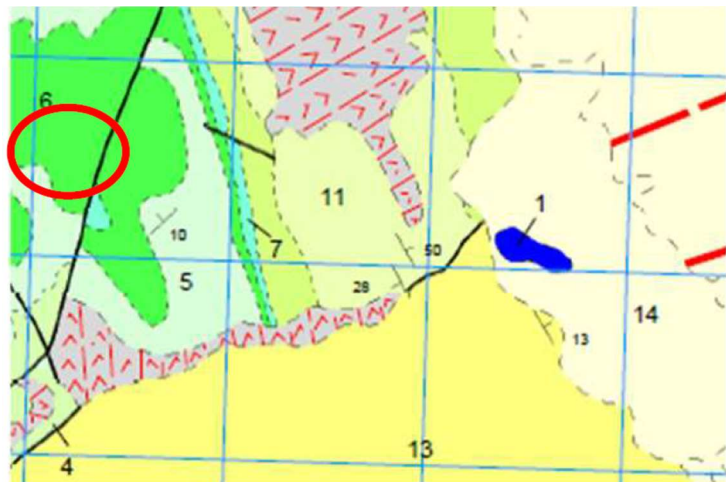


Ilustración 12. Localización de la zona de actuación en el mapa geológico de España N°747.

10. DISEÑO ARQUITECTÓNICO

El anejo N° 4 de diseño arquitectónico tiene como objeto estudiar todos aquellos elementos que sean de importancia crucial en el diseño, con el objeto de incorporar a los domos diseñados todas las cuestiones que los hagan estructuras construibles, y que cumplan ciertos condicionantes de funcionalidad y estéticos para ser atractivos en el mercado de los Glampings. A continuación, se explica brevemente cada uno de los aspectos estudiados:

- Tipos de uniones. Aquí se estudian todos los tipos de uniones que se utilizan en la actualidad para la construcción de domos geodésicos, valorando las ventajas e inconvenientes para cada uno de ellos. Y, por último, definiendo que el sistema de unión a emplear en este proyecto, que será el denominado como sistema *Good Karma*.
- Tipos de cimentación. En este epígrafe se valora los diferentes sistemas de cimentación que se utilizan para la construcción de domos geodésicos. No obstante, en la práctica la solución variará en función del tipo de terreno y de las necesidades estructurales de la construcción.
- Puertas y ventanas. Se desarrolla los condicionantes y métodos constructivos para su colocación, teniendo en cuenta las aperturas dentro de las estructuras geodésicas para la ejecución de la puerta, que pueden ser labores complejas que requieren un correcto diseño y precisión en su ejecución.

- Cerramiento del domo. En este epígrafe se estudian multitud de sistemas para cubrir el domo, con diferentes materiales. Con él, se concluye que el sistema de cerramiento que se va a emplear para los tres domos geodésicos se basa en la colocación de tablero OSB en la cara exterior de la estructura, y también, en su cara interior, rellenando el hueco del triángulo con material aislante como lana de roca. Se remata el exterior, sellando las juntas, impermeabilizando y dando una aplicación con corcho proyectado que proporciona un acabado muy estético y un buen aislamiento térmico.

11. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

El anejo N° 6 de análisis estructural y el cálculo de los esfuerzos de las barras de la estructura, así como las reacciones de los apoyos se han hallado mediante el software SAP2000. A partir de la geometría en CAD obtenida del anejo N°3 "Propuesta de modelos estandarizados" se han escalado al tamaño deseado para cada una de las estructuras, adecuando la apertura de la puerta para cada caso y se ha importado al software de análisis estructural mencionado.

A partir de ahí, se han calculado las cargas a aplicar a la estructura que se pueden resumir en la siguiente tabla:

Tipo de acción	Valor (kN /m2)
CM	0,35
SCU	0,40
Nieve	0,24
Viento Presión	0,84
Viento Succión	-1,26
Tmax	64°C
Tmin	-6°C

Tabla 1. Cargas por superficie por cada acción.

Teniendo en cuenta que estas cargas por superficie están directamente aplicadas sobre los diferentes triángulos de la estructura, se ha hallado el área tributaria para cada uno de los elementos tipo barra de la estructura y para cada una de las acciones, diferenciando diferentes áreas de reparto de cargas en acciones gravitatorias y acción del viento.

Se considera que el área tributaria que será asignada a la barra de medianera entre ambos triángulos (barra marcada en rojo) será la superficie que queda contigua a dicha barra y encerrada entre las medianas de ambos baricentros de cada triángulo. Según la ilustración que se presenta a continuación:

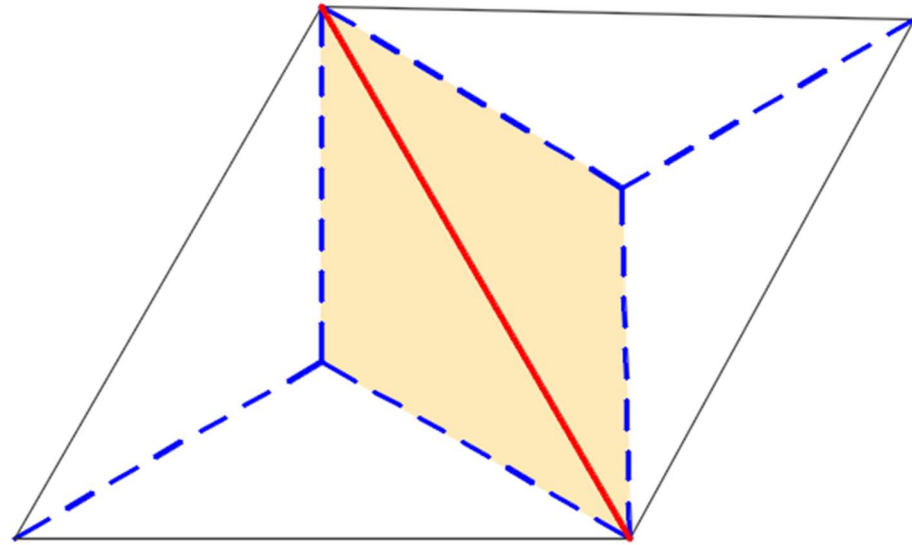


Ilustración 13. Área tributaria asignada (sombreado en amarillo) a cada una de las barras.

Por tanto, dada la configuración del área tributaria como dos áreas triangulares, podemos estimar que la carga por metro lineal a aplicar a la barra tendrá también una configuración triangular. Se muestra el esquema de carga a aplicar a cada una de las barras:

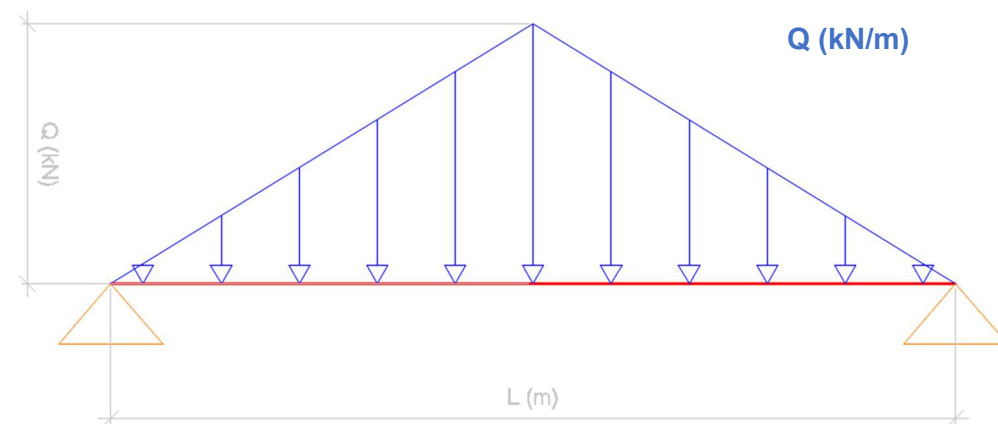


Ilustración 14. Esquema de cargas triangulares.

En el anejo se desarrolla la aplicación y el cálculo de cada una de las cargas triangulares para cada acción y cada una de las barras.

Las combinaciones de acciones ELU y ELS aplicadas para hallar los esfuerzos de cálculo y las flechas de cálculo se encuentran definidas en el anejo N° 6. Análisis estructural. Finalmente, se obtienen los esfuerzos de cálculo para cada uno de los domos geodésicos, con los cuales se realizan las comprobaciones de dimensionamiento.

12. DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL

El presente anejo N° 7 tiene como objeto la verificación de seguridad de los elementos estructurales de madera del presente proyecto en concordancia con las bases de cálculo aplicadas.

El dimensionamiento de la estructura se hará siguiendo los criterios del Código Técnico de la Edificación – Seguridad Estructural Madera.

La madera, al ser un material natural tiene un comportamiento anisótropo según las direcciones de sus esfuerzos, es muchísimo más resistente cuando los esfuerzos son en dirección paralela las fibras que cuando estos son perpendiculares.

En el anejo se desarrollan factores que corrigen la resistencia y se determina que la clase de servicio de las obras proyectadas es la clase 2.

Se ha comprobado que los esfuerzos de cálculo que mayor importancia tienen son los axiales, es decir, los domos geodésicos trabajan fundamentalmente con esfuerzos en dirección de las barras; debido a la gran resistencia que tiene la madera en estas direcciones, la convierten en un material apto y con sentido estructural para este tipo de construcciones.

Es por ello que, aquellas comprobaciones de dimensionamiento que no estén destinadas a verificar la resistencia o estabilidad frente a esfuerzos de axil, no resultan limitantes a la hora de determinar la sección del material necesaria. Es por ello que, la comprobación de estabilidad frente al pandeo de las piezas es la verificación que determinará la sección a utilizar en el conjunto del domo geodésico.

No obstante, también es de especial importancia el estudio de la estabilidad global de la estructura, puesto que la inestabilidad de una de las piezas no conllevaría necesariamente al colapso de la cúpula, pero sí lo determinaría la inestabilidad del conjunto de la estructura.

Es por ello que se ha realizado una verificación de la estabilidad global para comprobar si es necesario el análisis de la estructura en segundo orden, teniendo en cuenta la influencia de la deformación de la estructura. Mediante el uso de SAP2000, se han generado casos de carga tipo Buckling para cada una de las combinaciones de acciones a las que está sometida la estructura, de esta forma el software nos proporciona el coeficiente α_{cr} , que relaciona la carga crítica de pandeo con el esfuerzo de cálculo que produce la inestabilidad global. Si este valor es inferior a 10, significa que el efecto de las deformaciones puede despreciarse, y que el diseño sería válido con un análisis de primer orden en la estructura. Para los tres domos geodésicos se ha hallado que todos ellos son inferiores a este valor y que, por tanto, no son necesarios cálculos de segundo orden.

Los resultados de las comprobaciones de dimensionamiento nos ofrecen los siguientes datos sobre la sección resistente a disponer en la estructura:

- Domo geodésico 1.
 - Sección resistente de la estructura: 90x90 mm.
 - Sección resistente de una pieza de la puerta: 100x90 mm.
- Domo geodésico 2:
 - Sección resistente de la estructura: 100x100 mm
- Domo geodésico 3:
 - Sección resistente de la estructura: 140x140 mm.

Es destacable, que el domo geodésico 1 es el de mayor tamaño y sin embargo, el que menos sección resistente requiere, sin embargo, el entramado y el consumo de material es muchísimo mayor, ya que es una frecuencia 4 del orden del doble de material que para el domo 2 o 3.

También se ha observado, que a mayor frecuencia los domos geodésicos tienen más número de vértices contenidos en la esfera, por tanto, su forma es más esférica, esto tiene como influencia en el que el comportamiento estructural está más centrado en esfuerzos axiales. Cuanto menos esférico es el domo, los esfuerzos de flector y cortante ganan peso en el dimensionamiento.

Por otro lado, en este anejo también se han dimensionado las cimentaciones de cada uno de los domos geodésicos. El cálculo de la cimentación se ha realizado con el software Cypecad por su fácil manejo y su rápida salida de resultados. A partir de las reacciones obtenidas en el análisis estructural con SAP2000 se han exportado estos datos a Cypecad, donde se han realizado el cálculo de la cimentación con el Código Estructural.

Todas las cimentaciones son de tipo viga corrida apoyada directamente sobre el terreno y recorriendo el perímetro de la estructura. A continuación, se muestran los modelos de cálculo de Cypecad para cada uno de los domos.

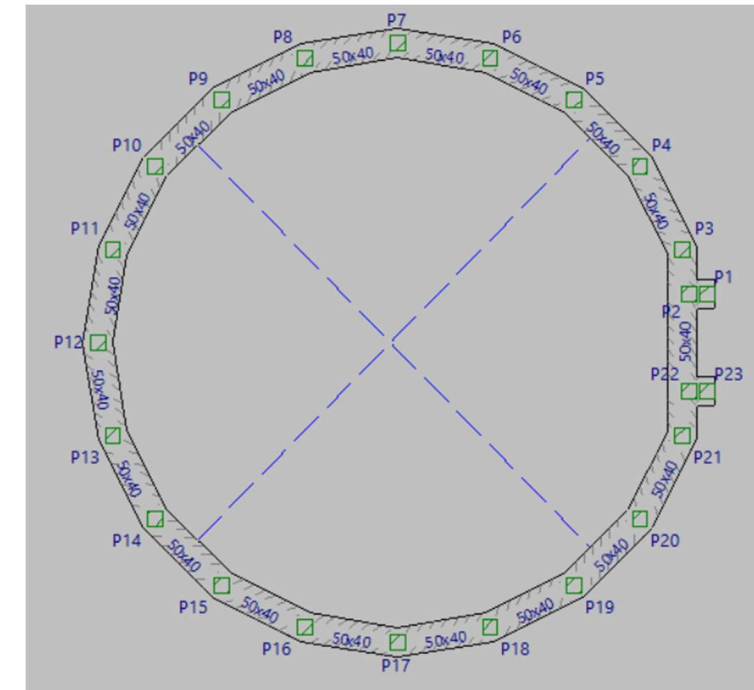


Ilustración 15. Modelo de cimentación en CYPECAD - Domo 1.

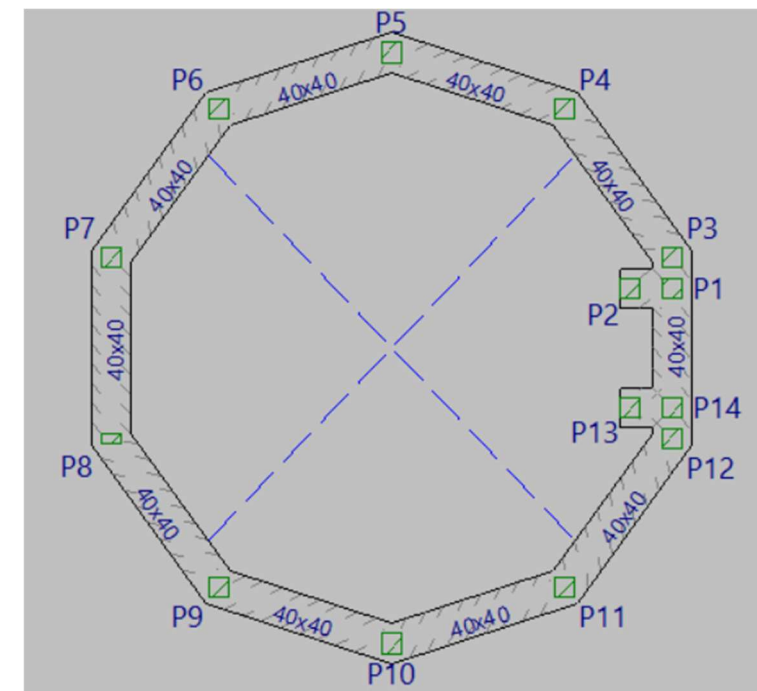


Ilustración 16. Modelo de cimentación en CYPECAD - Domo 2.

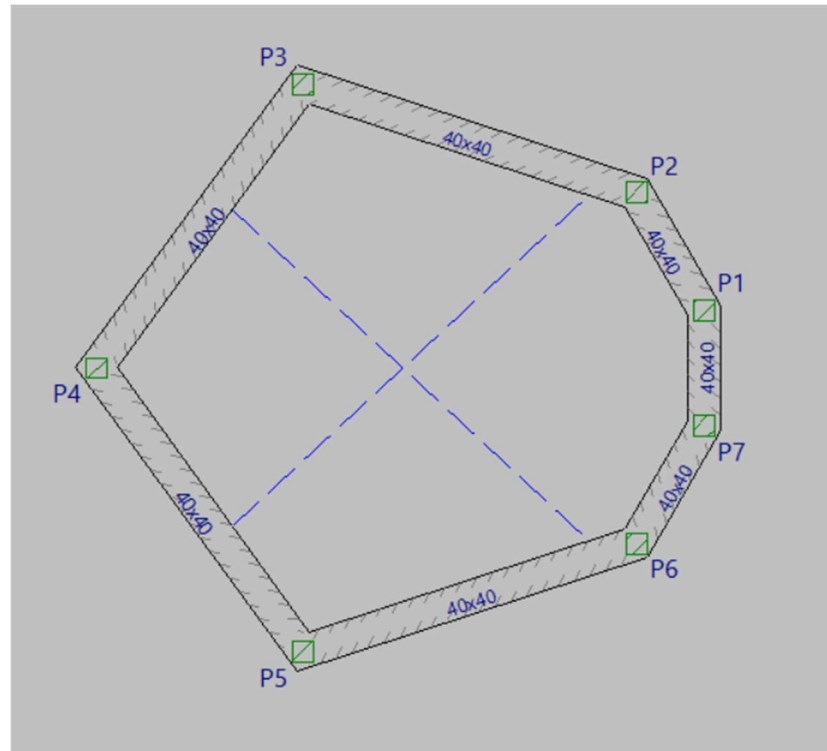


Ilustración 17. Modelo de cimentación en CYPECAD- Domo 3.

13. CÁLCULO DE UNIONES

El anejo N° 8 de cálculo de las uniones tiene dos principales objetivos, la definición de las uniones carpinteras y las uniones mecánicas de las estructuras.

En primer lugar, se ha programado en Excel el cálculo de los cortes en madera de una unión tipo Good Karma para cada uno de los elementos barra que configuran la estructura. Diferenciamos el corte en el ángulo del triángulo y el corte del ángulo axial que atribuye la curvatura a cada domo geodésico.

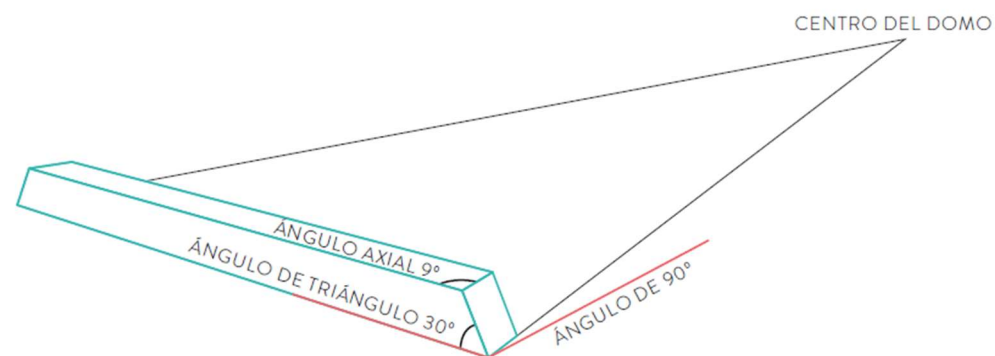


Ilustración 18. Ángulos de corte axial - Good Karma.



Ilustración 19. Sistema de unión carpintera Good Karma para domos geodésicos.

Estos cortes confieren una gran agilidad en el montaje ya que todas las piezas encajan en su conjunto y deben de ir atornillándose para garantizar su estabilidad.

El segundo objetivo del anejo es el dimensionamiento de la tornillería empleada para el montaje del domo. Se diferencia entre los tornillos empleados para el montaje de triángulos y la utilizada para la unión entre triángulos. A continuación, se muestra una representación gráfica de cada uno de los tipos de uniones mecánicas.

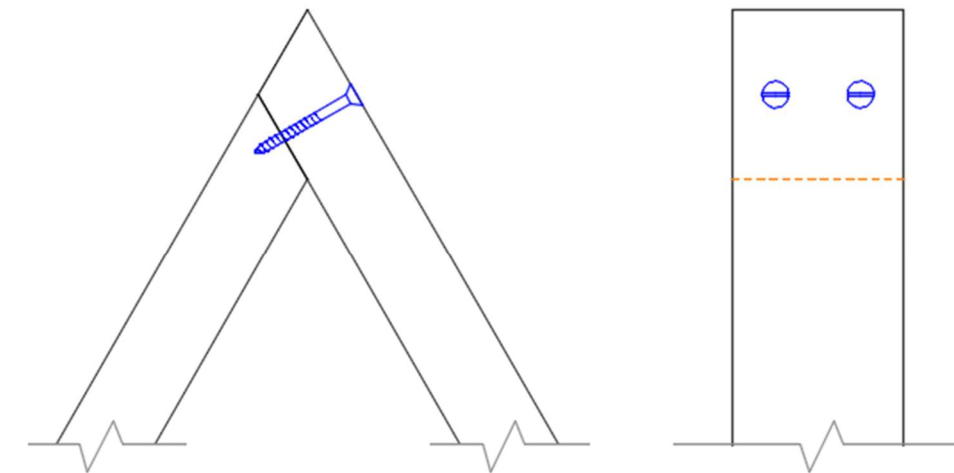


Ilustración 20. Unión para el montaje de triángulos.

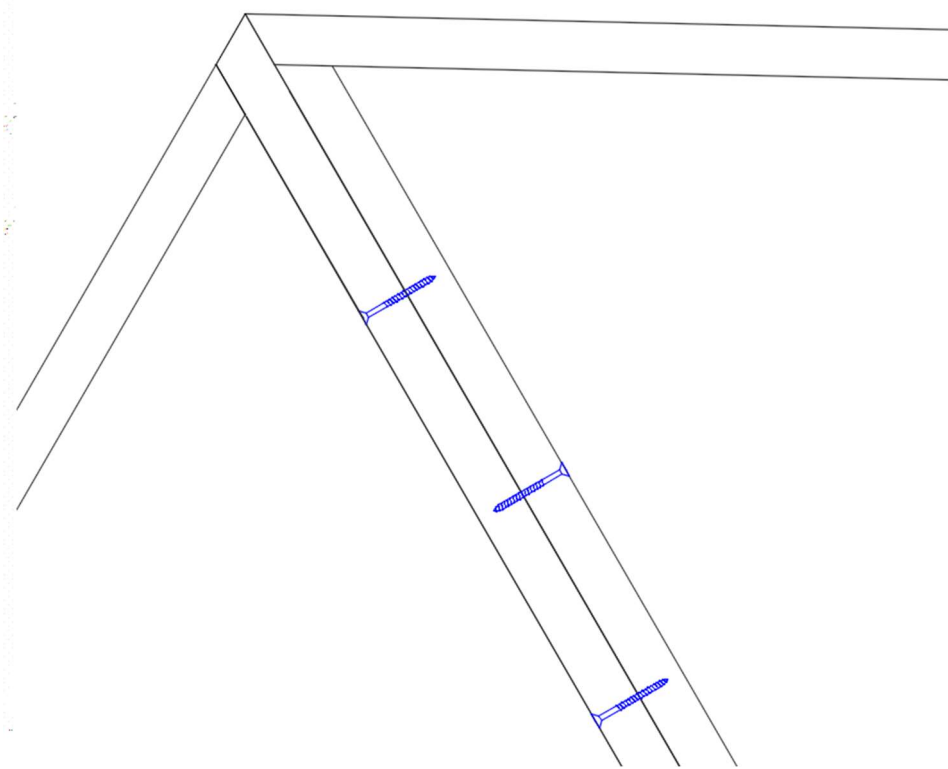


Ilustración 21. Uniones entre triángulos.

Se destaca que principalmente los tirafondos dimensionados para el montaje de triángulos se han dimensionado según las comprobaciones de carga axial, y las uniones entre triángulos frente a las comprobaciones de resistencia al corte, según los esfuerzos de cálculo de la estructura.

Finalmente, se definen los resultados de la tornillería a emplear para cada domo:

- Domo geodésico 1:
 - Montaje de triángulos: 2 tirafondos de 5 mm de diámetro y longitud 8 cm.
 - Uniones entre triángulos. 8 tirafondos de 5 mm de diámetro y longitud 8 cm.
- Domo geodésico 2:
 - Montaje de triángulos: 2 tirafondos de 8 mm de diámetro y longitud 7 cm.
 - Uniones entre triángulos. 8 tirafondos de 6 mm de diámetro y longitud 8 cm.
- Domo geodésico 3:
 - Montaje de triángulos: 2 tirafondos de 8 mm de diámetro y longitud 7 cm.

- Uniones entre triángulos. 6 tirafondos de 8 mm de diámetro y longitud 8 cm.

14. PLAZO DE EJECUCIÓN DE LAS OBRAS

En el Anejo N°09 se presenta la secuencia de trabajos a ejecutar, así como la duración contemplada de los mismos. Se incluye igualmente en el mismo un diagrama de barras con las principales actividades de la obra, del que se ha obtenido un plazo total para la ejecución de los trabajos que se contemplan dentro de este proyecto suponiendo dos (2) meses de trabajo.

ACTIVIDAD	DURACIÓN (días)	PLAN DE OBRA VALORADO															
		MES 1								MES 2							
		SEM 1	SEM 2	SEM 3	SEM 4	SEM 5	SEM 6	SEM 7	SEM 8	SEM 1	SEM 2	SEM 3	SEM 4	SEM 5	SEM 6	SEM 7	SEM 8
DOMO GEODÉSICO 1 - CUBA/AM	23																
AL. ESTRUCTURA	8																
01.01 FABRICACIÓN ESTRUCTURA	4																
01.02 MONTAJE ESTRUCTURA	4																
RE.DEMARCACIÓN	4																
02.01 MOVIMIENTOS DE TIERRAS	1																
02.02 ENCORRADO, ARMADO Y HOMOGENIZADO	3																
RE.CEPAVIMENTO	16																
03.01 FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DE OSB EXTERIOR	4																
03.02 MANILLADO DE JUNTAS	2																
03.03 COLOCACIÓN DE LANA DE ROCA	2																
03.04 FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DE OSB INTERIOR	4																
03.05 APLICACIÓN DE CORECHO PROTECTADO E IMPERMEABILIZACIÓN	5																
RE.ABOLUTIVIDAD	18																
04.01 EJECUCIÓN DE PUERTA	1																
04.02 COLOCACIÓN DE VENTANAS	2																
04.03 INSTALACIÓN DE PAVIMENTO INTERIOR Y TABIQUERÍA	2																
DOMO GEODÉSICO 2 - CUBA/AM	22																
AL. ESTRUCTURA	8																
01.01 FABRICACIÓN ESTRUCTURA	3																
01.02 MONTAJE ESTRUCTURA	4																
RE.DEMARCACIÓN	5																
02.01 MOVIMIENTOS DE TIERRAS	1																
02.02 ENCORRADO, ARMADO Y HOMOGENIZADO	4																
RE.CEPAVIMENTO	14																
03.01 FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DE OSB EXTERIOR	4																
03.02 MANILLADO DE JUNTAS	2																
03.03 COLOCACIÓN DE LANA DE ROCA	2																
03.04 FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DE OSB INTERIOR	4																
03.05 APLICACIÓN DE CORECHO PROTECTADO E IMPERMEABILIZACIÓN	5																
RE.ABOLUTIVIDAD	17																
04.01 EJECUCIÓN DE PUERTA	1																
04.02 COLOCACIÓN DE VENTANAS	2																
04.03 INSTALACIÓN DE PAVIMENTO INTERIOR Y TABIQUERÍA	2																
DOMO GEODÉSICO 3 - CUBA/AM	24																
AL. ESTRUCTURA	8																
01.01 FABRICACIÓN ESTRUCTURA	3																
01.02 MONTAJE ESTRUCTURA	4																
RE.DEMARCACIÓN	5																
02.01 MOVIMIENTOS DE TIERRAS	1																
02.02 ENCORRADO, ARMADO Y HOMOGENIZADO	4																
RE.CEPAVIMENTO	16																
03.01 FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DE OSB EXTERIOR	4																
03.02 MANILLADO DE JUNTAS	2																
03.03 COLOCACIÓN DE LANA DE ROCA	2																
03.04 FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DE OSB INTERIOR	4																
03.05 APLICACIÓN DE CORECHO PROTECTADO E IMPERMEABILIZACIÓN	5																
RE.ABOLUTIVIDAD	15																
04.01 EJECUCIÓN DE PUERTA	1																
04.02 COLOCACIÓN DE VENTANAS	2																
04.03 INSTALACIÓN DE PAVIMENTO INTERIOR Y TABIQUERÍA	2																
OTROS	40																
GESTIÓN DE RESIDUOS	40																
SEGURIDAD Y SALUD	40																

Ilustración 22. Representación del programa de trabajos.

15. PRESUPUESTO DE LAS OBRAS

En el Documento N°4 "PRESUPUESTO" se incluyen las mediciones y los cuadros de precios aplicados a las mismas para la confección del Presupuesto de Ejecución Material, cuyo resumen se desglosa a continuación:

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL

1 DOMO 1 - C1/V4/10M	63.191,45 €
1.1 ESTRUCTURA GEODÉSICA	10.274,08 €
1.2 CIMENTACIÓN	4.547,75 €
1.3 CERRAMIENTO	19.795,73 €
1.4 ARQUITECTURA	28.573,89 €
2 DOMO 2 - C1/V2/6M	22.601,25 €
2.1 ESTRUCTURA GEODÉSICA	5.328,05 €
2.2 CIMENTACIÓN	2.057,70 €
2.3 CERRAMIENTO	6.422,11 €
2.4 ARQUITECTURA	8.793,39 €
3 DOMO 3 - C2/V2/8M	57.235,58 €
3.1 ESTRUCTURA GEODÉSICA	17.145,61 €
3.2 CIMENTACIÓN	2.159,91 €
3.3 CERRAMIENTO	24.123,69 €
3.4 ARQUITECTURA	13.806,37 €
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	143.028,28 €

Asciende el presente Presupuesto de Ejecución Material a la expresada cantidad de CIENTO CUARENTA Y TRES MIL VEINTIOCHO EUROS CON VEINTIOCHO CÉNTIMOS (143.028,28 €)

PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN

PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL	143.028,28 €
GASTOS GENERALES 13%	18.593,68 €
BENEFICIO INDUSTRIAL 6%	8.581,70 €
SUMA	170.203,66 €
I.V.A. 21%	35.742,77 €
PRESUPUESTO BASE DE LICITACIÓN	205.946,43 €

Asciende el presente Presupuesto Base de Licitación a la expresada cantidad de DOSCIENTOS CINCO MIL NOVECIENTOS CUARENTA Y SEIS EUROS CON CUARENTA Y TRES CÉNTIMOS (205.946,43 €)

16. DOCUMENTOS QUE INTEGRAN EL PROYECTO

A continuación, se exponen los documentos que conforman el presente proyecto:

DOCUMENTO N° 1. MEMORIA Y ANEJOS

- Memoria descriptiva
- Anejo n°1. Revisión del estado del arte.
- Anejo n°2. Métodos y análisis de subdivisión.
- Anejo n°3. Propuesta de modelos estandarizados.
- Anejo n°4. Diseño arquitectónico.
- Anejo n°5. Geología y geotecnia.
- Anejo n°6. Análisis estructural.
- Anejo n°7. Dimensionamiento estructural.
- Anejo n°8. Cálculo de uniones.
- Anejo n°9. Plan de obra.

DOCUMENTO N° 2. PLANOS

- N° 00. Generales.
- N° 01. Domo 1 C1/V4/10m.
- N° 02. Domo 2 C1/V2/6m.
- N° 03. Domo 3 C2/V2/8m.

DOCUMENTO N° 3 PRESUPUESTO

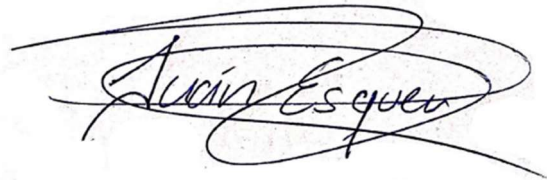
- Mediciones.
- Cuadro de Precios N° 1.
- Presupuesto de ejecución material.
- Presupuesto base de licitación

17. CONCLUSIONES

Considerando que el presente Proyecto ha sido redactado de acuerdo con las Normas Técnicas y Administrativas vigentes, conforme a lo indicado en esta memoria y en los restantes documentos del proyecto, se estima que se encuentran suficientemente definidas las características y soluciones adoptadas, y a un nivel suficiente para cumplir con su finalidad de proyecto.

Se han cumplido con los objetivos de optimización del diseño de estructuras geodésicas, que servirán como base para el desarrollo de nuevas formas geométricas. En la aplicación práctica se ha podido definir por completo los elementos necesarios para su fabricación y construcción, con un buen análisis y dimensionamiento estructural y un adecuado nivel de definición gráfico y presupuestario.

Iván Francisco Esquer Roch



A 5 de septiembre de 2022 en Valencia

ANEJO 01. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

DENOMINACIÓN	TITULACIÓN	MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
	PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).	
	CENTRO EDUCATIVO	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.

ÍNDICE

1. OBJETIVOS DEL ANEJO	4
2. ANTECEDENTES	4
2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS	4
2.2. ORIGEN DE LOS SÓLIDOS PLATÓNICOS	4
3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	6
3.1. HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS	7

Listado de ilustraciones

<i>Ilustración 1. Cúpula geodésica en la exposición universal de Montreal 1967.</i>	4
<i>Ilustración 2. "La maravilla de Jena" planetario de Carl Zeiss 1926.</i>	4
<i>Ilustración 3. Yacimiento neolítico escocés 2000 a.C.</i>	5
<i>Ilustración 4. Asociación según Platón de cada elemento a un sólido regular.</i>	5
<i>Ilustración 5. Los 5 poliedros en el libro de Kepler "Harmonices Mundi"</i>	6

LISTADO DE TABLAS

<i>Tabla 1. Aplicación de la fórmula de Euler a los cinco sólidos platónicos.</i>	5
---	---

1. OBJETIVOS DEL ANEJO

El objetivo del anejo se trata de conocer y analizar las técnicas de diseño de cúpulas geodésicas que se utilizan en la actualidad. Además, se estudiará cuál ha sido la evolución histórica de las técnicas empleadas para la construcción de este tipo de estructuras; desde el concepto de la forma hasta su materialización como su estructura, destacando autores y hechos históricos que han marcado el devenir de los domos geodésicos.

Esta revisión del estado de la tecnología geodésica proporcionará los datos de partida para la creación de un sistema propio de industrialización y acotará las investigaciones sobre las aplicaciones técnicas desarrolladas por los autores más relevantes.

2. ANTECEDENTES

2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Richard Buckminster Fuller es considerado el inventor de las cúpulas geodésicas como las conocemos en la actualidad. Fuller las desarrolló en la década de 1940, y creó una de las cúpulas más conocidas en 1967 en la Exposición Universal de Montreal; esta cuenta con 76 metros de diámetro y 41,50 metros de altura, como se puede observar en la siguiente figura:

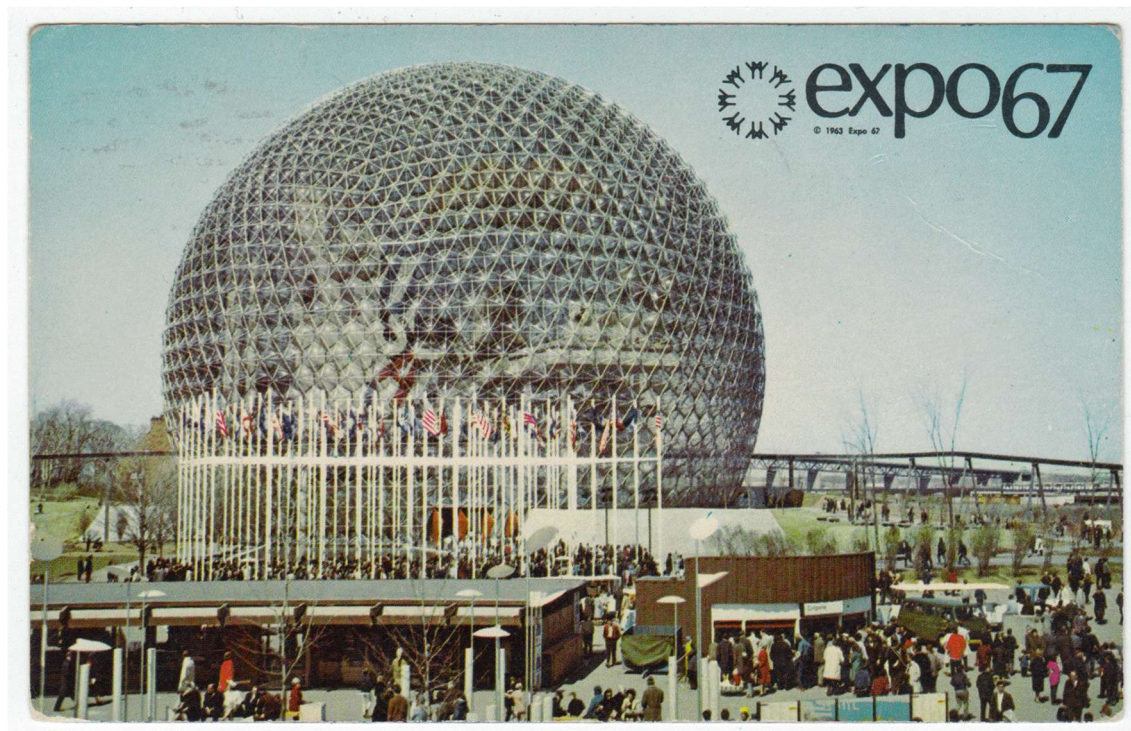


Ilustración 1. Cúpula geodésica en la exposición universal de Montreal 1967.

Sin embargo, existen ejemplos datados anteriores al popular inventor de las cúpulas geodésicas, como en el Palacio Imperial de China, donde puede observarse una esfera con una subdivisión geodésica del poliedro regular icosaedro, aproximadamente construida en 1885.

Otro claro ejemplo, es el planetario de los talleres Carl Zeiss en la ciudad de Jena; esta cúpula geodésica posee una frecuencia 16 y fue creada por Walther Bauersfeld en 1926, pasando a llamarse “la maravilla de Jena” ubicada en Alemania. Pero no fue hasta unos 23 años más tarde cuando R. Buckminster Fuller erigió la primera cúpula geodésica en el mundo que podía sostener su propio peso en 1949, construida con tubos de aluminio y cubierta de vinilo en forma de icosaedro. El gobierno estadounidense reconoció la importancia del invento y le contrató para hacer pequeñas cúpulas para el ejército, y en pocos años había miles de ellas en todo el mundo.



Ilustración 2. “La maravilla de Jena” planetario de Carl Zeiss 1926.

Fuller estaba convencido de que la visión cartesiana, ortogonal del mundo estaba profundamente equivocada, su búsqueda de “el sistema de coordenadas de la naturaleza” le condujo a un viaje que duró toda su vida y donde pudo explorar las estructuras, y una de estas vías le llevo al desarrollo de una trama esférica triangulada y a la invención de la cúpula geodésica, todo un icono de la arquitectura de vanguardia en los años 1950 y 1960 patentada en Estados Unidos el 29 de junio de 1954.

2.2. ORIGEN DE LOS SÓLIDOS PLATÓNICOS

En este apartado se pretende exponer los conocimientos matemáticos que dieron origen a la constitución de la geometría de las cúpulas geodésicas que conciernen a este proyecto.

Las cúpulas, en la mayoría de los casos, parten de la forma geométrica de un icosaedro o un octaedro; estos poliedros forman parte de los conocidos como sólidos platónicos, que fueron estudiados por primera vez de forma matemática en la antigua Grecia. Sin embargo, hay pruebas de que estas formas geométricas fueron tratadas por civilizaciones más antiguas que la griega como demuestra el yacimiento neolítico hallado en Escocia, donde se encontraron figuras de barro datadas en

aproximadamente el 2000 a.C. como se muestra en la siguiente ilustración. Se cree que se trataban de elementos decorativos o de algún tipo de juego de la época.



Ilustración 3. Yacimiento neolítico escocés 2000 a.C.

Es destacable que otras civilizaciones también les dieron gran importancia a estas formas regulares, pues en la misma época también se hicieron grandes construcciones, como lo son las pirámides de Egipto, templos sagrados con la forma de un semioctaedro.

Pero fue la civilización griega quien se propuso decididamente estudiarlas, aproximadamente en el 530 a.C. En la escuela pitagórica, fundada por Pitágoras de Samos, se planteaban por qué estos sólidos eran tan solo cinco y por primera vez llamaron a estos cinco objetos con un nombre distintivo, *los sólidos pitagóricos*.

Se cree que Empédocles (480 – 430 a.C.) por primera vez asoció el cubo, el tetraedro, el icosaedro y el octaedro a la tierra, el fuego, el agua y el aire respectivamente. Y posteriormente, Platón relacionó en su obra "Timaeus" publicada en el 360 a.C., el dodecaedro con la sustancia de la que estaban hechas las estrellas y el cosmos. Estas asociaciones dieron lugar a que los sólidos pitagóricos pasaran a llamarse sólidos platónicos. A continuación, se muestra una ilustración de cómo fueron concebidos los sólidos platónicos en la antigua Grecia.

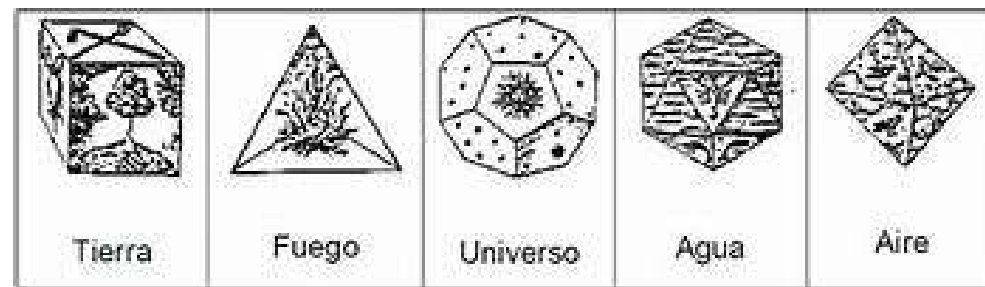


Ilustración 4. Asociación según Platón de cada elemento a un sólido regular.

No obstante, fue Euclides de Alejandría en su libro los *Elementos* en el 300 a.C. quien demuestra un total entendimiento de las figuras y las consagra como elementos matemáticos, realizando construcciones de los mismos, inscribiéndolos en la esfera.

No fue hasta el año 1750, cuando Leonhard Euler escribió su teorema para poliedros publicado posteriormente en la obra "*Elementa doctrinae solidorum*" en 1758, donde indica la relación entre el número de caras, aristas y vértices de un poliedro. Además, también concluye que solo pueden ser cinco los sólidos regulares y establece para ellos varias relaciones. Su demostración consiste en sumar el número de caras y de vértices de un poliedro y a ese resultado restarle el número de aristas y el resultado siempre es 2.

La fórmula de Euler con la que muestra su propuesta es la siguiente. Dado un **poliedro** de **C** caras, **A** aristas y **V** vértices se cumple que:

$$C - A + V = 2$$

En la siguiente tabla se muestran los resultados aplicados a los cinco poliedros regulares:

Forma gráfica	Poliedro	Nº Caras	Nº Aristas	Nº Vértices	Cálculo
	Tetraedro	4	6	4	$4 - 6 + 4 = 2$
	Cubo	6	12	8	$6 - 12 + 8 = 2$
	Octaedro	8	12	6	$8 - 12 + 6 = 2$
	Dodecaedro	12	30	20	$12 - 30 + 20 = 2$
	Icosaedro	20	30	12	$20 - 30 + 12 = 2$

Tabla 1. Aplicación de la fórmula de Euler a los cinco sólidos platónicos.

A continuación, se muestra una representación antigua de estos cinco poliedros en el libro de Kepler (1571-1630) "Harmonices Mundi" ("La armonía del mundo"). En esta ilustración se muestran los

poliedros y su asociación con los cuatro elementos. El tetraedro con el fuego, el octaedro con el aire, el cubo con la tierra y el icosaedro con el agua. El dodecaedro estaría asociado con el universo y el cosmos. Esta representación fue hecha por Kepler:

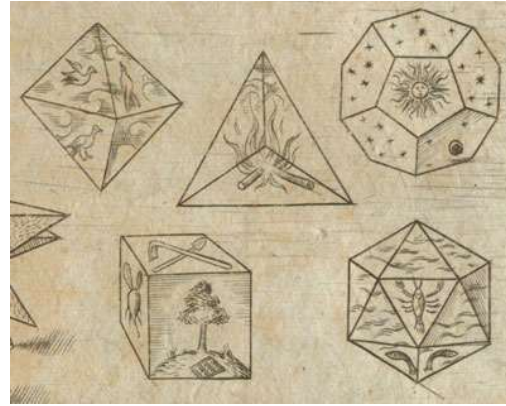


Ilustración 5. Los 5 poliedros en el libro de Kepler "Harmonices Mundi"

Estos son ejemplos de algunas representaciones que hacían referencia a las cúpulas geodésicas o los sólidos poliédricos de los que parten que ya se estudiaban desde civilizaciones antiguas. No obstante, queda claro que la primera cultura que mostró su interés en investigar las formas geométricas fueron los matemáticos y filósofos griegos. En cambio, muchos autores afirman que para que una civilización tome decididamente la decisión de investigar alguna cuestión, es debido a que esta cuestión ya era conocida con anterioridad a la misma.

3. REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Como se ha comentado en epígrafes anteriores, la primera cúpula geodésica construida en el mundo fue en 1926 por el ingeniero Walther Bauersfeld que trabajaba para la compañía óptica Carl Zeiss, donde diseñó y construyó una cúpula geodésica que sirviera como encofrado perdido para la construcción de un planetario para la compañía, realizando su patente en Alemania en 1925.

Por otro lado, a mediados de la década de los 50 en Estados Unidos Richard Buckminster Fuller vuelve a patentar esta tecnología y produjo cantidad de cúpulas a partir de esta época. Como se ha comentado en epígrafes anteriores, su tecnología fue utilizada para cuestiones militares, y esto pone en relevancia lo que Kenner redactó en su libro "Geodesic Math and how to use It" (Kenner, 1976), donde evidenció la falta de transferencia del conocimiento sobre la tecnología geodésica creada por Fuller; añadiendo que, los conocimientos se mantenían en profundo secreto de estado, con el objeto de que esta tecnología no pasara a las manos del bando enemigo, por lo que, solo el círculo cercano a Buckminster Fuller la manejaban con máxima discreción.

Por otra parte, revoluciones sociales como el movimiento *Hippie*, fomentaron el desarrollo de cúpulas geodésicas en situaciones precarias, sin organización, ni conocimiento científico. Estas estructuras se tomaron como símbolo de libertad y fueron desarrolladas de forma masiva sin disponer de los conocimientos necesarios para su construcción, que se difundían con publicaciones autoeditadas e informales.

Además del creador de la patente (Fuller), también fueron claves las aportaciones científicas aportadas por otros autores como Duncan Stuart, quien desarrolló los esquemas de subdivisión "Class I" y "Class II", a principios de los 50; estos esquemas de subdivisión son utilizados para el desarrollo de este trabajo final de máster. También, autores como Popko en su publicación "Geodesics" (Popko, 1967), que con sus manuales de diseño y construcción contribuía a la entusiasta filosofía de la época del "do it yourself".

Steve Bear en 1968 recoge sus experiencias constructivas con cúpulas geodésicas en el famoso libro "Dome Cookbook" (Bear, 1968), conocido como el libro de recetas de un domo, cuya configuración es similar a la de un diario de experiencias constructivas y un manual informal.

Uno de los más importantes avances en la transferencia de conocimiento científico sobre las cúpulas geodésicas fue desarrollada por Joseph Clinton, en su informe preparado para la NASA "Advanced Structural Design Concepts for Future Space Missions" (Clinton, 1970); básicamente la terminología de trabajo que se utiliza hoy en día es la descrita en este documento, y es la utilizada en el presente proyecto y en las empresas constructoras de cúpulas geodésicas.

El autor Khan, con la publicación de su trilogía del Domebook, puso a disposición del público general los conocimientos sobre cúpulas geodésicas, siendo un referente e impulsor de una ola de construcciones en el movimiento "Back to land" del movimiento *Hippie* de los 70 en Estados Unidos con sus publicaciones de los libros: "Domebook" (Khan, 1970), "Domebook 2" (Khan, 1971) y "Domebook 3" (Khan, 1973). En este último libro Khan puso relevancia el respeto a este tipo de construcciones y aseguraba que su libro Domebook 2 presentaba los domos como algo demasiado fácil y demasiado excitante.

Las publicaciones de Khan supusieron un avance fundamental en la difusión de los conocimientos de este tipo de estructuras, pero afirmaba que las frecuencias impares no podían tener una base plana. Sin embargo, en el manual "Dome cookbook of geodesic Geometry" (Kruschke, 1972), el profesor de matemáticas David Kruschke demostró lo contrario y puso por primera vez en la historia solución a esta cuestión, que hoy en día sigue siendo de utilidad a saber: al alineamiento de la base en las

estructuras geodésicas de frecuencia impar, abriendo la posibilidad uso práctico de este tipo de cúpulas.

Otras publicaciones de relevancia de la época fueron “The Dome Builder’s Handbook” (Penis, 1973) y “The Dome Builder’s Handbook 2” (Yarnal, 1978); este último es una verdadera guía para la autoconstrucción de domos, atendiendo todos los inconvenientes técnicos, analizando las condiciones legales y permisos, así como la relación con las administraciones, contratistas y proveedores.

Finalmente, la publicación de relevancia más actual hasta la fecha es la de “Divided Spheres” (Popko, 2012), en la que cuarenta y cinco años después de su primera publicación en 1967, condensa toda una vida de investigación sobre la división de la esfera, y junto con el libro de Kener “Geodesic Math and how to use it” (Kener, 1976), suponen la definición de los conceptos y parámetros geodésicos mejor definidos hasta la fecha.

3.1. HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS

A día de hoy, en Internet se puede encontrar cantidad de documentación sobre cúpulas geodésicas, en concreto, páginas web que aplican diferentes métodos desarrollados en todas las publicaciones mencionadas en el epígrafe anterior. De todas formas, es francamente difícil para quienes tienen el interés de investigar por primera vez estos sistemas constructivos, hallar estudios rigurosos o descifrar la información y teorías promulgadas sin análisis crítico.

Algunos autores indican que los límites de las cúpulas geodésicas se encuentran en su planteamiento a nivel del análisis conceptual y de adaptación de las herramientas matemáticas utilizadas en los casos específicos, y por ello, el aumento de la potencia informática de estos años no ha hecho más que ofuscar y confundir los conocimientos sobre las cúpulas geodésicas.

No obstante, se pueden encontrar herramientas útiles, aunque mantienen en algunos casos ocultos los métodos matemáticos empleados para la representación gráfica que muestran sobre los domos, pero se pueden visualizar de forma fácil y sencilla, como es el caso de las siguientes webs:

- www.desertdomes.com. Creada por Tara Landry en 1988. Utiliza los métodos de Clinton pero no considera el alineamiento de la base en las estructuras de frecuencia impar.
- www.simplydifferently.org. Creada por René K. Müller en 2006. Amplía los métodos de Clinton y presenta un gran número de sólidos de base y un gran número de frecuencias para cada uno.

- www.aciddome.ru. Creada en 2009 para el cálculo de estructura geodésicas, se ofrece la posibilidad de un gran número de métodos constructivos y de subdivisión del icosaedro y octaedro, llegando hasta la frecuencia 18, pero resulta complejo evaluar la calidad de sus datos, puesto que los datos los representa sin caracterizarlos.
- www.domerama.com. Creada en 2011, se muestra como una enciclopedia sobre cúpulas geodésicas, sin embargo, no profundizan en sus conceptos y dan información confusa, contribuyendo a la vigencia de errores.

ANEJO 02. MÉTODOS Y ANÁLISIS DE SUBDIVISIÓN DE ESFERAS

DENOMINACIÓN	TITULACIÓN	MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
	PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).	
	CENTRO EDUCATIVO	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.

ÍNDICE

1. SUBDIVISIÓN DE ESFERAS	4
1.1. CONCEPTO DE FRECUENCIA	5
1.2. MÉTODOS DE SUBDIVISIÓN DE ESFERAS	6
1.3. CLASE I	6
1.3.1. Método de Cuerdas Iguales	7
1.3.2. Método de Arcos Iguales (Dos Grandes Círculos)	8
1.3.3. Arcos Iguales (Tres Grandes Círculos)	9
1.3.4. Medios Arcos	12
1.4. CLASE 2 TRIACON	13
1.4.1. Aplicación del método Triacon	14
1.5. CLASE 3 SESGADA	16
1.6. RESUMEN DE LOS MÉTODOS DE SUBDIVISIÓN	17
2. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE SUBDIVISIÓN A LAS ESTRUCTURAS GEODÉSICAS	18
2.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS	18
2.1.1. Análisis de uniformidad	18
2.1.2. Análisis cuantitativo	20
2.2. CONDICIONANTES DE LAS FRECUENCIAS IMPARES	20
2.3. CONDICIONANTES DEL USO DE TETRAEDROS Y OCTAEDROS	21
3. CONCLUSIONES DE LOS MÉTODOS DE SUBDIVISIÓN	22

Listado de ilustraciones

Ilustración 1. Sólidos Platónicos con caras triangulares: Tetraedro, Octaedro e Icosaedro.	4
Ilustración 2. Subdivisiones uniformes del triángulo principal.	4
Ilustración 3. Subdivisiones de V1, V2, V3, V4, V5 y V6.	5
Ilustración 4. Diferentes ejemplos de frecuencias.	5
Ilustración 5. Vistas en planta de domos con diferentes frecuencias: V3, V4, V5 y V6.	5
Ilustración 6. Paso 1. Subdivisión Clase 1 - Cuerdas iguales.	7
Ilustración 7. Paso 2. Subdivisión Clase 1 - Cuerdas iguales.	7
Ilustración 8. Paso 3. Subdivisión Clase 1 - Cuerdas iguales.	7
Ilustración 9. Paso 4. Subdivisión Clase 1 - Cuerdas iguales.	8
Ilustración 10. Paso 1 - Arcos Iguales - Dos Grandes Círculos.	8
Ilustración 11. Paso 2 - Arcos Iguales - Dos Grandes Círculos.	9
Ilustración 12. Paso 3 - Arcos Iguales - Dos Grandes Círculos.	9
Ilustración 13. Paso 4 - Arcos Iguales - Dos Grandes Círculos.	9
Ilustración 14. Paso 1 - Arcos Iguales - Tres Grandes Círculos.	10
Ilustración 15. Paso 2 - Arcos Iguales - Tres Grandes Círculos.	10
Ilustración 16. Paso 3 - Arcos Iguales - Tres Grandes Círculos.	10
Ilustración 17. Paso 4 - Arcos Iguales - Tres Grandes Círculos.	11
Ilustración 18. Paso 5 - Arcos Iguales - Tres Grandes Círculos.	11
Ilustración 19. Paso 6 - Arcos Iguales - Tres Grandes Círculos.	11
Ilustración 20. Paso 1 - Medios Arcos.	12
Ilustración 21. Paso 2 - Medios Arcos.	12
Ilustración 22. Paso 3 - Medios arcos.	13
Ilustración 23. Paso 4 - Medios arcos.	13
Ilustración 24. Paso 1 - Triacon.	14
Ilustración 25. Paso 2 - Triacon.	14
Ilustración 26. Subdivisión del LCD. Fuente: Divided Spheres. Popko 2012.	15
Ilustración 27. Paso 3 - Triacon.	15
Ilustración 28. Paso 4 - Triacon.	15
Ilustración 29. Paso 5 - Triacon.	16
Ilustración 30. Resultado final método Triacon.	16
Ilustración 31. Mallado del PPT de Clase 3.	16
Ilustración 32. Porciones de esfera diferentes en los domos: V3, V4 y V5.	21
Ilustración 33. Base desalineada en frecuencias impares. V3 y V5.	21
Ilustración 34. Figuras de origen octaédrico de frecuencias: V1, V2, V3, V4, V5 y V6.	22
Ilustración 35. Forma de la base de un domo de Clase 2 Triacon(a) frente a un domo de Clase 1(b).	22

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Número de triángulos y elementos barra en función de la frecuencia.	6
Tabla 2. Análisis de uniformidad de la longitud de cuerda.	18
Tabla 3. Análisis de uniformidad de las áreas de los triángulos.	18
Tabla 4. Caras, Aristas y Vértices de los poliedros regulares aplicables.	20
Tabla 5. Datos del análisis cuantitativo.	20

1. SUBDIVISIÓN DE ESFERAS

La esfera es el objeto matemático que configura el máximo volumen en comparación con su superficie, por lo que para obtener grandes volúmenes al mínimo coste, tiene sentido buscar estructuras con una forma que se aproxime a una esfera. Para realizar esto, lo más económico sería aproximar la forma de la esfera mediante elementos rectos, pues diseñar elementos con formas curvas puede ser inapropiado económicamente.

Para formar una estructura de configuración esférica con elementos rectos, debe de estar diseñada casi necesariamente por triángulos, puesto que, de estar formada por cuadriláteros o polígonos complejos, aparecerían esfuerzos de flexión importantes en determinados casos de carga que harían de la estructura un diseño ineficiente, por la necesidad de obtener elementos de unión mucho más rígidos. No obstante, si la estructura está constituida a partir de triángulos, esta trabajará fundamentalmente a axil, lo que le confiere mayor rigidez global y por tanto, los elementos resistentes podrán ser de menores dimensiones y las uniones individuales no necesariamente deberán de ser tan rígidas.

Para el diseño de las cúpulas geodésicas se puede considerar a priori que el uso de triángulos equiláteros para configurar la estructura esférica puede ser muy eficiente, debido a que la tensión en todos los elementos estructurales será similar, dado que la transmisión de carga será lo más uniforme posible. Por otro lado, también es lógico pensar que, para grandes estructuras, no es óptimo emplear elementos tipo barra que sean muy largos, puestos que estos se verían comprometidos por los efectos de pandeo, y que por ello se aconseja que cuanto más grande sea la estructura, está deberá de tener una mayor subdivisión de los elementos del poliedro principal con la cual ha sido originada.

Con todos estos criterios mencionados, la forma más eficiente de crear estructuras esféricas es partir de elementos matemáticos tridimensionales regulares como son: *el tetraedro, el octaedro y el icosaedro*. Como se ha mencionado en párrafos anteriores, estos poliedros son conocidos como los sólidos platónicos, que son aproximaciones a una esfera, aunque el icosaedro es el elemento con el que más fácilmente podemos obtener configuraciones esféricas. Se muestran a continuación los tres elementos mencionados:

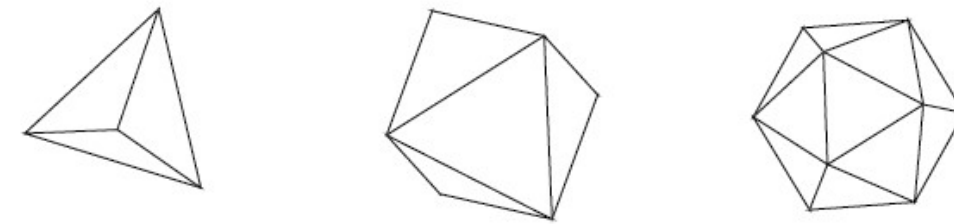


Ilustración 1. Sólidos Platónicos con caras triangulares: Tetraedro, Octaedro e Icosaedro.

Para configurar una cúpula geodésica solo basta con emplear uno de estos tres sólidos regulares y aplicar métodos de subdivisión a los triángulos de los poliedros; de esta manera obtendremos más puntos tangentes a la esfera y dotamos de mayor curvatura a la figura. Hay que aclarar que en la terminología habitual de las cúpulas geodésicas se habla siempre de puntos tangentes a la esfera, lo que no sería correcto, pues un punto no puede ser tangente a una superficie, sino que está contenido en ella. Por lo tanto, cuando se enuncie a lo largo de este proyecto que un punto es tangente a la esfera, debemos de contextualizar esta afirmación puesto que teóricamente no es correcto y nos referiremos siempre que un punto está contenido en una superficie esférica.

Es destacable, que se puede emplear cualquiera de los tres sólidos, sin embargo, el tetraedro y el octaedro presentan ciertos problemas que se expondrán más adelante.

Por criterios de diseño, en este proyecto solo se realizarán cúpulas geodésicas cuyo poliedro principal de origen sea el icosaedro. A continuación, se muestra posibles subdivisiones uniformes de un triángulo que podrían aplicarse a las caras de cualquier sólido platónico:

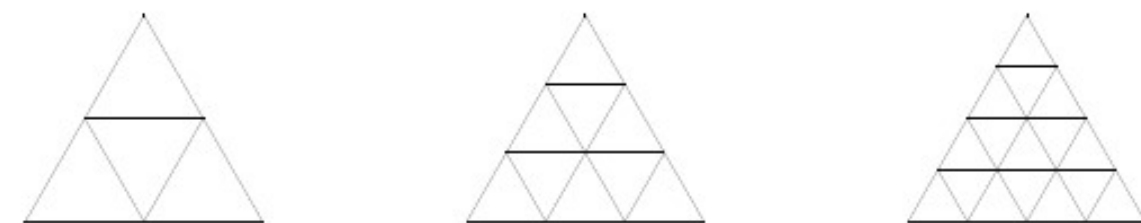


Ilustración 2. Subdivisiones uniformes del triángulo principal.

Con esta subdivisión lo que se obtienen son nuevos puntos de intersección, si ahora trazamos una línea que pase por el centro del poliedro y por el punto de intersección que tenga la longitud de un radio, se obtiene un nuevo punto de la cúpula con la proyección del punto sobre la esfera. De esta manera se van obteniendo las nuevas posiciones de subelementos de la estructura, dotando de mayor esfericidad y rigidez por mayor número de elementos resistentes.

Debido a la simetría de la forma básica del poliedro, solo se utilizará una de las caras del poliedro para calcular las propiedades geométricas de la configuración estructural. Las caras restantes se hallarán mediante rotaciones o reflexiones del triángulo poliédrico principal y sus transformaciones.

En el presente proyecto se desarrollarán dos métodos de subdivisión de triángulos, cuya justificación se expone en los siguientes epígrafes. Ambos métodos de subdivisión que se emplean en este proyecto son recogidos del libro “Advanced Structural Geometry Studies Part I and Part II – Polyhedral Subdivision Concepts for structural Applications” redactado por la NASA en 1971.

Los métodos que se desarrollan se denominan según el documento mencionado en el párrafo anterior el método de subdivisión Clase I, que se basa en realizar divisiones de los lados de los triángulos en partes iguales y el método de subdivisión Clase II se basa en realizar divisiones iguales del ángulo que forman estos vértices con la esfera que circunscribe al poliedro. Posteriormente, se detallará ampliamente en que consiste cada método.

1.1. CONCEPTO DE FRECUENCIA

En la formación de cúpulas geodésicas es de capital importancia definir el término de *frecuencia*; es el concepto más ampliamente utilizado para definir los tipos de domo y se suele utilizar indicando el número de frecuencia acompañado de la letra “V”, como, por ejemplo: V2, V3, V6, etc. Este término se refiere al grado de subdivisión con el que se ha creado el domo, es decir, las veces que ha sido subdividido cada triángulo del poliedro principal para la creación del domo.

Si el triángulo principal ha sido subdividido 2 veces, el indicador de la frecuencia se definiría como V2 para definir el tipo de domo. Se denominaría V3 si el triángulo principal ha sido dividido 3 veces, y así sucesivamente. A continuación, se muestra unas ilustraciones que representan diferentes frecuencias de domo y sus divisiones.

En las vistas mostradas en las siguientes ilustraciones lo que se puede apreciar es la subdivisión de un icosaedro truncado, es decir, un icosaedro al que le ha sido eliminando la pirámide pentagonal del vértice inferior, por lo que nos queda un poliedro regular de 15.

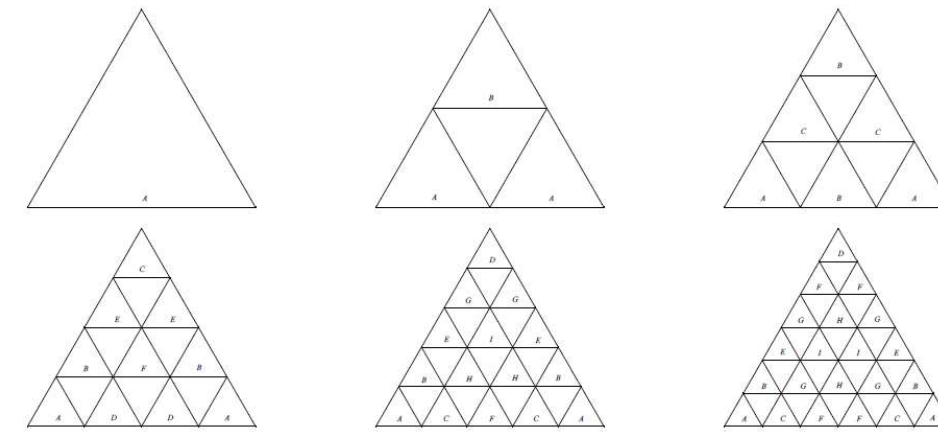


Ilustración 3. Subdivisiones de V1, V2, V3, V4, V5 y V6.

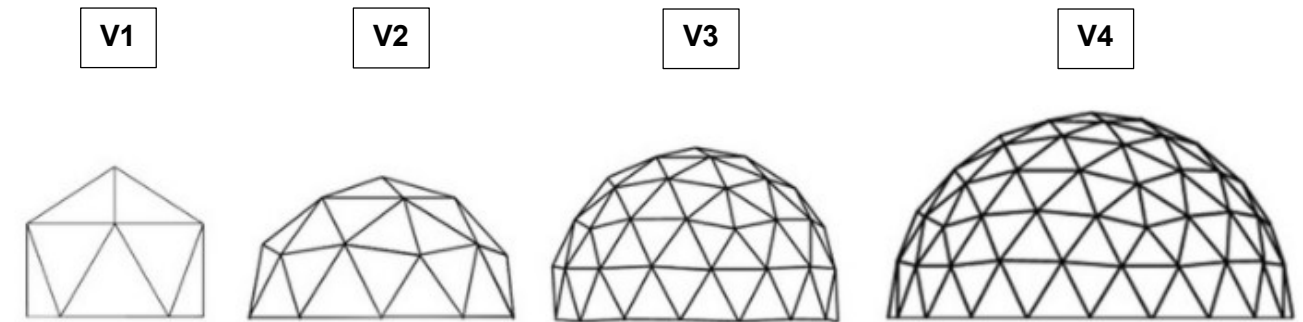


Ilustración 4. Diferentes ejemplos de frecuencias.

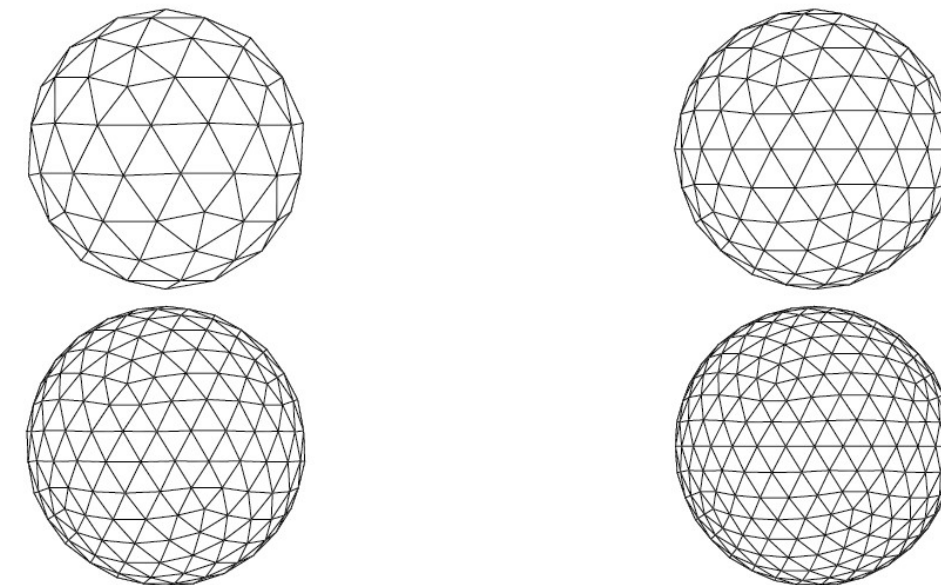


Ilustración 5. Vistas en planta de domos con diferentes frecuencias: V3, V4, V5 y V6.

Como se puede apreciar, a medida que se incrementa la frecuencia y el número de subdivisiones, también se incrementa significativamente el número de triángulos y de elementos resistentes. Se muestra una tabla con el número de triángulos y de elementos resistentes de un domo en función del incremento de su frecuencia geodésica.

Frecuencia	Nº de triángulos	Nº de elementos resistentes
V1	15	45
V2	40	120
V3	105	315
V4	160	480
V5	275	925
V6	360	1080

Tabla 1. Número de triángulos y elementos barra en función de la frecuencia.

1.2. MÉTODOS DE SUBDIVISIÓN DE ESFERAS

Los poliedros esféricos proporcionan un punto de partida muy práctico para subdividir esferas, puesto que distribuyen uniformemente un conjunto inicial de puntos en la superficie de la esfera. En esta vertiente de subdivisión se basó Joseph Clinton a mediados de la década de 1960 en su informe realizado para la NASA, en el cual desarrolló un sistema de clases para clasificar los mallados esféricos. Hoy en día, podemos clasificar los sistemas de mallado de las esferas en tres grandes grupos: Clase 1, Clase 2 y Clase 3.

La clase 1 se refiere a rejillas triangulares que tienen la misma orientación básica con respecto a las aristas del poliedro esférico que subdividen, es decir, en esta clase de mallado las rejillas son paralelas a las aristas del poliedro de origen. En la clase 2, las rejillas son perpendiculares a las aristas del poliedro, mientras que en la Clase 3 están sesgadas y forman un ángulo con las aristas. A continuación, trataremos de desarrollar cada método por separado, destacando las técnicas usadas por cada una de ellas y mostrando ejemplos de cómo se puede implementar la subdivisión.

Cada uno de los métodos comparten unos pasos iniciales para todos ellos, se comienza orientando una de las caras del poliedro de forma que facilite los cálculos, esta cara se llama triángulo poliédrico principal o en adelante "PPT" (de sus siglas en terminología inglesa: *Principal Polyhedral Triangle*), esto nos servirá como nuestro banco de trabajo de subdivisión. Los vértices de este triángulo son nuestros puntos iniciales que están contenidos en la esfera, con el objeto que a partir de ellos generar más, creando un mallado lo más simétrico posible y adaptado a la industrialización de estructuras. Se valorarán cada uno de los métodos y se designará cuál de ellos es más ventajoso aplicar en cada una de los diferentes tipos de cúpulas geodésicas que se presentarán. Se ilustrarán cada uno de los pasos llevados a cabo, señalando los principios matemáticos en los que se basa el proceso y presentando las fórmulas y algoritmos claves.

1.3. CLASE I

El método de subdivisión de esferas a partir de poliedros regulares denominado como Clase 1, es el método más comúnmente utilizado para el diseño de domos, especialmente si estos son de mediana y pequeña envergadura y la construcción de los mismos se realiza empleando técnicas de bajo nivel tecnológico para su fabricación, es decir, técnicas low-tech.

El método de clase 1 tiene 4 técnicas únicas de aplicación que se definen a continuación:

- Método de Cuerdas Iguales.
- Método de arcos iguales (dos grandes círculos).
- Método de arcos iguales (tres grandes círculos).
- Método de medios arcos.

Este método tiene como característica principal que el resultado de su mallado es paralelo a las aristas del poliedro, y obtiene nuevos puntos a partir de los vértices iniciales del PPT. Sin embargo, tiene dos diferentes enfoques principales: Cuerdas iguales y Arcos iguales.

En el caso de las cuerdas iguales el método consiste en dividir en partes iguales las aristas del PPT obteniendo nuevos puntos dentro de esa arista o mejor denominada "cuerda" ya que los extremos de la arista están en contacto con la esfera. Estos nuevos puntos igualmente espaciados sobre la arista son puntos que se encuentran en el interior de la esfera y por tanto deben de ser proyectados a la superficie de la esfera antes de poder ser utilizados como referencia de subdivisión. Por el contrario, la técnica de los arcos iguales, lo que se subdivide uniformemente es el borde del arco del PPT, sin necesidad de proyectar estos puntos porque ya están en la superficie de la esfera.

A continuación, se desarrollan los 4 métodos de subdivisión correspondientes a la Clase 1.

1.3.1. MÉTODO DE CUERDAS IGUALES

La técnica Cuerdas Iguales, como su propio nombre indica, comienza con puntos de referencia de igual cuerda a lo largo del borde del PPT. El método trata de realizar un mallado uniforme directamente sobre el triángulo principal, con lo que se obtienen unos puntos que deben de ser proyectados a la esfera para ser utilizados como puntos de referencia de la estructura.

A continuación, se muestra paso a paso el proceso de aplicación de la técnica sobre un triángulo principal de un icosaedro que se desea dividir en n frecuencias.

El primer paso es subdividir en n veces las tres aristas del triángulo principal:

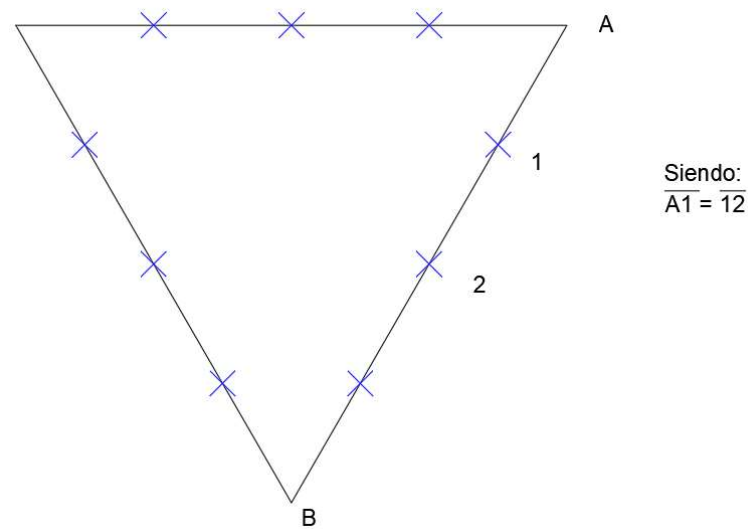


Ilustración 6. Paso 1. Subdivisión Clase 1 - Cuerdas iguales.

El segundo paso es conectar, cada punto de subdivisión con un segmento de línea paralelo a sus respectivos lados, lo que da lugar a una retícula de tres vías, de modo que se forman una serie de triángulos equiláteros.

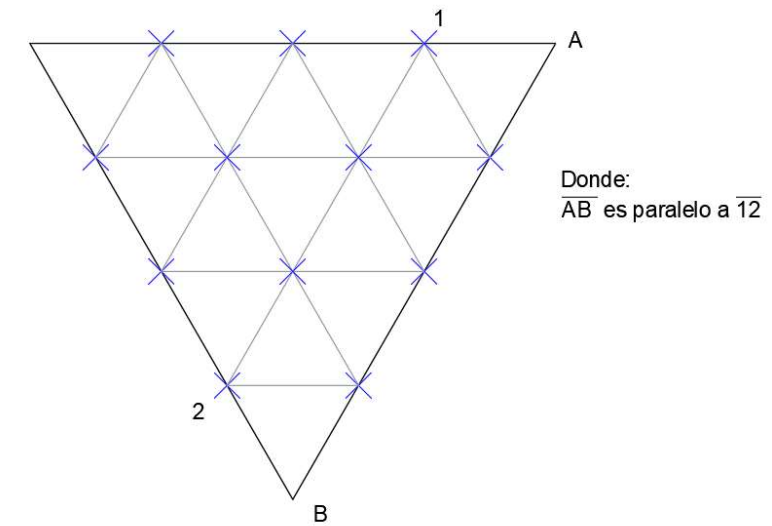


Ilustración 7. Paso 2. Subdivisión Clase 1 - Cuerdas iguales.

El tercer paso se basa en de proyectar estos puntos del PPT sobre la esfera. Para ello se traza una línea por cada punto generado que pase por el origen de coordenadas del poliedro y su respectivo vértice, esta línea debe tener una longitud igual al radio de la esfera que circunscribe le poliedro.

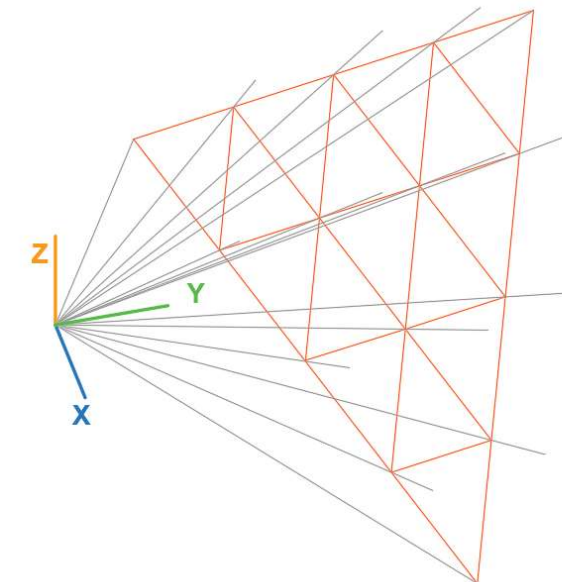


Ilustración 8. Paso 3. Subdivisión Clase 1 - Cuerdas iguales.

El cuarto paso se trata de unir los extremos de las líneas generadas en el paso tres, cuyos vértices ya están proyectados sobre la esfera. El resultado de unión de estos puntos son los segmentos sobre los que se configurará la estructura geodésica.

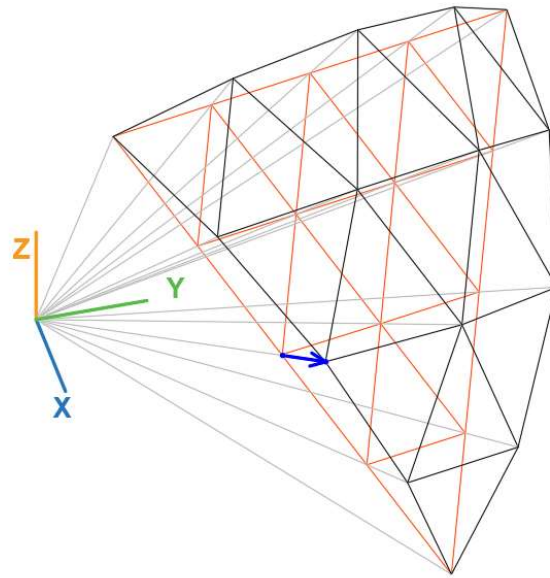


Ilustración 9. Paso 4. Subdivisión Clase 1 - Cuerdas iguales.

Una vez definida esta porción de estructura se aplican metodologías simples de rotación y simetría para obtener réplicas de la misma y configurar la estructura esférica completa.

Esta estrategia da como resultado longitudes de arco desiguales entre los puntos de referencia de los bordes, cuando estos se proyectan sobre la superficie de la esfera. Sin embargo, la malla completa generada es bastante uniforme, sin ofrecer muchas longitudes de barra diferentes, existiendo una gran uniformidad de los triángulos generados. También es rotacionalmente simétrica respecto al centro del poliedro y de sus 3 ejes de coordenadas.

1.3.2. MÉTODO DE ARCOS IGUALES (DOS GRANDES CÍRCULOS)

La intersección de grandes círculos es la forma más intuitiva y sencilla de definir puntos en la superficie de la esfera. Para definir un gran círculo sobre la esfera basta con tres puntos: el origen y dos puntos tangentes a la esfera para definir el plano de este círculo. Con la intersección de dos círculos dibujados sobre la esfera podemos obtener puntos de referencia de nuestra estructura, sin necesidad de tener que proyectarlos como en el caso anterior. Esta técnica es extremadamente precisa, y es muy utilizada en aplicaciones geodésicas puesto que puede programarse fácilmente en los ordenadores.

Como hemos comentado anteriormente, los mallados generados con Clase 1 son paralelos a las aristas del poliedro esférico. La elección inicial del poliedro determinará el tamaño del PPT que se va a subdividir. Tras la elección del poliedro, este se debe de posicionar para crear un banco de trabajo práctico para subdividir, la posición debe de ser simétrica al plano XY para facilitar los cálculos. A

continuación, se localizan los puntos de referencia de los vértices de la arista del PPT y se traza un gran círculo que sea tangente a los vértices del PPT y a la esfera, en el arco generado entre estos puntos y en sus intersecciones con otros grandes círculos también paralelos a sus otras dos aristas encontraremos los puntos de referencia para la estructura geodésica. A diferencia de la técnica de cuerdas iguales, aquí obtenemos puntos igualmente espaciados sobre la esfera y sin necesidad de proyectarlos.

A continuación, se muestra de un modo gráfico cual es el paso a paso para aplicar esta técnica:

En primer lugar, generamos tres grandes círculos, sobre los planos que forman los vértices de las aristas entre sí con el centro de la esfera y recortamos las partes de estos círculos que quedan en la zona exterior del PPT. Como resultado obtenemos lo que se muestra en el siguiente esquema, 3 arcos totalmente tangentes a la esfera sobre los tres vértices del triángulo del poliedro principal.

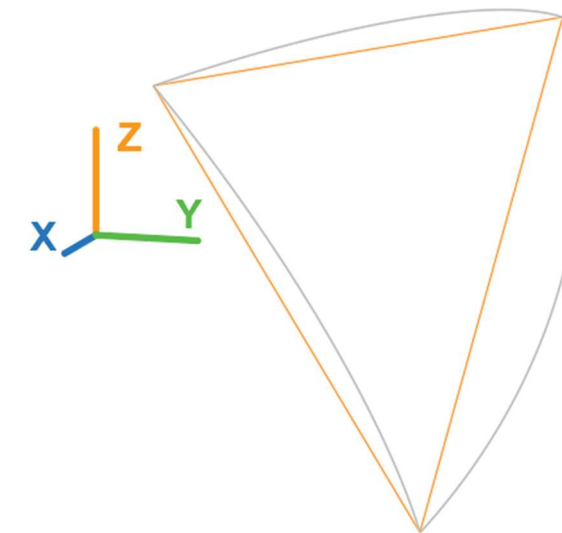


Ilustración 10. Paso 1 - Arcos Iguales - Dos Grandes Círculos.

El segundo paso se trata de dividir los arcos generados en partes iguales en función de la frecuencia. Según el ejemplo que se muestra se subdivide en 4 partes el arco, para obtener una cúpula denominada de frecuencia V4, en referencia al número de subdivisiones. Con este paso obtenemos nuevos puntos sobre la superficie de la esfera igualmente espaciados.

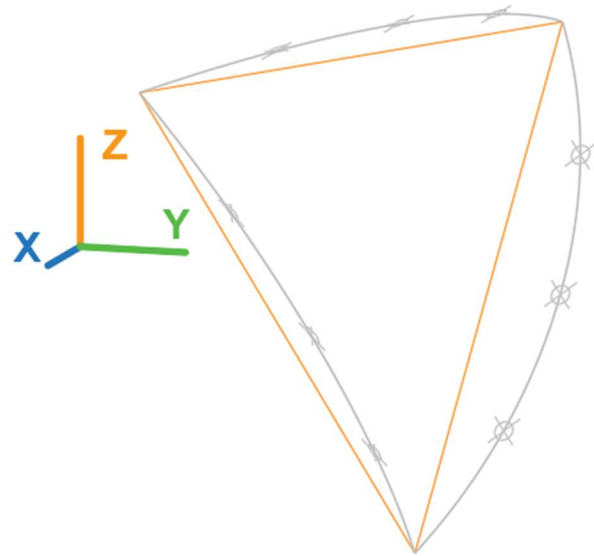


Ilustración 11. Paso 2 - Arcos Iguales - Dos Grandes Círculos.

El tercer paso es el clave para este método. Se trata de ir generando grandes círculos que intersecten a la esfera en nuevos planos. Estos planos serán los generados entre sí por los nuevos puntos creados en los arcos de las aristas. El objetivo es buscar puntos de intersección en la zona central del triángulo. Para que sean dos grandes círculos debemos de utilizar solo los planos que sean paralelos a dos de sus aristas, y la intersección de estos arcos nos marcará los nuevos puntos. Como se muestra en la siguiente imagen:

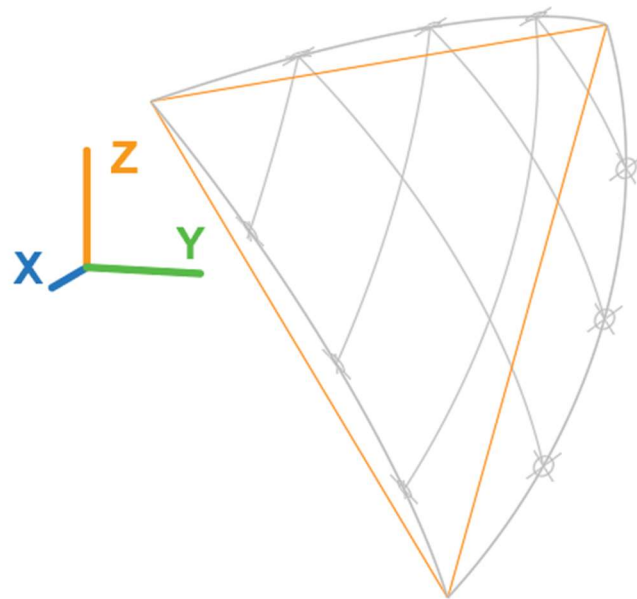


Ilustración 12. Paso 3 - Arcos Iguales - Dos Grandes Círculos.

El cuarto paso se trata de crear el mallado del triángulo uniendo los puntos de intersección creados por los arcos paralelos a las aristas que tocan los puntos generados a partir de la subdivisión. Como se muestra en la siguiente imagen:

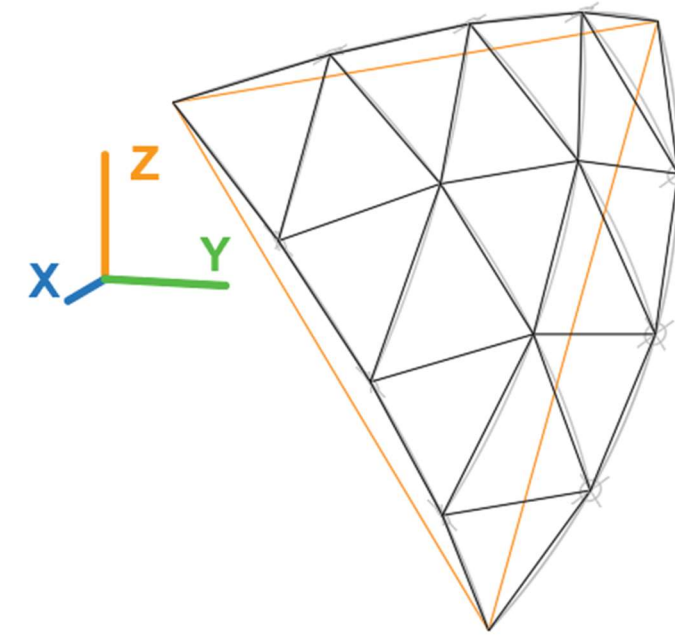


Ilustración 13. Paso 4 - Arcos Iguales - Dos Grandes Círculos.

La mayor consecuencia de la intersección de sólo dos grandes círculos es que los puntos de la cuadrícula resultantes no son rotacionalmente simétricos respecto al centro del PPT. Tampoco son simétricos respecto a los bordes o los ápices del PPT. Estos efectos de asimetría son el resultado de solo intersectar dos círculos para definir un vértice. Para algunas aplicaciones esta asimetría de arcos iguales no es un problema, pero para la aplicación en cúpulas geodésicas podemos encontrar opciones mejores.

1.3.3. ARCOS IGUALES (TRES GRANDES CÍRCULOS)

El ejemplo anterior arroja dudas sobre las ventajas de utilizar puntos de referencia de arcos iguales para definir las intersecciones de los grandes círculos. Sin embargo, se ha observado que, al utilizar tres grandes círculos de intersección para definir los puntos sobre la retícula en lugar de dos, los resultados son excelentes, obteniendo resultados mucho más uniformes que los obtenidos hasta ahora en los anteriores métodos.

A continuación, se van a definir gráficamente los pasos a seguir para la aplicación del siguiente método de subdivisión.

El primer paso consiste, al igual que con el anterior método, definir los tres grandes círculos tangentes a la esfera sobre los planos que producen los vértices del triángulo principal junto con el centro de la esfera. Formando los tres arcos que se muestran a continuación:

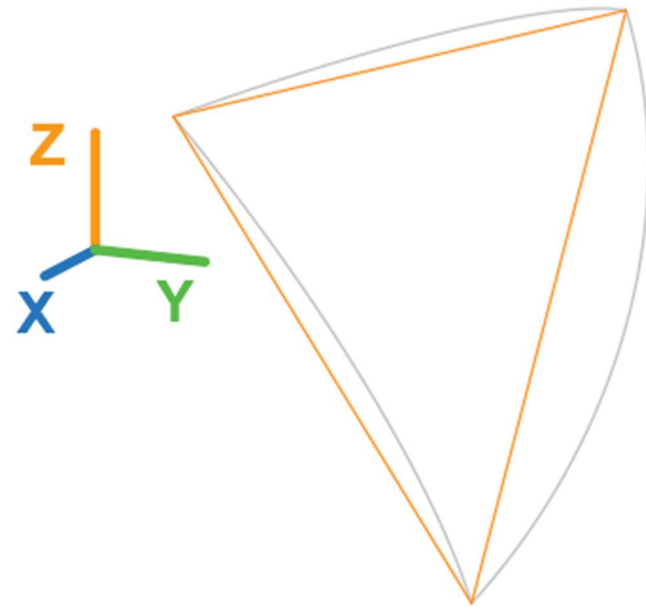


Ilustración 14. Paso 1 - Arcos Iguales - Tres Grandes Círculos.

El segundo paso consiste en subdividir estos arcos el número de veces que marque la frecuencia deseada, en este caso en 4 elementos de igual longitud de arco.

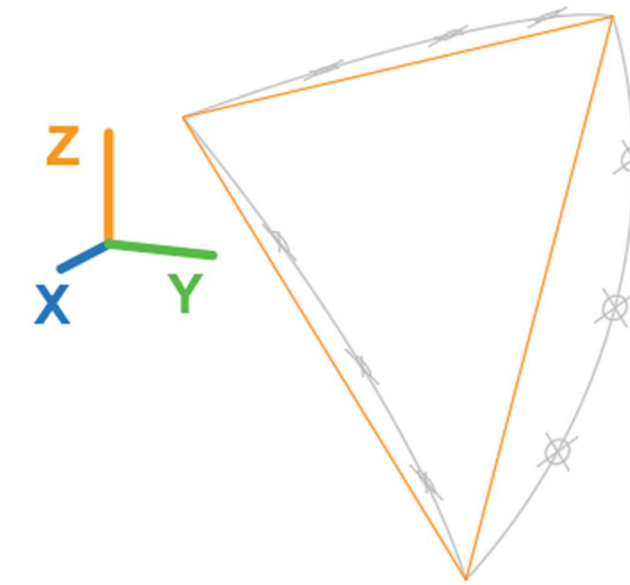


Ilustración 15. Paso 2 - Arcos Iguales - Tres Grandes Círculos

El tercer paso consiste en crear los arcos paralelos a los planos de los bordes del triángulo principal, a diferencia del método anterior solo se replicaban dos de los lados del PPT, mientras que en este caso se replican los 3 bordes del triángulo principal marcado en naranja. .

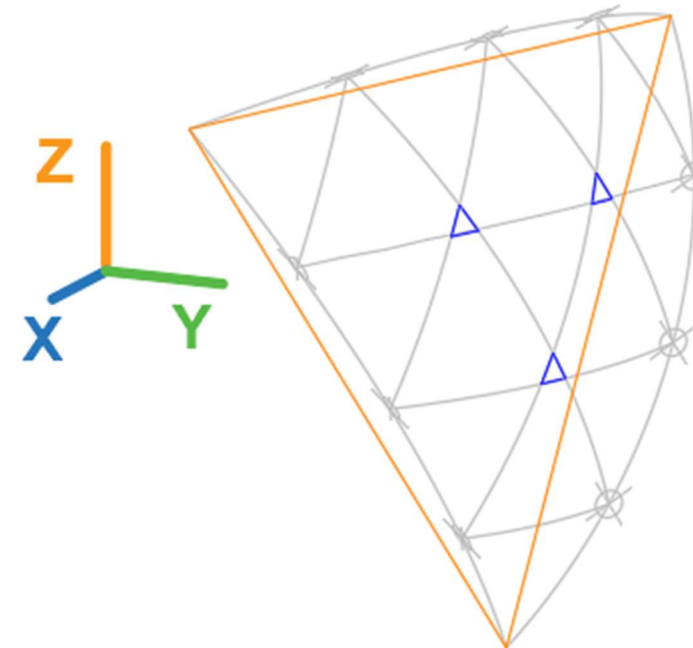


Ilustración 16. Paso 3 - Arcos Iguales - Tres Grandes Círculos

Sin embargo, se puede apreciar que la intersección de estos arcos no confluye en un mismo punto, sino que generan un triángulo en la superficie de la esfera. Estos triángulos denominados “ventanas”

por Joseph Clinton en la década de 1960 y como nosotros lo que necesitamos es un vértice del mallado deberemos de elaborar unos pasos extra para conseguirlo.

El cuarto paso tiene como objeto encontrar un único vértice dentro de esta ventana y el centroide del triángulo parece la elección más adecuada porque si quisiéramos reducir el triángulo al máximo manteniendo las proporciones de sus lados, su geometría convergería en un único punto, que es el centroide.

El centroide de un triángulo se define por la intersección de sus medianas o la media de las coordenadas de sus tres vértices da lugar a ese mismo punto. Como se puede observar se ha hallado el centroide de estos triángulos marcado en azul en el siguiente gráfico:

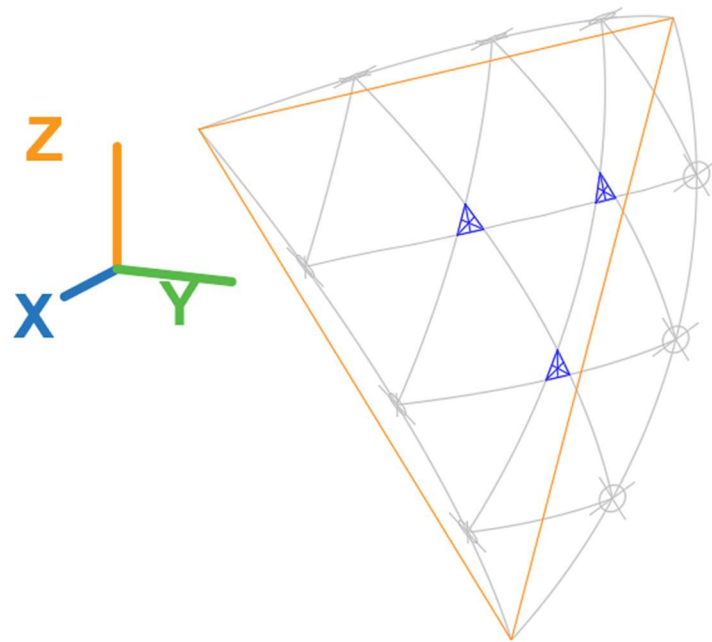


Ilustración 17. Paso 4 - Arcos Iguales - Tres Grandes Círculos

Sin embargo, cada ventana en realidad es un pequeño triángulo cuya superficie es plana y está justo dentro de la esfera, por lo que el vértice obtenido en el centroide no estaría sobre la superficie de la esfera, sería necesario proyectarlo, y este es el objetivo del quinto paso, como se muestra en la siguiente ilustración:

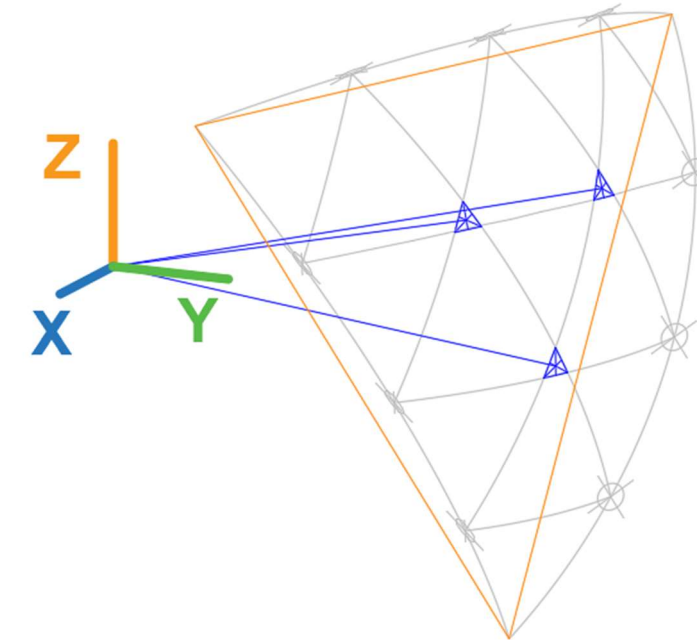


Ilustración 18. Paso 5 - Arcos Iguales - Tres Grandes Círculos

Una vez tenemos el punto del centroide proyectado sobre la esfera, ya tenemos el vértice del mallado que finalmente necesitamos. Uniendo estos vértices interiores con el resto de vértices obtenemos el mallado deseado como se muestra en la siguiente imagen:

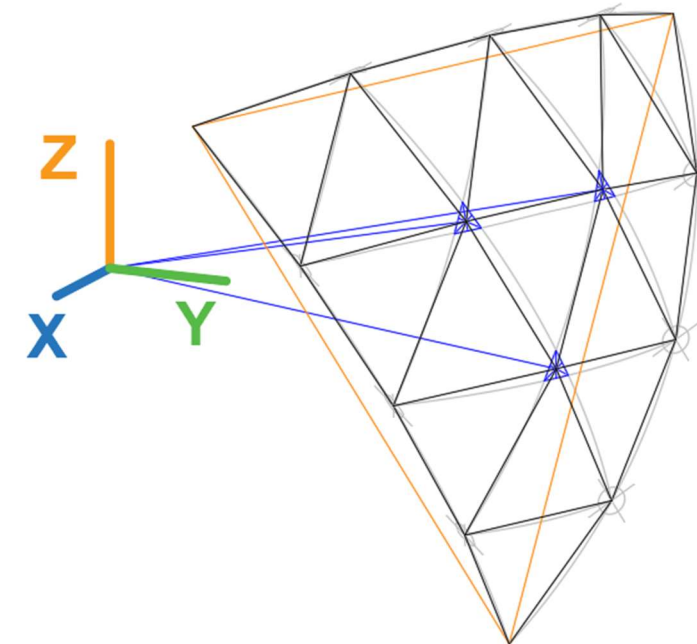


Ilustración 19. Paso 6 - Arcos Iguales - Tres Grandes Círculos

Los resultados son los más uniformes y los mejores hasta ahora. La cuadrícula final es similar al método de cuerdas iguales, cuya característica de mallado es que los triángulos de subdivisión que se posicionan más en el centro del PPT estos son de mayor tamaño, y los triángulos formados cercanos a los bordes son de menores dimensiones progresivamente.

Lógicamente, este método implica más procedimientos gráficos y cálculos matemáticos que el resto de métodos, pero los resultados merecen la pena, puesto que la distribución de puntos y la menor variación de longitudes de cuerda, ángulos, etc., proporciona un mallado más homogéneo.

1.3.4. MEDIOS ARCOS

Los primeros trabajos que se hicieron con el método de Medios Arcos fueron realizados por Jeffrey Lindsay a principios de la década de 1950. En esta época esta técnica se denominaba método alternativo, sin embargo, en la actualidad se refiere como medios arcos porque es la manera más descriptiva para denominarla, porque define en qué consiste la técnica. Las caras esféricas de los poliedros regulares que utilizamos son todas triángulos equiláteros, y esta técnica aprovecha esta característica y subdivide un PPT creando un punto de referencia de arco medio en cada una de sus aristas. Cada par de puntos de arco medio define un gran círculo que atraviesa el triángulo y no es necesario que los grandes círculos se intersecten. También, cada vez que subdividimos todos los triángulos de un PPT de esta manera, siempre duplicamos la frecuencia, por lo que esta técnica solo es aplicable a frecuencias de subdivisión que sean pares. Los arcos intermedios representan una metodología muy fácil de entender y de calcular, y esta técnica está ampliamente extendida en los gremios de cartografía y astronomía, que han ideado formas de referenciar triángulos individuales en las esferas aprovechando la subdivisión jerárquica de los triángulos dentro del mallado.

Para que se entienda de forma más explícita la técnica vamos a mostrar, como en los casos anteriores, como se aplica gráficamente paso a paso.

El primer paso, coincide con los anteriores métodos de arcos iguales; se trata de generar los arcos que forman los planos de los vértices de la arista con el centro del poliedro, estos arcos son tangentes a la esfera, pero en este caso lo que es importante en estos arcos es el punto medio de los mismos.

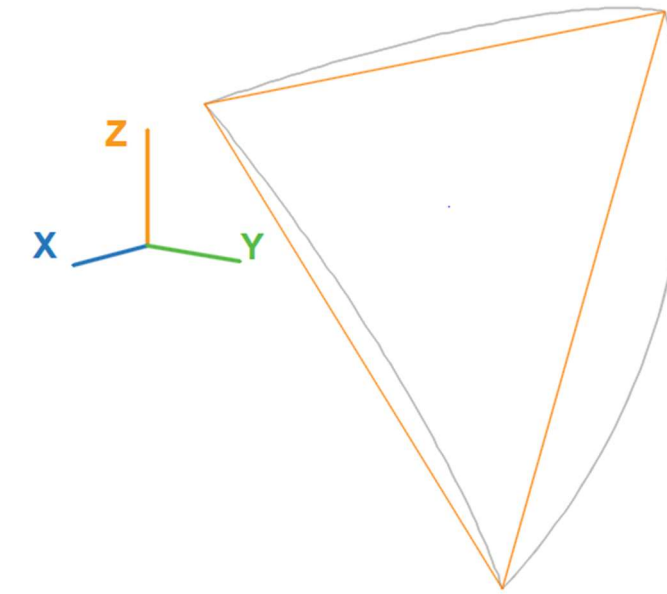


Ilustración 20. Paso 1 - Medios Arcos.

En el segundo paso, se trata de generar el mallado resultante de frecuencia 2, es decir, se deben de generar otros nuevos arcos a partir de los puntos intermedios de los arcos iniciales de los bordes de las aristas. Obteniendo el resultado siguiente:

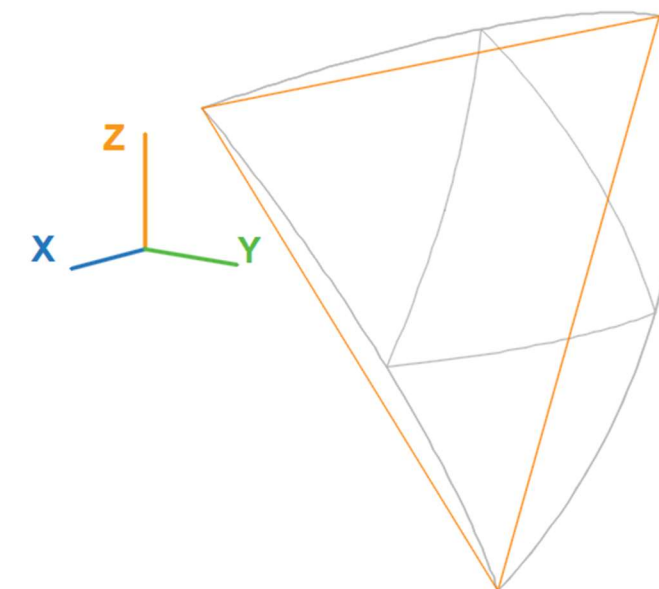


Ilustración 21. Paso 2 - Medios Arcos.

El tercer paso del método, se trata de trazar nuevos arcos de los nuevos puntos que se crean de los puntos intermedios generados en el paso anterior, de manera que se obtienen un mallado a partir del anterior, resultando una frecuencia 4 como se muestra en la siguiente ilustración:

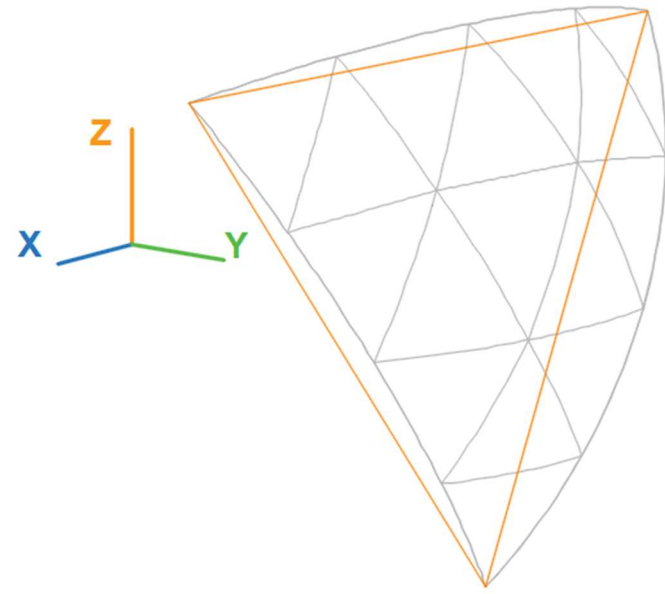


Ilustración 22. Paso 3 – Medios arcos.

Finalmente, unimos las longitudes de cuerda que han generado los vértices ubicados en las posiciones intermedias de los arcos generados. Creando el mallado de la estructura que se muestra:

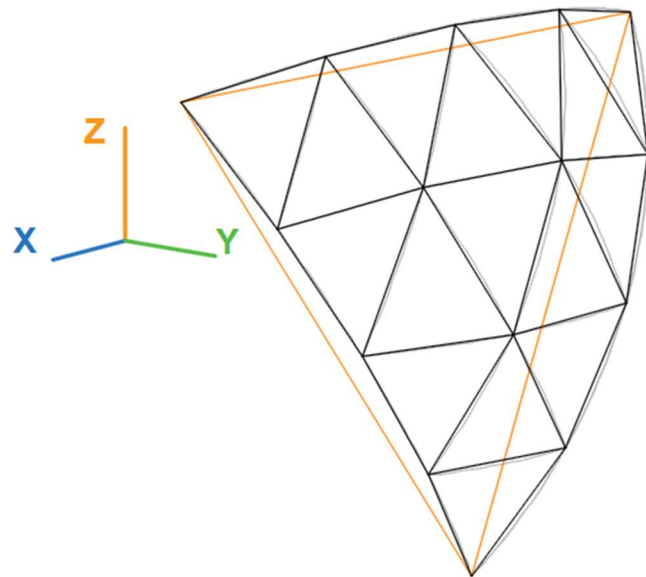


Ilustración 23. Paso 4 – Medios arcos.

La técnica de subdivisión más sencilla presentada hasta ahora es la de los medios arcos. El hecho de que las frecuencias siempre han de ser pares y la definición repetitiva del triángulo dentro de los ya creados anteriormente ofrece una jerarquía natural del método, que puede aprovecharse para ciertas aplicaciones geodésicas.

A priori, la técnica de los medios arcos presenta el resultado con menor número distinto de longitudes de cuerda en el mallado, esto supone la forma de distribución de esferas más uniforme y más conveniente para el proceso de industrialización, no obstante, solo es posible aplicarlo en frecuencias pares y quedan totalmente descartadas las impares que sí son aplicables a cualquier otro método de clase 1.

1.4. CLASE 2 TRIACON

Como se ha comentado en el resumen inicial de este capítulo las subdivisiones realizadas con el método de Clase 2 crean retículas malladas perpendiculares a las aristas de los poliedros esféricos, en lugar de paralelas como en la Clase 1, esta es una de sus principales diferencias. Otro principio fundamental es que la Clase 2, por su sistema de subdivisión solo es aplicable a cúpulas de frecuencias pares. También, sus divisiones producen triángulos, rombos, hexágonos y pentágonos como en el resto de clases.

La clase 2 tiene multitud de variantes, sin embargo, el método por excelencia es el denominado Triacon, que fue desarrollado por Duncan Stuart en 1952 con el objeto de facilitar la prefabricación de cúpulas geodésicas, objetivo compartido en este proyecto. El fin principal era reducir el número de piezas diferentes necesarias para la construcción de domos geodésicos. Más adelante desarrollaremos lo innovador que fue y es el esquema de Stuart y porqué es ampliamente utilizado en la actualidad para el diseño de cúpulas de gran tamaño.

El método de Triacon es totalmente único, ya que consigue la mejor distribución uniforme de los puntos en la esfera que se va a estudiar en este proyecto, y cumpliendo a su vez con el uso del menor número de longitudes de cuerda, formas de cara y áreas diferentes que cualquier otro método de subdivisión para una frecuencia determinada. Estas ventajas del método realmente son características totalmente esenciales para ahorrar costes en la prefabricación y montaje de las estructuras. Además, esto justifica la gran popularidad del Triacon en el sector de la construcción de domos y en la mayoría de grandes estructuras geodésicas que siguen utilizando este método en la actualidad.

No obstante, y para conseguir estos objetivos, la forma de subdivisión es totalmente distinta a los métodos analizados de Clase 1. La Clase 2 se basa en la subdivisión de un único triángulo, denominado el "Triángulo de Schwarz" o con sus siglas LCD ("Least Common Denominator triangle"), en lugar de utilizar los triángulos equiláteros de los poliedros regulares, denominados PPT, que se utilizaban en los métodos anteriores. Cuando el triángulo de Schwarz se subdivide, la geometría resultante se refleja 2 veces, de manera que, partiendo de un triángulo rectángulo subdividido, se aplica simetría para generar uno simétricamente igual en una de sus aristas, y posteriormente sobre

dos triángulos se vuelve a aplicar simetría en otra de sus aristas generando una forma de diamante, colocada de forma simétrica a las aristas del poliedro y esto lo hace perfectamente aplicable a cualquiera de los cinco sólidos platónicos esféricos que ya conocemos.

Otra característica que lo hace diferente es que el método no crea longitudes de cuerda coincidentes con las aristas del poliedro, las aristas del poliedro representan solo referencias geométricas para el cálculo del mallado de la estructura.

1.4.1. APLICACIÓN DEL MÉTODO TRIACON

A continuación, se mostrará gráficamente la aplicación del método de Clase 2 Triacon. Para ello, partiremos del poliedro regular Icosaedro con el objeto de realizar una subdivisión en frecuencia V4.

El primer objetivo es el de dibujar sobre el poliedro las líneas de referencia del triángulo Schwarz, para ello trazamos una línea perpendicular desde cada vértice hasta su arista opuesta en cada uno de los tres bordes, la intersección de estas líneas marcará el centroide de cada triángulo equilátero del icosaedro. Para mejorar la visualización gráfica solo se mostrará la parte vital del poliedro para la ilustración de este párrafo:

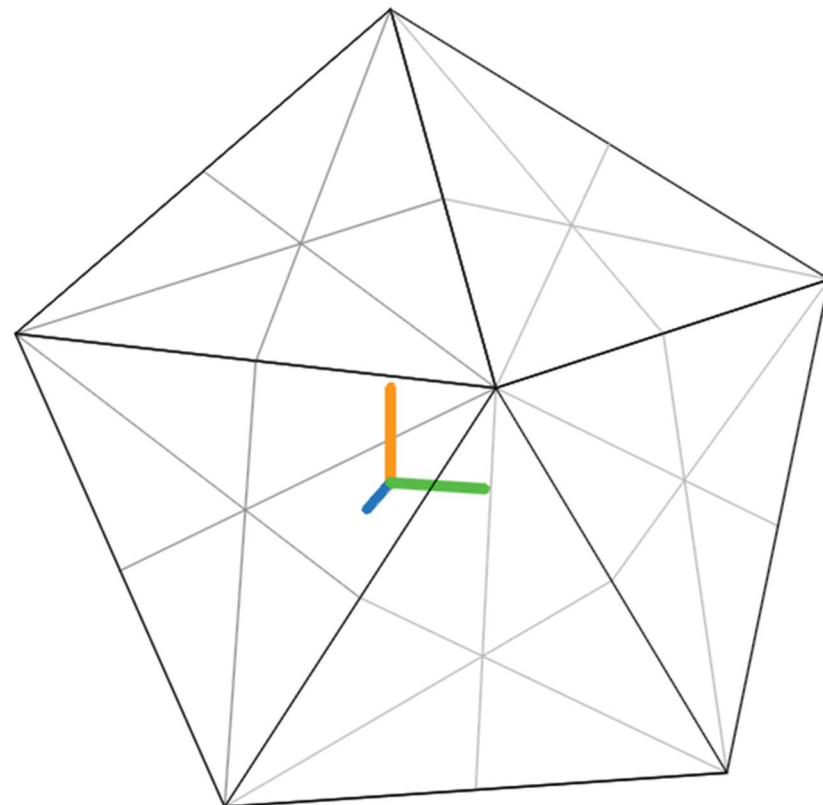


Ilustración 24. Paso 1 - Triacon.

Las líneas en gris de la ilustración superior muestran las líneas de referencia del triángulo Schwarz. Y a continuación, se muestra en naranja las partes con forma de diamante que serán utilizadas para la subdivisión.

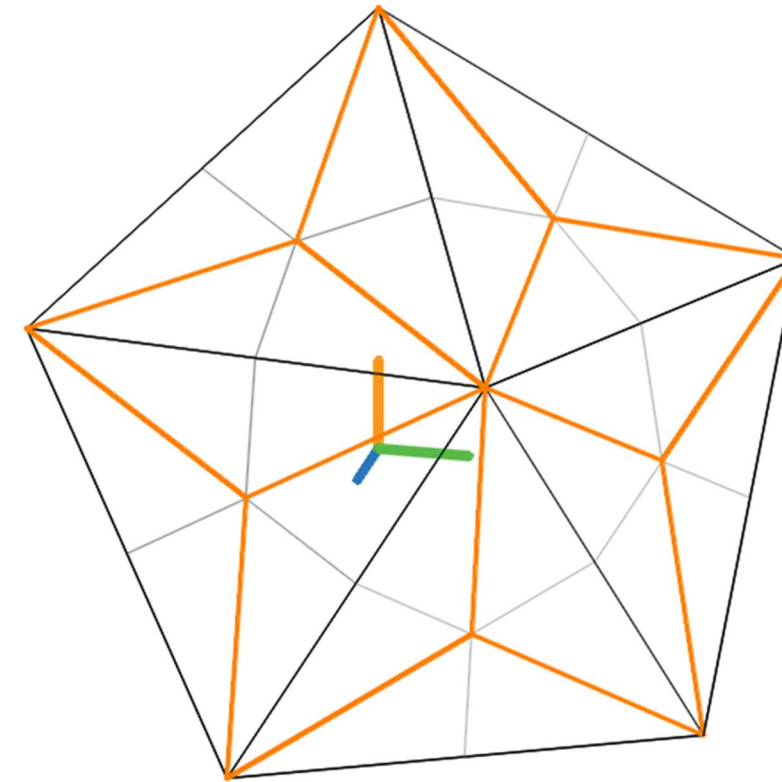


Ilustración 25. Paso 2 - Triacon

Replicando estas formas de diamante sobre el resto de la estructura tendremos las líneas de referencia de los triángulos de subdivisión creadas para toda la cúpula. Estas líneas naranjas harán de nuestro PPT como en Clase 1. No obstante, solo actuaremos sobre un triángulo rectángulo de los 4 que forman cada rombo denominado LCD, subdividiremos este e iremos aplicando simetría sobre sus aristas para obtener el rombo completo subdividido.

A continuación, indicaremos los pasos a seguir para subdividir el LCD basados en una representación del triángulo en 2D para facilitar su comprensión. Posteriormente aplicaremos esto sobre nuestra estructura.

- Paso 1. Dividiremos el lado "a" en la frecuencia deseada dividida en 2, es decir, si deseamos una frecuencia en V4, deberemos de dividir esta arista en 2 segmentos. Y trazaremos una perpendicular en los extremos de los segmentos hasta intersectar con la hipotenusa del LCD. Este paso se representa en la ilustración siguiente apartado (a).

- Paso 2. Realizamos la misma operación que en el paso 1, pero esta vez sobre el cateto "b". Trazando también las perpendiculares hasta intersectar la hipotenusa del triángulo rectángulo. Se muestra en el apartado (b) de la siguiente ilustración.
- Paso 3. Trazar las diagonales que se muestran en la ilustración siguiente apartado (c).
- Paso 4. Completar la triangulación con las diagonales opuestas tal como se muestra en el apartado (d) de la siguiente figura.

Cabe añadir que en la siguiente ilustración se muestra una subdivisión del LCD de frecuencia V8, aunque en el resto de ilustraciones se continua con la frecuencia V4.

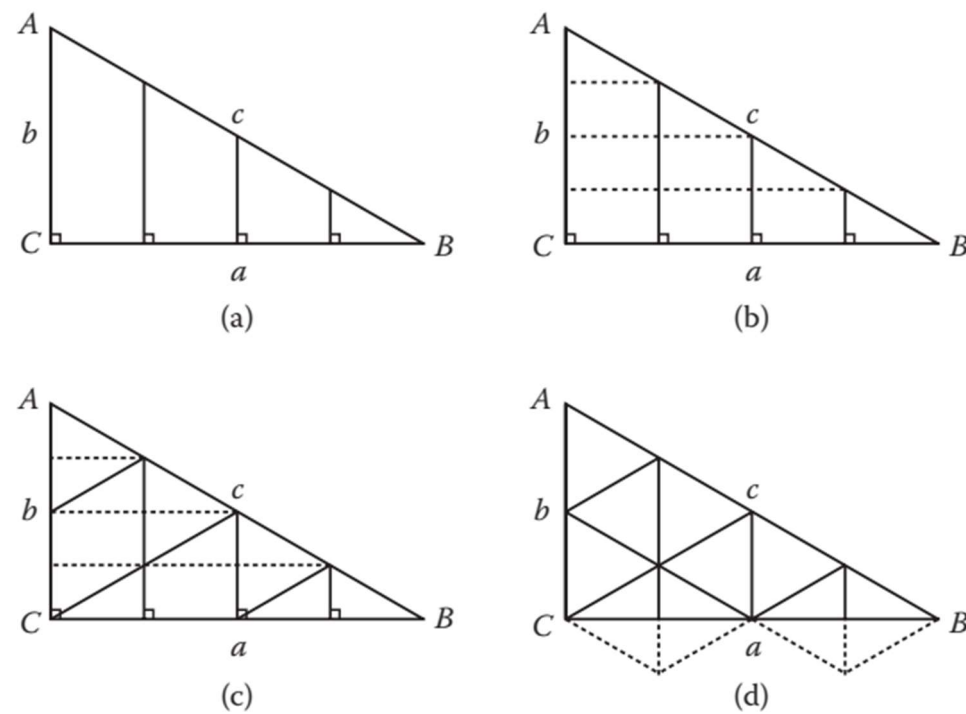


Ilustración 26. Subdivisión del LCD. Fuente: Divided Spheres. Popko 2012.

Ahora bien, este procedimiento de subdivisión se debe de llevar a 3D, lo que significa que las líneas rectas que hemos dibujado para la subdivisión deben de ser arcos tangentes a la esfera sobre los planos que marcan los puntos del nuevo mallado. Podemos ver una ilustración de un triángulo LCD esférico en tres dimensiones en la siguiente figura:

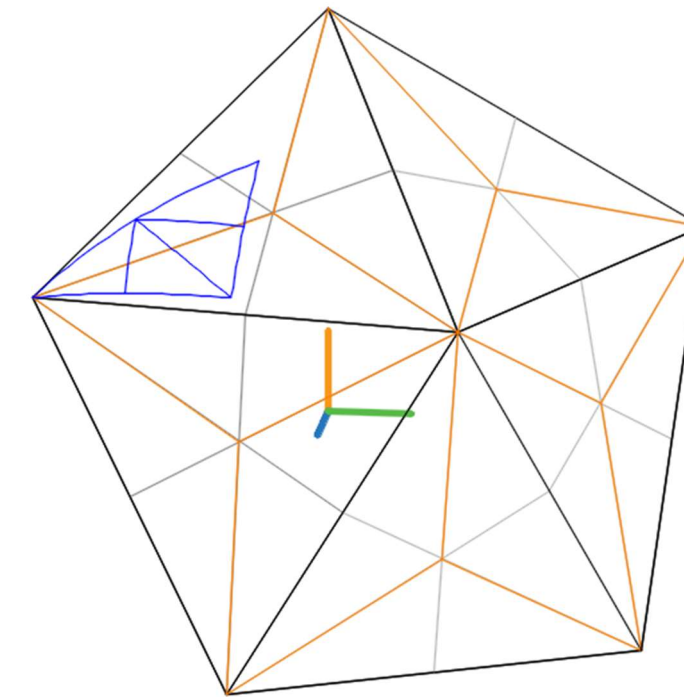


Ilustración 27. Paso 3 - Triacon

Estos arcos de color azul son totalmente tangentes a la esfera, y representan la finalización de la subdivisión de este proceso, ahora solo queda realizar procesos de rotación y simetría, para completar con la misma forma el resto de triángulos LCD del rombo.

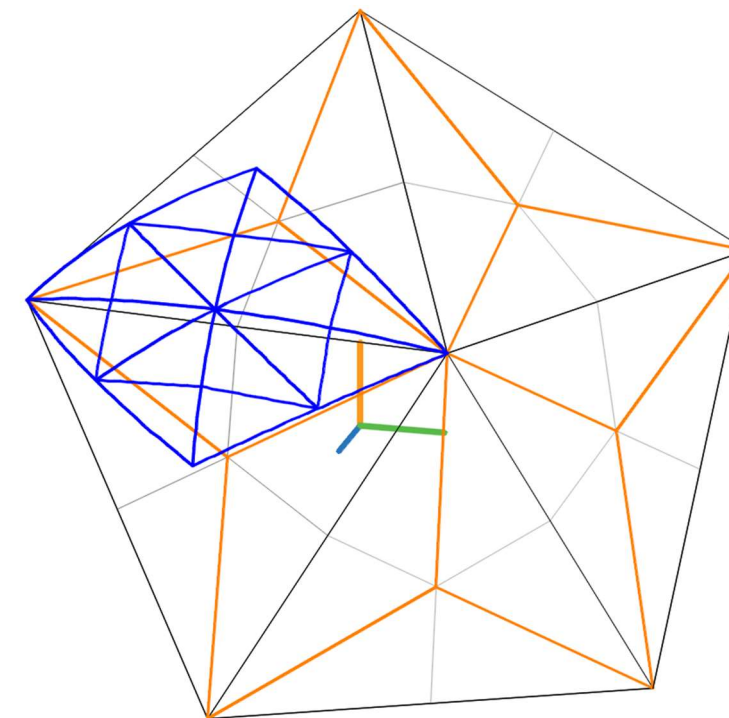


Ilustración 28. Paso 4 - Triacon

Como paso final, solo debemos de completar el diamante dibujando la unión de estos vértices del propio diamante que representarán los elementos rectos de la estructura.

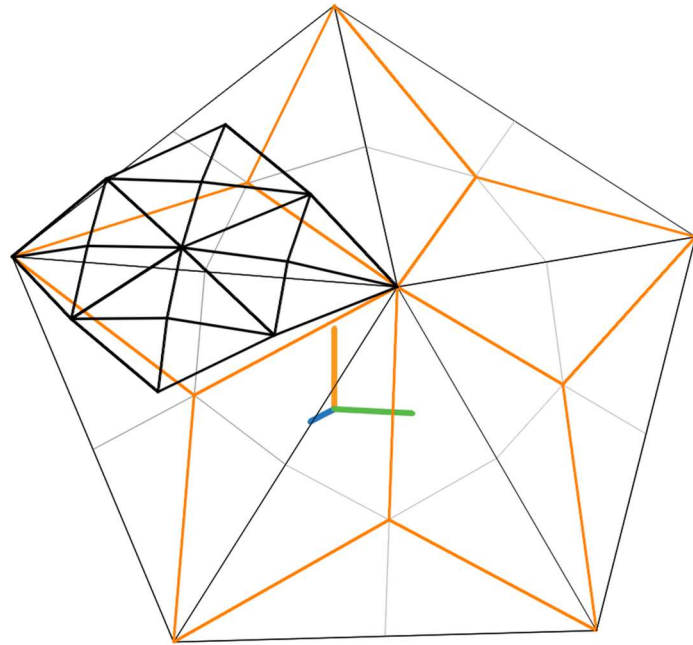


Ilustración 29. Paso 5 - Triacon

Y finalmente replicamos este resultado sobre el resto de diamantes que configuran la estructura. Y el resultado final de un icosaedro de frecuencia 4 con Triacon es el siguiente:

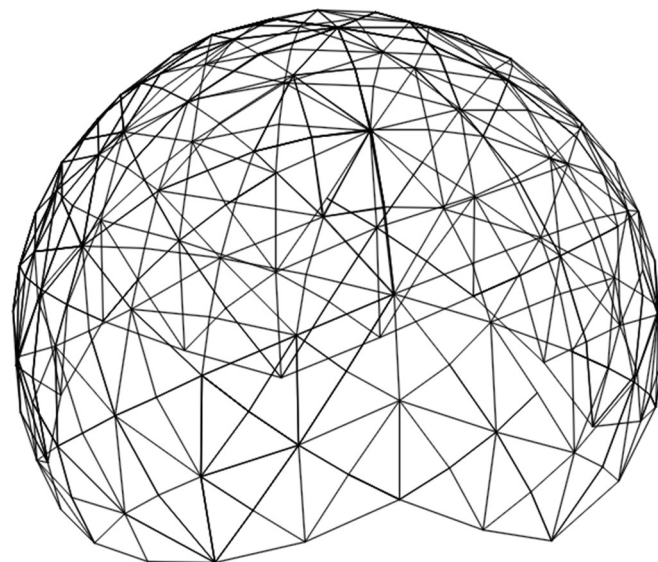


Ilustración 30. Resultado final método Triacon.

1.5. CLASE 3 SESGADA

Los métodos de subdivisión de Clase 3 quizás sean las subdivisiones esféricas más inusuales; se les denomina “Skew” en terminología inglesa o “Sesgada”. Constituyen una forma muy diferente de mallado frente a las anteriores clases, sus elementos resultantes no son paralelos ni perpendiculares a las aristas del poliedro, sino que se cruzan en ángulos oblicuos y sus proyecciones son asimétricas.

La Clase 3 carece de referencias convenientes como los métodos de Cuerdas Iguales o Arcos Iguales que fueron utilizados como puntos de partida para las subdivisiones de Clase 1 y Clase 2. Pero para este tipo de sistema se debe de aplicar un enfoque diferente y crear una cuadrícula en 2D, que luego será proyectada sobre la superficie del PPT. Aunque se mostrará un ejemplo de una cuadrícula triangular, es posible utilizar esta misma técnica para proyectar sobre la esfera cualquier geometría o patrón 2D sobre una esfera.

Dadas las características que tiene la clase 3 de asimetría, no sería una clase que cumpliera los objetivos de optimización del presente proyecto y no sería un método que nos diera ventajas en la industrialización de cúpulas geodésicas, por lo que, carece de objeto de estudio. Por lo tanto, simplemente se expondrán, a modo esquemático unas ilustraciones presentadas en el libro Divided Spheres de Popko, que resumen el método, pero no se realizará una aplicación directa a las estructuras geodésicas como se ha realizado en anteriores métodos.

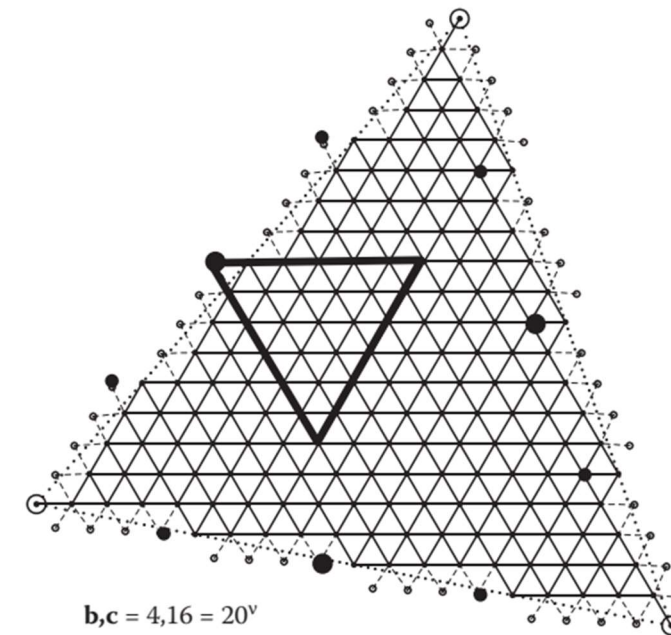


Ilustración 31. Mallado del PPT de Clase 3.

Como se puede observar, se trata de una composición asimétrica e inclinada de la subdivisión. Al trasladar este mallado a la estructura nos da el resultado de una estructura desalineada en su base que dificultaría en gran medida su ejecución. No obstante, la clase 3 nos muestra la forma de poder llevar a proyección esférica cualquier forma de mallado, lo que deja la puerta abierta a su estudio en una ampliación de este proyecto.

1.6. RESUMEN DE LOS MÉTODOS DE SUBDIVISIÓN

A modo de analizar y comparar cada método, se resume brevemente las características principales de todos los sistemas empleados:

- **Clase 1:** Los esquemas de clase 1 fueron los primeros métodos desarrollados para la creación de cúpulas geodésicas. Entre ellos, se han analizado los 4 principales métodos de clase 1:
 - Cuerdas Iguales. La subdivisión se produce sobre el plano del PPT del poliedro, generando sobre este plano un mallado regular paralelo a las aristas del poliedro, posteriormente se proyectan los vértices de este mallado sobre la esfera. Es un método sencillo y da buenos resultados.
 - Arcos iguales – Dos Grandes Círculos. En este caso, la referencia del mallado son arcos iguales, se trazan arcos tangentes a los vértices del PPT, creando un PPT esférico y subdividiendo estos arcos. Para encontrar vértices en la parte central del PPT esférico se trazan dos grandes círculos paralelos a 2 de sus aristas, la intersección de estos círculos marcará los vértices sobre la esfera. Es un resultado fácil de programar computacionalmente, pero los resultados no son muy satisfactorios.
 - Arcos iguales – Tres Grandes Círculos. Del mismo modo que el anterior, se crea un triángulo esférico como PPT, y se trazan grandes círculos paralelos a las aristas en cada uno de sus lados, generando en el interior del triángulo unas “ventanas” que marcan las posibles posiciones de los vértices. Posteriormente, hallando el centroide del triángulo plano de estas ventanas y proyectándolo sobre la esfera se obtiene el vértice de referencia para la estructura. Este método es uno de los más empleados, obteniendo unos resultados significativamente uniformes.
 - Medios Arcos. Del mismo modo que el anterior se generan un PPT esférico mediante arcos tangentes a los vértices del poliedro, pero esta vez, los puntos de referencia son los puntos medios de estos arcos, no es necesario buscar la intersección de los mismos. Es un método fácil de aplicar y que ofrece los mejores resultados en cuanto a

regularidad para la creación de cúpulas geodésicas que tiene la Clase 1, sin embargo, esta técnica es solo aplicable a frecuencias pares, por lo que no es apta para todas las cúpulas.

- **Clase 2:** Lo característico de este método denominado “Triacon” es que el mallado generado es perpendicular a las aristas del poliedro, y estas aristas del poliedro no se utilizan como líneas de referencia, en su lugar, se crea el Triángulo de Schwarz (LCD) a partir de estas, con forma de diamante, que es dividido en 4 triángulos rectángulos. La subdivisión se produce en uno de estos triángulos rectángulos y se va replicando al resto de triángulos; aplicando simetría y rotación se hace llegar a todos los triángulos Schwarz del domo. Este método fue pensado precisamente para industrializar cúpulas geodésicas, los resultados son claramente ventajosos, el número de diferentes longitudes de elementos es muy reducido, el único inconveniente es que el mallado es más denso, se emplea un porcentaje mayor de material estructural. Se analizará más detenidamente para determinar si es el método más viable, pero a priori, es el que tiene más posibilidades.
- **Clase 3:** Lo que lo diferencia del resto de métodos, es que sus mallados no son ni paralelos ni perpendiculares a las aristas del poliedro, sino que se cruzan en ángulos oblicuos. Existen muchos tipos de aplicaciones de Clase 3, puesto que se considera “la forma libre” de crear mallados. Consiste en crear mallados sin basarse en las referencias de las aristas del poliedro y proyectarlos sobre la esfera. Los resultados pueden ser muy dispares y asimétricos, no aplicables para cúpulas geodésicas, aunque si pueden ser útiles para otras aplicaciones que requieran subdivisión de esferas y no busquen la simetría como objetivo de diseño.

2. APLICACIÓN DE LOS MÉTODOS DE SUBDIVISIÓN A LAS ESTRUCTURAS GEODÉSICAS

2.1. COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Este capítulo del proyecto pretende analizar la repercusión que produce la aplicación de estos métodos de subdivisión para la creación de estructuras geodésicas, con el objeto de obtener resultados de los análisis para tomar la decisión de qué método o métodos utilizar para la industrialización de cúpulas geodésicas. La elección del método buscará la mayor viabilidad económica, que estará condicionada por la cantidad de material resultante y por la variabilidad de los elementos estructurales que configuran la estructura, aunque sin incidir, a priori, en las dimensiones de estos elementos, pues esto se comprobará en los siguientes capítulos de cálculo y dimensionamiento estructural.

En concreto, se realizan dos análisis enunciados a continuación:

- Análisis de uniformidad
- Análisis cuantitativo

2.1.1. ANÁLISIS DE UNIFORMIDAD

Para esta parte emplearemos análisis estadísticos para cuantificar la variación de las longitudes de cuerda de los elementos, que representan los elementos estructurales. También se analizarán las áreas de los triángulos dentro de un esquema.

Para hallar esto se calculará la varianza, la cual mide la dispersión de un conjunto de valores. Estas variables pueden ser las longitudes de cuerda o de arco, las áreas del triángulo o cualquier medida geométrica representativa de un domo geodésico. La varianza nos indica la media de las desviaciones de estos valores al cuadrado con respecto a su media. También hallaremos la desviación estándar, esto simplemente es la raíz cuadrada de la varianza y cuanto menor sea la desviación estándar, más cerca estarán estos valores de ser iguales o parecidos.

Para entender mejor estos conceptos y sus resultados, se pone un ejemplo sencillo. Supongamos que calculamos estas variables estadísticas sobre un poliedro regular como un icosaedro, en el que todas sus longitudes de cuerda, áreas, ángulos centrales y superficiales son iguales, incluso todos sus vértices están distribuidos de forma uniforme sobre la esfera; entonces los resultados que obtendríamos serían de una varianza de cero y una desviación estándar de cero, puesto que no existe

ninguna irregularidad en un icosaedro. Sin embargo, cuando subdividimos este poliedro estos resultados cambian como veremos a continuación.

Intuitivamente, cabría esperar que los esquemas con mejor rendimiento deben de tener desviaciones estándar y varianzas más bajas, pero no siempre ocurre esto. Encontramos esquemas excelentes con desviaciones algo elevadas, que marcan diferencias más pronunciadas en los acordes que crean.

A continuación, se muestran los resultados del análisis de igualdad de elementos; para el ejemplo se ha utilizado un icosaedro regular como poliedro base y una subdivisión en frecuencia 8 de diámetro unitario de 1 metro, para obtener suficientes resultados que comparar, y se han aplicado todos los métodos desarrollados.

ANÁLISIS DE UNIFORMIDAD DE LA LONGITUD DE CUERDA								
Esquema	Nº de elementos estructurales		Elementos de longitud única	Longitud elementos (m)		Ratio cortos/largos	Varianza	Desviación estándar
	En un PPT o LCD	En toda la esfera		Más corto	Más largo			
Clase 1								
Cuerdas iguales	108	1920	20	0,119459	0,164647	72,55%	1,13E-04	1,06E-02
Arcos iguales (2GC)	108	1920	44	0,132679	0,176238	75,28%	1,29E-04	1,14E-02
Arcos iguales (3GC)	108	1920	17	0,138283	0,162173	85,27%	5,37E-05	7,33E-03
Medios arcos	108	1920	15	0,138283	0,164647	83,99%	9,60E-05	9,80E-03
Clase 2								
Triacon	56	1440	8	0,011174	0,013765	81,18%	1,77E-04	1,33E-02

Tabla 2. Análisis de uniformidad de la longitud de cuerda.

ANÁLISIS DE UNIFORMIDAD DE LAS ÁREAS DE LOS TRIÁNGULOS								
Esquema	Nº de elementos		Elementos de área única	Áreas triángulos (m2)		Ratio cortos/largos	Varianza	Desviación estándar
	En un PPT o LCD	En toda la esfera		Área menor	Área mayor			
Clase 1								
Cuerdas iguales	64	1280	15	0,00678	0,011738	57,76%	1,60E-06	1,27E-03
Arcos iguales (2GC)	64	1280	35	0,00807	0,011102	72,69%	6,94E-07	8,33E-04
Arcos iguales (3GC)	64	1280	15	0,009083	0,010308	88,12%	9,66E-08	3,11E-04
Medios arcos	64	1280	15	0,009083	0,011738	77,38%	7,06E-07	8,41E-04
Clase 2								
Triacon	32	960	4	0,011174	0,013765	81,18%	8,55E-07	9,25E-04

Tabla 3. Análisis de uniformidad de las áreas de los triángulos.

En la Tabla 3. Análisis de uniformidad de la longitud de cuerda se han expuesto los resultados obtenidos del análisis estadístico de la longitud de cuerda, que quizás sea uno de los datos más importantes a la hora de obtener un diseño óptimo de las cúpulas geodésicas. En la tabla se ha incluido el número cuantitativo de elementos estructurales (elementos barra) resultantes de aplicar cada método, sobre un Triángulo poliédrico principal (PPT) para Clase 1 o sobre un Triángulo de Schwarz (LCD) para la clase 2. Además, se incluyen cuántos de estos elementos poseen una longitud

única; cuanto menor sea este dato, más óptima será su fabricación. También se ha analizado la longitud del elemento más corto y del más largo, para hallar cuál es la variación porcentual del mismo. Finalmente, para completar el análisis se ha calculado la varianza de estas longitudes y su desviación estándar.

De la Tabla 3. podemos obtener las siguientes conclusiones por método:

- Cuerdas Iguales. En relación a su poca complejidad de aplicación los resultados son muy aceptables. Con solo 20 elementos diferentes y con una uniformidad de las longitudes ocupa el tercer puesto. Esta técnica podría ser potencialmente aplicable en domos de frecuencia y tamaño bajos.
- Arcos Iguales – Dos grandes Círculos. Los elementos diferentes son totalmente excesivos, y hacen impracticable su aplicación, independientemente de ello su variancia y desviación dan peores resultados que incluso el método de Cuerdas Iguales. Este método quedará descartado para la industrialización de domos.
- Arcos Iguales – Tres Grandes Círculos. El número de elementos únicos se reduce notablemente a 17, quedando en el tercer puesto en esta categoría. Pero por lo que destaca este método es por tener la menor diferencia de la longitud de cuerda entre sus elementos, y por los mejores resultados de la varianza y desviación estándar. Lo que quiere decir que este es el método con mejor uniformidad de sus vértices. Es potencialmente el método a elegir, por ser el que tiene mejores datos en su número de elementos únicos.
- Medios Arcos. Tiene el mejor dato en número de elementos únicos dentro de la subdivisión de Clase 1; esto le da la mejor ventaja entre los demás, aunque sus datos son ligeramente peores en uniformidad y variación de su media de longitud de elementos que el método de Arcos Iguales – 3GC. No se puede confirmar a priori cuál de los dos métodos es mejor; esto se descubrirá en los siguientes análisis.
- Triacon. Sin duda, tiene el mejor dato en optimización de su fabricación, con tan solo 8 elementos únicos es capaz de configurar una estructura geodésica de frecuencia V8. Sus datos de uniformidad están por detrás de Arcos Iguales 3GC y Medios arcos. Se demostrará en el análisis económico cuál es el mejor candidato de estos tres métodos potenciales.

Tras este primer análisis de sus datos de longitudes de cuerda se observa que tenemos 3 métodos potenciales de aplicación: Arcos Iguales – 3GC, Medios Arcos y Triacon. Esos métodos serán llevados

al análisis económico, donde se estimarán sus tiempos de fabricación y consecuentemente sus costes para poder definir la mejor opción.

En la tabla 4 se ha analizado la uniformidad de las áreas de los triángulos; este aspecto también es fundamental para la construcción de una cúpula geodésica, aunque realmente tiene poco efecto en cuanto a la mejora de fabricación de la estructura, pero sí tiene un gran efecto en la fabricación de los elementos de cerramiento, que debido a que la superficie de cubierta es muy extensa, constituye una parte muy importante dentro del presupuesto de ejecución de un domo.

Se muestran las conclusiones de la Tabla 4 sobre análisis de uniformidad de las áreas de los triángulos

- Cuerdas Iguales. El número de triángulos con áreas iguales en este caso se ha igualado al resto de métodos competidores de Clase 1, excepto que la variación entre el mayor y el menor es mucho más acusada. Los valores de varianza en este caso nos ofrecen el peor resultado, sin embargo, sigue siendo un método aceptable técnicamente para estructuras con baja frecuencia y tamaño.
- Arcos Iguales – Dos Grandes Círculos. Los elementos de área única se han disparado a 35. Estos resultados simplemente nos corroboran lo concluido en el anterior análisis. Es un método que queda descartado para su aplicación. Aunque en este caso, nos ofrece mejores datos de uniformidad que el método de Cuerdas Iguales.
- Arcos Iguales – Tres Grandes Círculos. Presenta la mayor uniformidad de sus triángulos e igualdad respecto al de Medios-Arcos en cuanto a número de elementos únicos. Continúa siendo una opción potencial.
- Medios Arcos. Sus datos son aproximadamente semejantes a Arcos Iguales – 3GC, presentando una mayor dispersión de los datos; la variación es breve y aceptable.
- Triacon: De nuevo presenta un dato disruptivo frente al resto; con sólo 4 triángulos diferentes constituye una subdivisión distribuida en 960 elementos. Esto es absolutamente ventajoso frente al resto de métodos, aunque sus datos de uniformidad sean inferiores.

Tras todo lo expuesto, el análisis refleja que bajo los condicionantes de uniformidad en la longitud de cuerda y en las áreas de los triángulos el mejor método para aplicar sería el Triacon por su número tan reducido de elementos únicos, seguido de Medios Arcos y Arcos Iguales – 3GC.

2.1.2. ANÁLISIS CUANTITATIVO

El análisis cuantitativo de cúpulas geodésicas va a consistir en medir la cantidad de elementos que tiene cada sistema en función de la frecuencia de subdivisión y del poliedro básico aplicado, para tratar de tener datos sobre qué sistema y poliedro es el más eficiente en cuanto a sus elementos resultantes. Esto es así puesto que encontrar sistemas suficientemente mallados con el menor número de elementos nos permitirá ahorrar directamente en el coste de material de la estructura incidiendo en la forma de su distribución.

Por lo tanto, se ha realizado un recuento de caras, aristas y vértices tienen los poliedros subdivididos en las frecuencias V2, V4, V8 y V16. Se han elegido frecuencias pares para que puedan ser aplicados todos los métodos, ya que las impares no son aptos para Clase 2. Para este análisis no es necesario distinguir entre los diferentes métodos de Clase 1, puesto que todos ellos ofrecen como resultado el mismo número de elementos. Por lo tanto, la distinción en este análisis es determinar el poliedro básico que nos ofrece más posibilidad de ahorro de material con un determinado grado de mallado y también nos permitirá comparar qué Clase de subdivisión es más óptima.

Como poliedros básicos regulares aplicaremos el Tetraedro, Octaedro e Icosaedro. Antes de mostrar los datos de las subdivisiones, primero mostraremos los datos de caras, aristas y vértices de los poliedros sin dividir.

Deltaedro	Caras	Aristas	Vértices
Tetraedro	4	6	4
Octaedro	8	12	6
Icosaedro	20	30	12

Tabla 4. Caras, Aristas y Vértices de los poliedros regulares aplicables.

Frecuencia	Clase	Nº Triángulos	Tetraedro			Octaedro			Icosaedro		
			Caras	Aristas	Vértices	Caras	Aristas	Vértices	Caras	Aristas	Vértices
2	1	4	16	24	10	32	48	18	80	120	42
	2	3	12	18	8	24	36	14	60	90	32
4	1	16	64	96	34	128	192	66	320	480	162
	2	12	48	72	26	96	144	50	240	360	122
8	1	64	256	384	130	512	768	258	1280	1920	642
	2	48	192	288	98	384	576	194	960	1440	482
16	1	256	1024	1536	514	2048	3072	1026	5120	7680	2562
	2	192	768	1152	386	1536	2304	770	3840	5760	1922

Tabla 5. Datos del análisis cuantitativo.

Del análisis cuantitativo se obtienen las siguientes conclusiones:

- Para una frecuencia y un poliedro dados, el mallado de clase 1 crea el mayor número de piezas, mientras que el de clase 2 crea alrededor de un 25% menos. Esta diferencia es significativa.
- La elección del poliedro principal influye significativamente sobre el número de piezas que se obtienen como resultado de la subdivisión. Observamos que el tetraedro es el poliedro que ofrece menor número de piezas a una determinada frecuencia, seguido por el octaedro y por último el icosaedro. Esto no implica que el icosaedro sea la peor opción por incrementar el uso del material, porque para frecuencias bajas un mallado poco denso de los otros sólidos puede no hacer apta la estructura para determinados usos puesto que puede no cumplir ciertos requisitos funcionales.
- Se observa que el incremento de frecuencia hace aumentar el número de piezas como una potencia, normalmente al cuadrado. Este rápido incremento influye en que la mayoría de cúpulas geodésicas tienden a utilizar frecuencias bajas, por el ahorro significativo de material. Por lo que se buscará cumplir los requisitos funcionales con la menor frecuencia.

2.2. CONDICIONANTES DE LAS FRECUENCIAS IMPARES

Antes de la asignación de un método como el más óptimo e ideal para su utilización, hay que recordar que no todos los métodos son aplicables para frecuencias impares, como ocurre con el método Triacon y el de Medios Arcos, que son dos de los métodos más óptimos y uniformes. Por lo que, para frecuencias impares tan comunes en el sector de las cúpulas geodésicas como el V1, V3 o V5 deberán de ser calculados necesariamente con los métodos de Cuerdas Iguales, Arcos Iguales – 2GC o Arcos Iguales – 3GC.

Sin embargo, no sólo es que hay métodos que no son aplicables a las frecuencias impares, es que los métodos que sí se pueden aplicar no ofrecen resultados satisfactorios en las subdivisiones impares. Esto se debe a que ninguna fila de triángulos coincide con el ecuador de la esfera, y da como resultado una **desalineación de la base**; es decir, que al subdividir el domo nos dan diferentes puntos de elevación de las piezas en contacto con la base. Eso supone, y ha supuesto a lo largo de la historia de evolución tecnológica de las cúpulas geodésicas la fuente de infinidad de problemas constructivos por una mala praxis en la concepción del diseño de la estructura.

Esto sucede porque en las figuras de frecuencia impar creadas a partir de cualquier método aplicable de Clase 1, siempre habrá que elegir una versión que sea o más grande o más pequeña que media esfera, cuya porción de esfera sea 7/12 o 5/12 respectivamente, puesto que la distribución de

triángulos impar no permite que ninguna fila quede justo en el ecuador de la esfera, es decir, no es posible obtener una porción de esfera de $\frac{1}{2}$ con una frecuencia V3.

Mientras que en domos con frecuencia par si existe la posibilidad de conformar la figura con una porción de esfera $\frac{1}{2}$, cuya base coincidiría exactamente con el ecuador de la esfera. En la siguiente ilustración se puede comprobar las porciones de esfera en distintas frecuencias pares e impares.

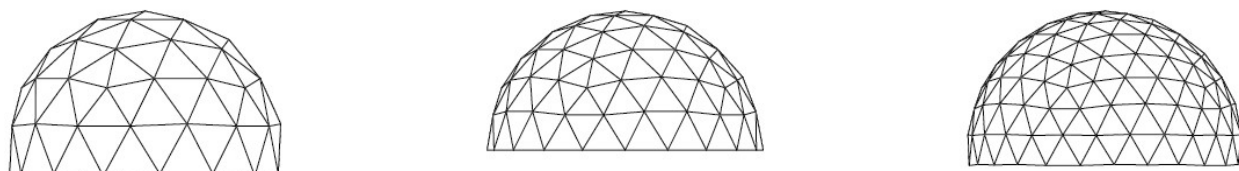


Ilustración 32. Porciones de esfera diferentes en los domos: V3, V4 y V5.

Todo lo expuesto anteriormente conlleva al siguiente problema; y es que en las figuras generadas con el método de Clase I cuya frecuencia es impar, ya sea una porción de esfera mayor o menor a la mitad de la esfera, **sus elementos resistentes no configuran una base alineada**, ya que existen diferencias de elevación de los elementos de la base. Este condicionante, puede generar problemas complejos de ejecución en obra, y es por ello que se debe de optar por diseños que permitan que las frecuencias impares dispongan de base alineada en su distribución. Se muestra a continuación imágenes de cúpulas de frecuencia impar V3 y V5 de menos de media esfera, donde se destaca la desalineación de su base:



Ilustración 33. Base desalineada en frecuencias impares. V3 y V5.

Este condicionante propio de las figuras geodésicas genera que para que sean útiles las frecuencias impares se deben de realizar unos ajustes o unos pasos adicionales que alineen la base y no tener problemas relacionados con el apoyo de la estructura sobre la cimentación.

Para la alineación de la base, basta con hallar aquellos puntos que quedan desalineados sobre la base de la estructura, ya sea sobre los $\frac{5}{12}$ o $\frac{7}{12}$ de la esfera. La alineación consiste simplemente en igualar la elevación de estos puntos a la elevación de la base, independientemente del método, se puede trazar una línea desde un vértice hasta el contiguo en el mismo plano con la elevación deseada.

Esto no solo cuenta como un paso adicional más a la hora de aplicar el método, sino que también nos produce variaciones en las uniformidades de los métodos creados.

Tras la experiencia, de los tres métodos aptos para frecuencias impares: Cuerdas Iguales, Arcos Iguales 2GC y Arcos Iguales 3GC, con base alineada se mantienen las características de los mismos, pero añadiendo 2 piezas más diferentes en la estructura, lo que vuelve algo ineficiente a este tipo de frecuencias con respecto a las pares. Sin embargo, la aplicación de estos pasos adicionales permite que los domos de frecuencias impares sean excluidos de complejidades constructivas poco prácticas. Solo algunos autores como Kruschke han podido poner remedio a este gran inconveniente de la subdivisión de cúpulas geodésicas.

2.3. CONDICIONANTES DEL USO DE TETRAEDROS Y OCTAEDROS

En primer lugar, cabe destacar que no existe ninguna problemática práctica para la construcción de cúpulas cuyo poliedro de origen sea el tetraedro o el octaedro, sin embargo, se detallarán algunas de las desventajas que estos presentan en comparación con el uso del icosaedro.

Si utilizamos el tetraedro como figura de origen de nuestros cálculos geométricos apreciaremos que ninguna de sus frecuencias ofrece un ecuador natural, es decir, no se podría obtener bajo ninguna combinación de subdivisiones una porción de esfera de $\frac{1}{2}$. Esto no sucede cuando se hacen subdivisiones de triángulo pares en el icosaedro o con el octaedro en cualquier tipo de subdivisión sea par o impar.

A priori, puede parecer que el octaedro es el mejor candidato para generar cúpulas geodésicas puesto que sus combinaciones siempre acabarán con una base alineada y una porción de esfera de justo la mitad. Sin embargo, para conseguir estructuras con cierta rigidez se deberá de acometer subdivisiones de mayor grado, dado que el octaedro se asemeja menos a una esfera que un icosaedro, y para obtener el efecto esfera se deberá de recurrir a frecuencias más elevadas. Este hecho implica que se requerirá mayor número de piezas de diferente longitud, puesto que, si aumentamos la frecuencia, también aumenta el número de tipos de elementos a emplear, y esto encarece los costes de fabricación y de ejecución.

Finalmente, se concluye que generar figuras a partir del icosaedro significa el uso más óptimo de las cúpulas geodésicas, porque podremos obtener cúpulas geodésicas con curvaturas próximas a una esfera con frecuencias bajas, es decir, con pocos tipos de triángulos. Por ejemplo, para obtener una frecuencia en V3, solo se requieren 3 tipos de triángulos de dimensiones diferentes, este número tan bajo proporciona una facilidad de fabricación y construcción frente al uso de las figuras del octaedro y tetraedro, y, por tanto, el uso eficiente de los recursos de la construcción desde su diseño.

Aunque realmente es difícil encontrarse estructuras de base octaédrica en la realidad, se muestra a continuación una representación de lo que serían diferentes tipos de frecuencia de esta tipología:

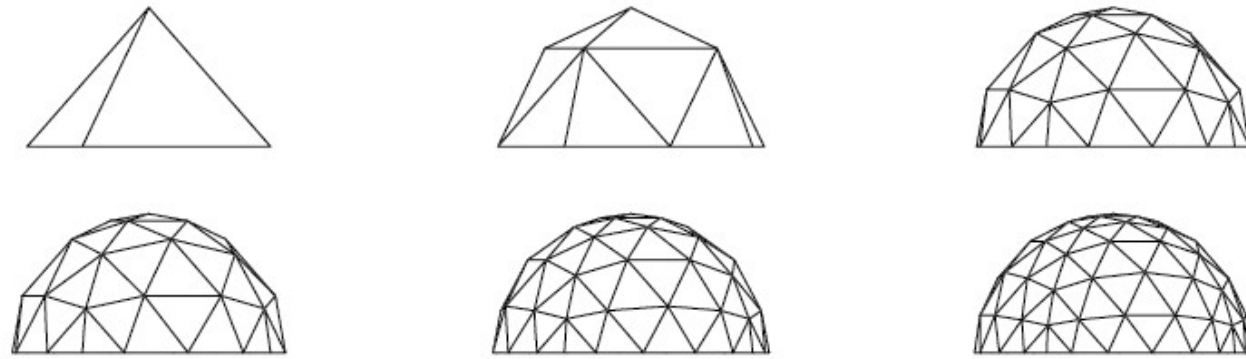


Ilustración 34. Figuras de origen octaédrico de frecuencias: V1, V2, V3, V4, V5 y V6.

3. CONCLUSIONES DE LOS MÉTODOS DE SUBDIVISIÓN

Hemos analizado que son muchos los factores que influyen en el diseño de una estructura geodésica, sobre todo cuando en el prediseño de esta se toman decisiones que son realmente influyentes en los resultados finales como la elección del poliedro de base o la elección de la frecuencia. Que solamente con la experiencia previa, se pueden tomar decisiones cuyos resultados sean previsibles, dado que las variaciones de los resultados en función de estos dos factores son significativamente diferentes.

Por tanto, para poder actuar con conocimiento en el prediseño, no se puede actuar de otro modo que realizando multitud de modelos básicos de cúpulas geodésicas aplicando diferentes métodos de subdivisión para diferentes frecuencias y diferentes poliedros de base. Son muchas las variables que entran en el diseño de una cúpula geodésica. Por lo que, realizar este estudio nos ha permitido ampliar el conocimiento en el diseño basado en los datos extraídos de estos modelos, y en el análisis estadístico realizado.

Con todo ello podemos afirmar que existen ciertos valores de las variables de diseño que son más ventajosas que otras para la construcción de estructuras geodésicas. No obstante, hasta este momento del proyecto solo hemos analizado la manera de crear las formas geodésicas más eficiente, ahora es el momento de exponer gráficamente estas formas geodésicas en el siguiente capítulo. Y posteriormente entraremos más en detalle en su procedimiento constructivo, condiciones de habitabilidad, cimentación, uniones, análisis estructural, etc., hasta definir por completo todos aquellos elementos que convertirían esta información geométrica en una estructura útil y competitiva frente a otro tipo de estructuras convencionales.

Tras el análisis de este capítulo, hemos podido comprobar que el uso de la figura poliédrica de base icosaedro es la que mayores ventajas tiene con respecto al resto, por tener la mejor distribución de sus vértices sobre la esfera.

Por otro lado, se ha comprobado que el método de Clase 2 Triacon, es el método mejor preparado para la industrialización de cúpulas geodésicas, por dos simples y obvias razones: la primera, es el ahorro estimado de un 25% de material estructural, esto puede suponer una gran reducción de sus costes con respecto al resto de sistemas; la segunda razón es por la reducción del número diferente de elementos distintos, lo cual reduce gran parte del tiempo de fabricación y por tanto, de su facilidad para ser construido, fabricado y montado. Por tanto, no cabe duda de que esta estructura podría ser más económica con respecto a las otras, sin embargo, estas diferencias no eliminan por completo el resto de alternativas, ya que por motivos estéticos y arquitectónicos las estructuras diseñadas con Clase 1 tienen una gran aceptación en el mercado, pese a ser más ineficientes.

Se podría destacar que la Clase 2 - Triacon, presenta ciertas dificultades en su montaje en obra, puesto que la parte de la estructura que está en contacto con la cimentación son solo unos cuantos vértices, y en el caso de Clase 1, es toda la longitud de la arista de los triángulos de la fila inferior la que apoya sobre la base, eso facilita labores de apoyo de la estructura y de su anclaje a la misma, y distribuye mejor los esfuerzos sobre mayor número de elementos. Sin embargo, analizaremos el detalle de esta cuestión en el capítulo 7 de análisis estructural. Observamos un ejemplo de esta diferencia en la siguiente ilustración:

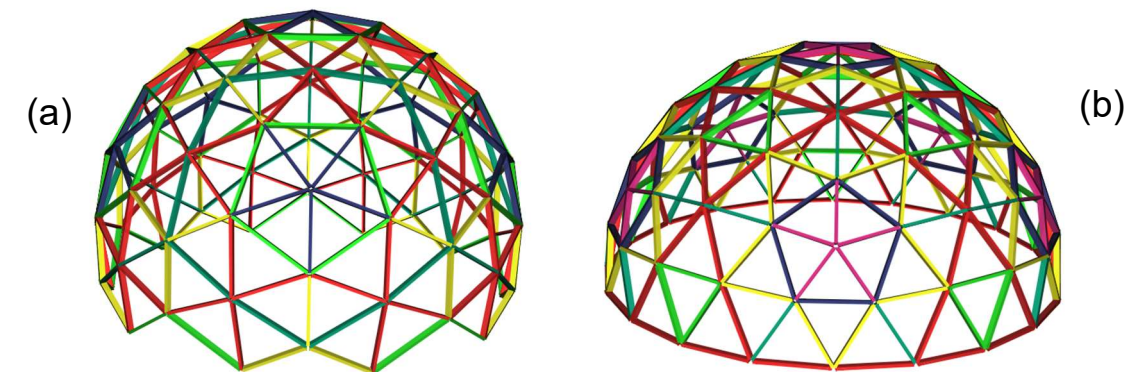


Ilustración 35. Forma de la base de un domo de Clase 2 Triacon(a) frente a un domo de Clase 1(b).

Finalmente, se concluye que un domo geodésico con base icosaédrica con subdivisión clase 2 de Triacon, con una frecuencia baja, probablemente una frecuencia 4, podría ser la forma geodésica más óptima para salvar luces de 10 a 15 m, lo que significa un radio de esfera de entre 5 y 7,5 m. Y que siempre se tenderá a diseñar la frecuencia más baja posible que cumpla con los requisitos que comprobaremos en los siguientes capítulos.

ANEJO 03. PROPUESTA DE MODELOS ESTANDARIZADOS

DENOMINACIÓN	TITULACIÓN	MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
	PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).	
	CENTRO EDUCATIVO	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.

ÍNDICE

1. MODELOS básicos ESTANDARIZADOS DE CÚPULAS GEODÉSICAS	4
1.1. ESTANDARIZACIÓN FRECUENCIA 1	4
1.2. ESTANDARIZACIÓN FRECUENCIA 2	4
1.3. ESTANDARIZACIÓN FRECUENCIA 3	5
1.4. ESTANDARIZACIÓN FRECUENCIA 4	5
1.5. ESTANDARIZACIÓN FRECUENCIA 5	6
1.6. ESTANDARIZACIÓN FRECUENCIA 6	7
2. RESUMEN DE MODELOS ESTANDARIZADOS	7
ANEXO 1: PLANOS DE MODELOS ESTANDARIZADOS	8

Listado de ilustraciones

Ilustración 1. A la izquierda, un Icosaedro V1 3/4 y a la derecha, un Octaedro V1 1/2.	4
Ilustración 2. Icosaedro V2 Clase 1 (a) e Icosaedro V2 Clase 2 (b).....	5
Ilustración 3. Octaedro V2 Clase 1 (a) y Octaedro V2 Clase 2 (b).....	5
Ilustración 4. Icosaedro V3 Clase 1 5/12 (a) e Icosaedro V3 Clase 1 7/12 (b).....	5
Ilustración 5. Octaedro V3 Clase 1 1/2.	5
Ilustración 6. Icosaedro Clase 1 V4 - Medios Arcos.	6
Ilustración 7. Icosaedro Clase 2 V4 - Triacon.	6
Ilustración 8. Icosaedro Clase 1 V5 7/20 - Arcos Iguales 3GC.....	6
Ilustración 9. Icosaedro Clase 1 V5 9/20 - Arcos Iguales 3GC.....	6
Ilustración 10. Icosaedro Clase 1 Frecuencia 6 - Medios arcos.....	7
Ilustración 11. Icosaedro Clase 2 Frecuencia 6 - Triacon.	7

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Listado de modelos básicos desarrollados.	4
---	---

1. MODELOS BÁSICOS ESTANDARIZADOS DE CÚPULAS GEODÉSICAS

Este anejo tratará de cumplir con uno de los hitos del proyecto, la creación de una gran variedad de modelos básicos estandarizados de cúpulas geodésicas. La información que se recoge en este anejo es el resultado de la aplicación de los sistemas de subdivisión desarrollados en el anejo 2, para crear un catálogo de modelos básicos de diferentes cúpulas geodésicas lo más eficientes posibles.

Estos modelos se crearán sin ninguna información específica en cuanto a las dimensiones de los domos, pues el objeto principal es poseer archivos de modelos tridimensionales en CAD de cúpulas de diferentes características. Esta información básica será la base geométrica de futuros proyectos donde se escalará esta geometría al tamaño y dimensiones requeridas de cada proyecto con condicionantes reales arquitectónicos y estructurales.

Por tanto, no se tendrá en cuenta nada más que la geometría geodésica, sin entrar en detalles como las aperturas para la creación de puertas, ventanas, tipo de uniones, etc., en lo que profundizaremos a partir del siguiente anejo con la creación de varias cúpulas geodésicas lo suficientemente detalladas para su construcción, elegidas de entre la gran variedad que se va a exponer a continuación.

En la siguiente tabla se muestra el listado de domos geodésicos que se reconocen de interés y que serían posibles candidatas de formas geodésicas a tener en cuenta para el diseño de un proyecto constructivo estandarizado. Para la definición de cada una se han variado las variables principales como el poliedro de origen, el tipo de frecuencia y el método de subdivisión.

Numeración	Figura base	Frecuencia	Porción de esfera	Método de subdivisión
1	Icosaedro	V1	3/4	<i>Ninguno</i>
2	Octaedro	V1	1/2	<i>Ninguno</i>
3	Icosaedro	V2	1/2	<i>Medios Arcos</i>
4	Icosaedro	V2	1/2	<i>Triacon</i>
5	Octaedro	V2	1/2	<i>Medios Arcos</i>
6	Octaedro	V2	1/2	<i>Triacon</i>
7	Icosaedro	V3	5/12	<i>Arcos Iguales 3GC Alineada</i>
8	Icosaedro	V3	7/12	<i>Arcos Iguales 3GC Alineada</i>
9	Octaedro	V3	1/2	<i>Arcos Iguales 3GC</i>
10	Icosaedro	V4	1/2	<i>Medios Arcos</i>
11	Icosaedro	V4	1/2	<i>Triacon</i>

Tabla 1. Listado de modelos básicos desarrollados.

A continuación, trataremos de justificar en líneas generales la asignación de las características presentadas para los modelos básicos a desarrollar, acompañado de imágenes 3D.

1.1. ESTANDARIZACIÓN FRECUENCIA 1

Los dos primeros modelos de frecuencia 1 de la tabla 1, se tratan de las figuras de los poliedros básicos del Icosaedro y el Octaedro; ha optado por no incluir al Tetraedro por considerarse ineficiente su distribución estructural. La frecuencia 1 se consigue sin aplicar ningún método de subdivisión, pues son simplemente los poliedros regulares de origen, los cuales subdividiremos de diferentes formas para conseguir el resto de modelos.

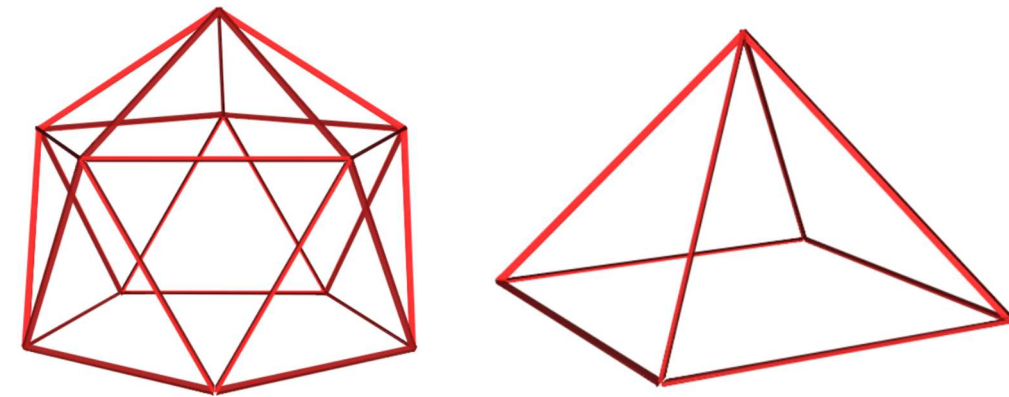


Ilustración 1.A a la izquierda, un Icosaedro V1 3/4 y a la derecha, un Octaedro V1 1/2.

1.2. ESTANDARIZACIÓN FRECUENCIA 2

Los siguientes cuatro modelos de la tabla 1 elegidos son modelos en frecuencia par V2, para las frecuencias pares no cabe duda de los métodos a utilizar, el más óptimo el Triacon, sin embargo, para una frecuencia tan baja como el V2 el Triacon no pone en evidencia sus ventajas, ya que existe el mismo número de elementos únicos aplicando el método de Medios Arcos y de Triacon. Se añaden ambos modelos porque podrían tener aplicaciones distintas como elementos de cubierta de dimensiones reducidas. Por otro lado, se le ha dado preferencia al sistema de Medios Arcos frente al de Arcos Iguales Tres Grandes Círculos porque ofrece un menor número de elementos únicos. Ambos modelos, Triacon Clase 2 y Medios Arcos Clase 1 considerados los más adecuados para la aplicación en estructuras de frecuencia par, se aplican tanto para icosaedro como para octaedro como se muestra a continuación. Por último, en frecuencia par siempre nos limitaremos a usar 1/2 de la porción de esfera, por considerar que si la base apoya en el ecuador geodésico es más eficiente para determinados sistemas constructivos como las uniones Good Kharma como veremos en anejos posteriores.

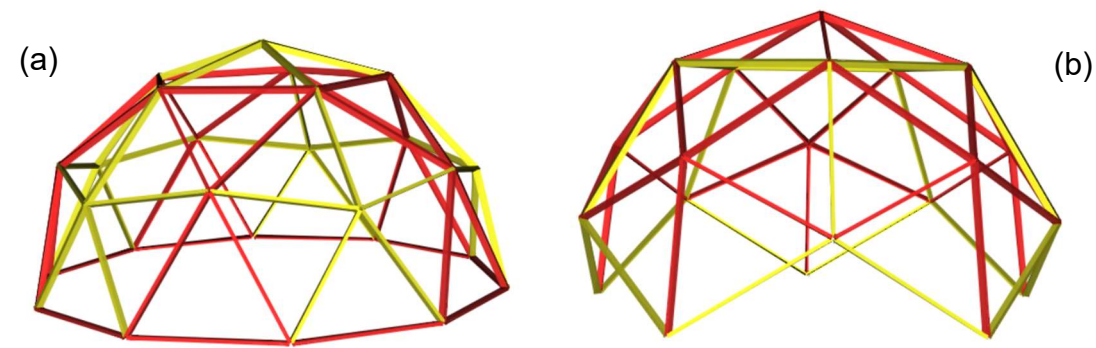


Ilustración 2. Icosaedro V2 Clase 1 (a) e Icosaedro V2 Clase 2 (b).

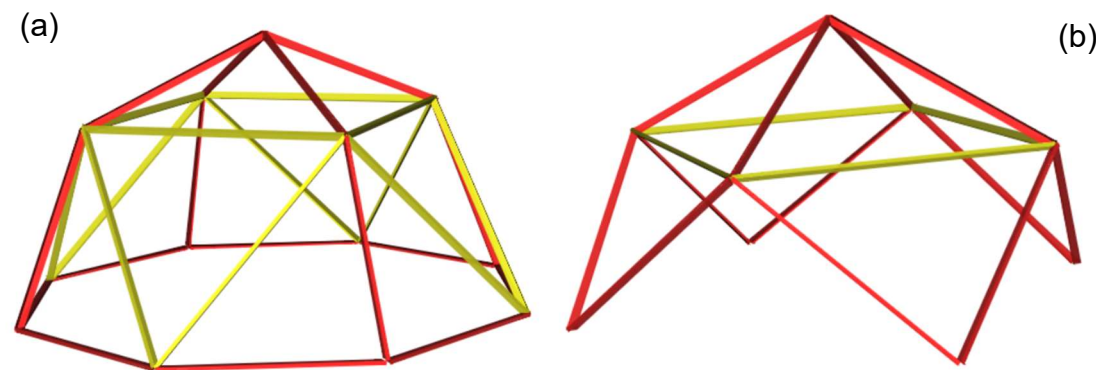


Ilustración 3. Octaedro V2 Clase 1 (a) y Octaedro V2 Clase 2 (b).

1.3. ESTANDARIZACIÓN FRECUENCIA 3

La primera frecuencia impar que requiere de subdivisión es la frecuencia 3, en este caso, nos encontramos el problema de la alineación de la base, y la imposibilidad de aplicar los métodos más eficientes como el Medios Arcos y Triacon. Es por ello, que recurrimos al tercer método más eficiente: Arcos Iguales 3 Grandes Círculos. Cabe destacar que la alineación de la base es totalmente necesaria para esta frecuencia, y que el método de Arcos Iguales 3GC ofrece el mismo número de elementos únicos que el modelo de Cuerdas iguales, siempre que ambos se les haya realizado el proceso de alineamiento de base. Sin embargo, se emplea 3GC debido a que la uniformidad de los puntos sobre la esfera es mejor, esto es útil a la hora de optimizar los elementos de cubierta, que suponen un coste considerable en la ejecución de esta estructura.

Otra variable que se incluye en esta frecuencia es que las filas de triángulos no empiezan ni terminan en el ecuador de la esfera y siempre tenemos que irnos al inmediato inferior o superior, como es el caso de las porciones de esfera 5/12 y 7/12, cuando empleamos el icosaedro como poliedro regular.

En el caso del Octaedro, cualquier frecuencia par o impar, por su naturaleza, la subdivisión siempre queda sobre el ecuador de la esfera.

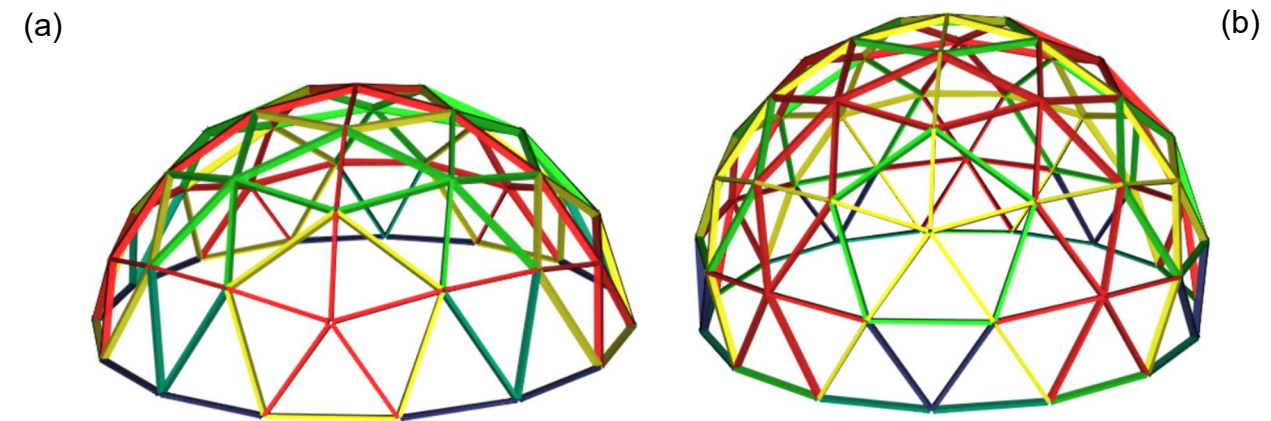


Ilustración 4. Icosaedro V3 Clase 1 5/12 (a) e Icosaedro V3 Clase 1 7/12 (b).

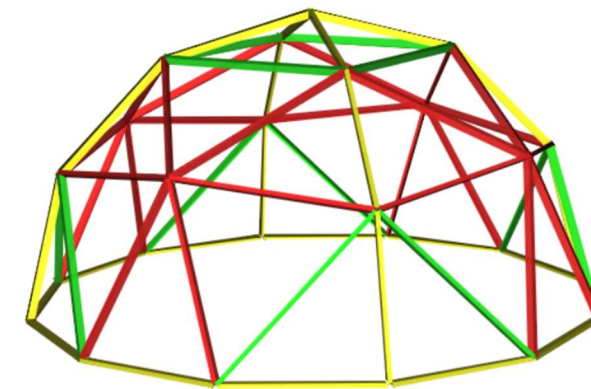


Ilustración 5. Octaedro V3 Clase 1 1/2.

1.4. ESTANDARIZACIÓN FRECUENCIA 4

La frecuencia 4, al ser par, el empleo del método de subdivisión no genera dudas, se emplea igualmente el método de Medios Arcos y Triacon. Sin embargo, hemos observado que la figura del Octaedro ya deja de ser óptima utilizarla para una frecuencia 4 o superior, y ponemos su límite de utilización en la frecuencia 3. Porque para igual densidad de elementos el octaedro en frecuencia 4 es menos óptimo que un icosaedro de una frecuencia menor V3, que tiene una distribución mejor y con mucho menos gasto de material y menores elementos únicos que el octaedro en V4.

Por lo que si se plantea la ejecución de un octaedro V4 podemos confirmar que un Icosaedro V3 presenta mejores ventajas técnicas y económicas con menor gasto de material.

Se muestran gráficamente los dos modelos de frecuencia cuatro más optimizados.

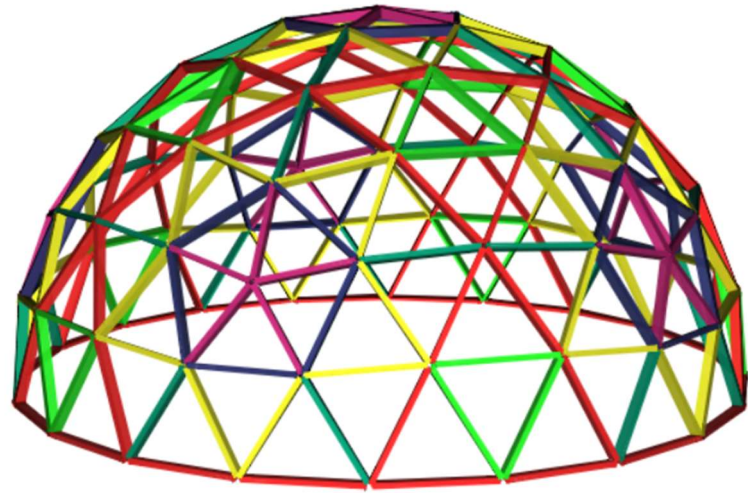


Ilustración 6. Icosaedro Clase 1 V4 - Medios Arcos.

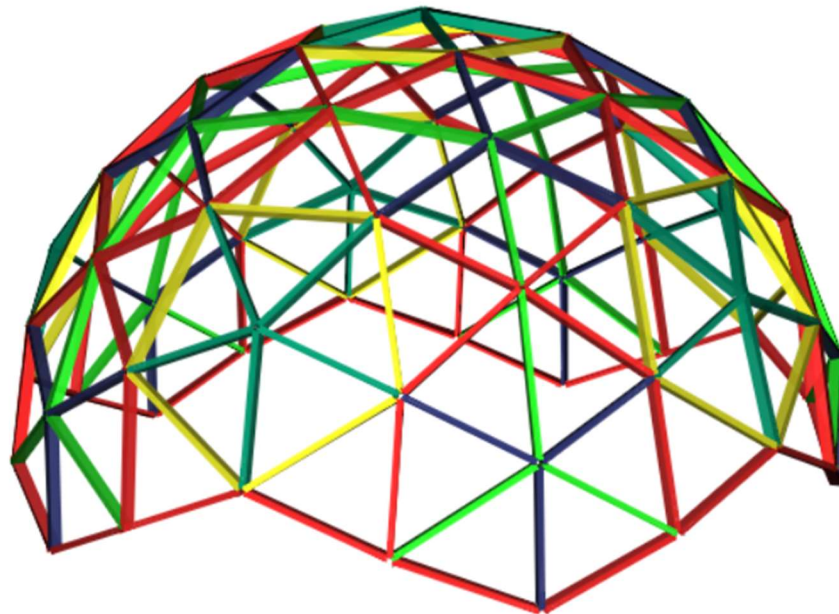


Ilustración 7. Icosaedro Clase 2 V4 - Triacon.

1.5. ESTANDARIZACIÓN FRECUENCIA 5

Como se ha comentado en el anterior epígrafe, el octaedro ha dejado de tener relevancia para frecuencias iguales o superiores a la 4, por lo que para una frecuencia impar el mejor método a utilizar es el de Arcos Iguales – Tres grandes Círculos con alineación de la base. Sin embargo, al aplicar este método se ha observado que la alineación de base de por sí, nos hace crear un mayor número de elementos únicos, lo que no sería óptimo para la industrialización. Por lo que, a partir de la frecuencia

5, en adelante, todas las impares siguientes no son formas geodésicas óptimas para construir estructuras, puesto que elegir una frecuencia par inmediatamente superior o inferior podría traernos resultados mucho más óptimos.

No obstante, en caso de desear ejecutar una frecuencia 5, por otras razones diferentes a la de crear un producto industrializado, se recomienda utilizar porciones de esfera de $7/20$ y $9/20$ que no alcancen el ecuador de la base. Como las imágenes que se muestran a continuación.

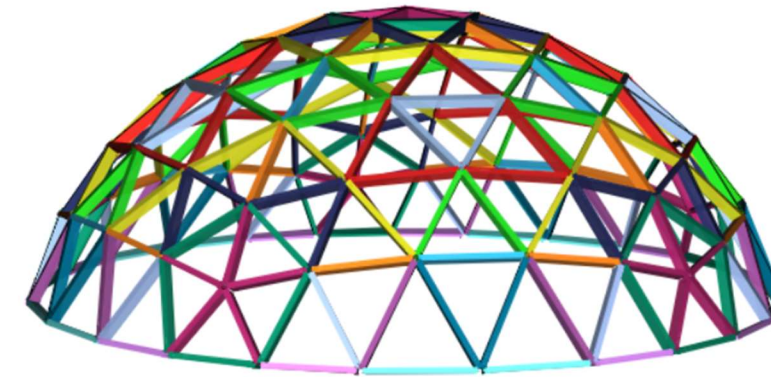


Ilustración 8. Icosaedro Clase 1 V5 $7/20$ - Arcos Iguales 3GC.

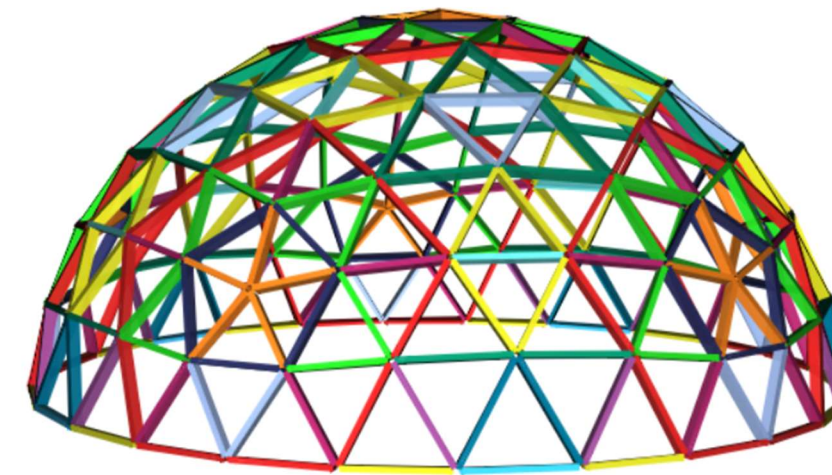


Ilustración 9. Icosaedro Clase 1 V5 $9/20$ - Arcos Iguales 3GC

Por estas razones, la frecuencia 5 y todas las impares en adelante, no se incluirán en el listado de cúpulas geodésicas estandarizadas de este proyecto, por los problemas de alineamiento de base que poseen y su corrección implicaría modificar los patrones regulares propios de aplicar los métodos de subdivisión, añadiendo un gran número de elementos únicos, que las hacen ser menos eficientes que las frecuencias pares.

1.6. ESTANDARIZACIÓN FRECUENCIA 6

La frecuencia 6, genera el límite de optimización de uso del método de Medios Arcos frente al método de Triacon, siendo el doble de eficiente en cuanto al uso de elementos únicos el método de Clase 2. Es decir, se requieren el doble de elementos diferentes en Medios Arcos que en Triacon para una frecuencia 6. Por lo que para frecuencias pares iguales o superiores a 6, siempre se recomienda el uso de esta técnica de clase 2. Aun así, se ilustran ambos modelos con el fin único de comparar resultado, pero a la hora de decidirse en su construcción, no habrá dudas por su viabilidad económica.

Las frecuencias superiores a la 6 podrían ser de aplicaciones para estructuras geodésicas de gran tamaño. Son capaces de soportar mayores luces con una configuración muy regular, pero con un gran número de elementos, aunque optimizados, que no tiene sentido aplicar para estructuras de mediano y pequeño tamaño.

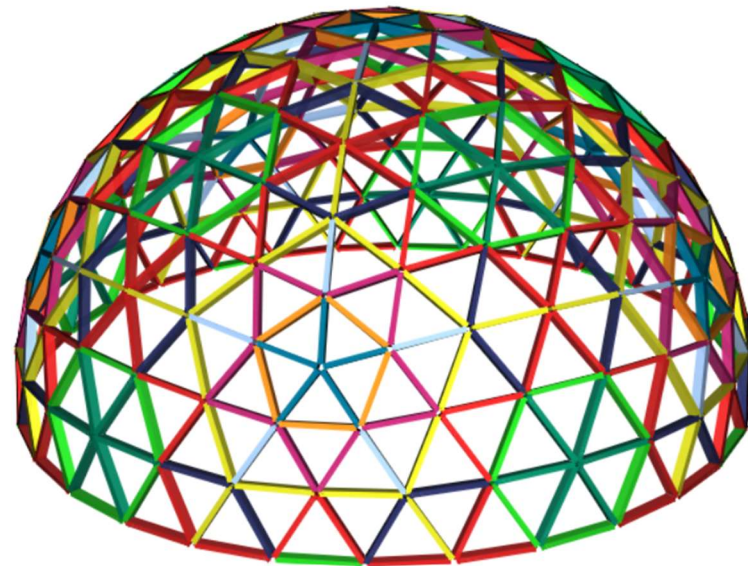


Ilustración 10. Icosaedro Clase 1 Frecuencia 6 - Medios arcos.

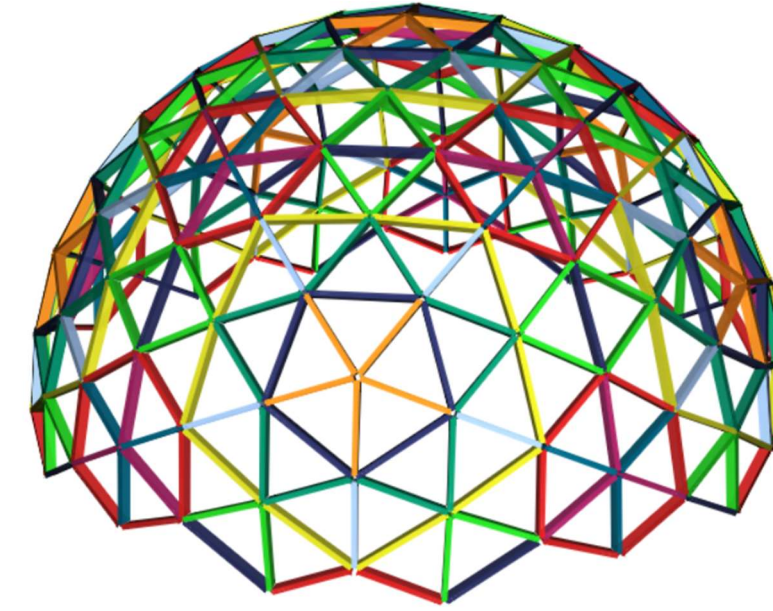


Ilustración 11. Icosaedro Clase 2 Frecuencia 6 - Triacon.

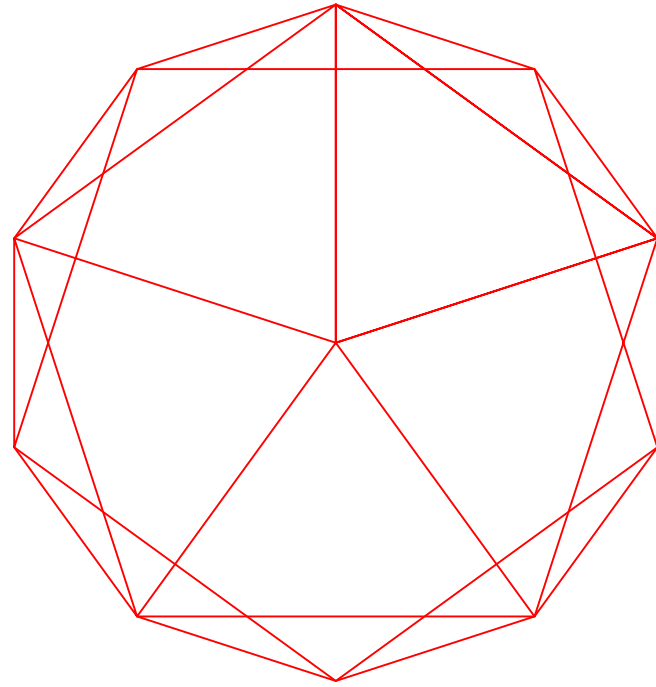
2. RESUMEN DE MODELOS ESTANDARIZADOS

Tras los estudios realizados en este anejo y en el anejo 02. Métodos y análisis de subdivisión de esferas se exponen a continuación un catálogo de modelos geodésicos estandarizados. Estos métodos contienen la información geométrica básica de diferentes tipos de cúpulas que son objeto de este proyecto y configuran los datos de partida de cualquier proyecto geodésico. Con ello, garantizamos que cualquiera de estos modelos geométricos es viable para su industrialización.

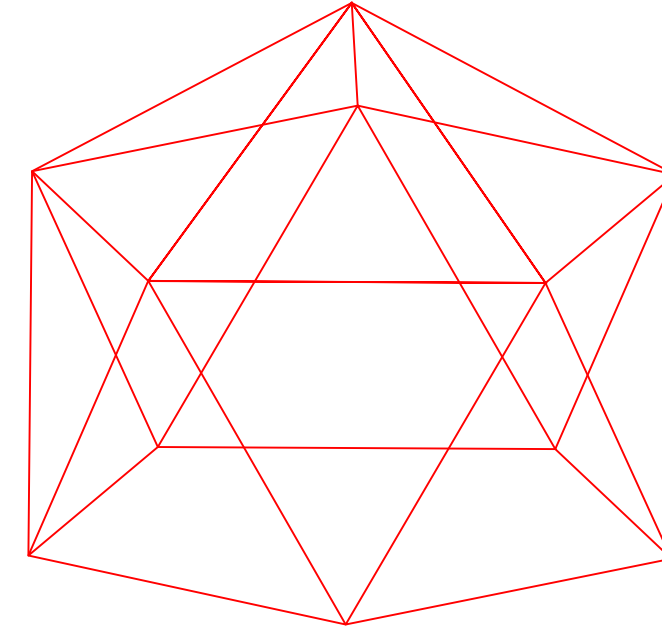
Se ha determinado cuál es el método de subdivisión más óptimo a aplicar para el diseño de diferentes tipos formas geodésica que habitualmente se construyen. Todos estos modelos contienen un radio unitario, es decir, el radio de la esfera es igual a 1 unidad, de manera que es fácilmente escalable al tamaño deseado. Posteriormente, se puede escoger cualquiera de estos modelos y adaptarlos al uso al que se desee e iniciar los procesos de diseño y análisis estructural y arquitectónico.

ANEXO 1: PLANOS DE MODELOS ESTANDARIZADOS

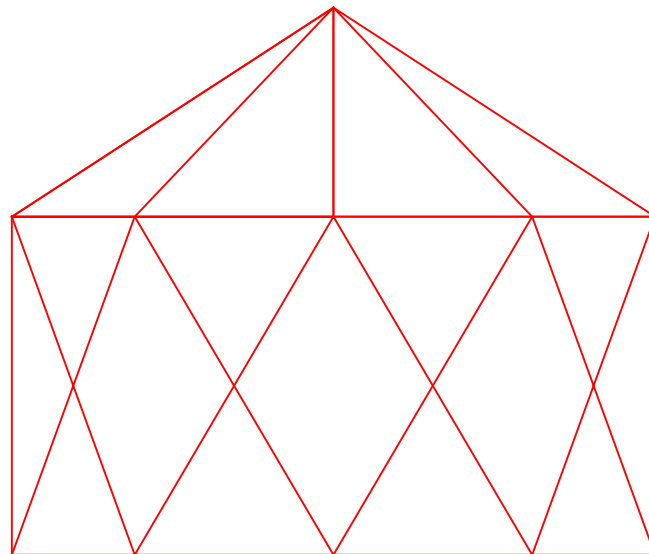
Vista en planta
Escala de vista: 1:20



Vista en 3D
Escala de vista: 1:20



Vista en alzado
Escala de vista: 1:20



CARACTERÍSTICAS GEODÉSICAS GENERALES

Poliedro base: Icosaedro
 Frecuencia: V1
 Porción de esfera: 3/4
 Método de subdivisión: Ninguno
 Nº Modelo: 01
 Radio unitario: 1 m

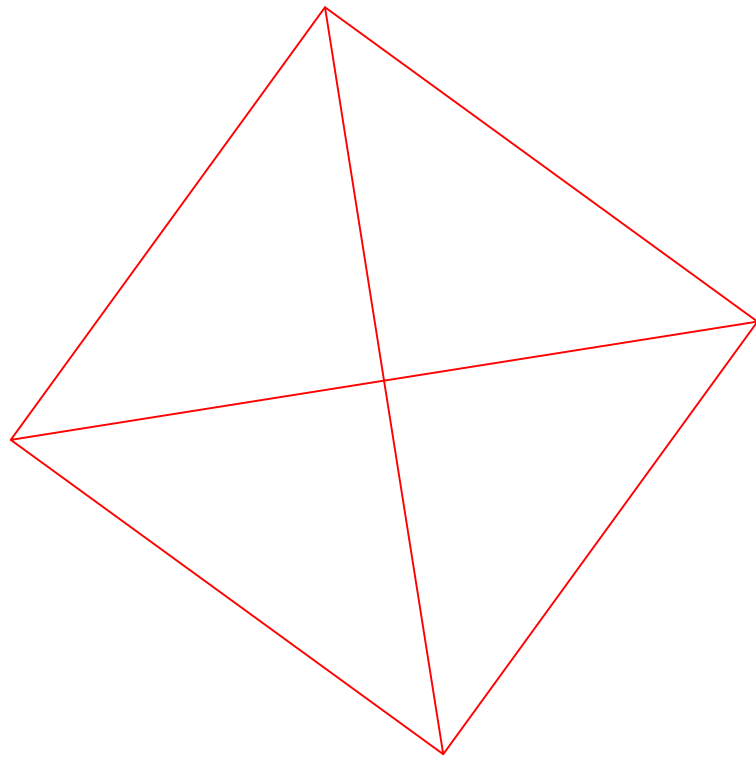
RESULTADOS

Nº de elementos únicos: 1
 Nº barras totales: 25
 Nº de triángulos totales: 15
 Longitud total de barras: 26,287 m
 Área de la cubierta: 7,182 m²
 Área de la base: 1,902 m²

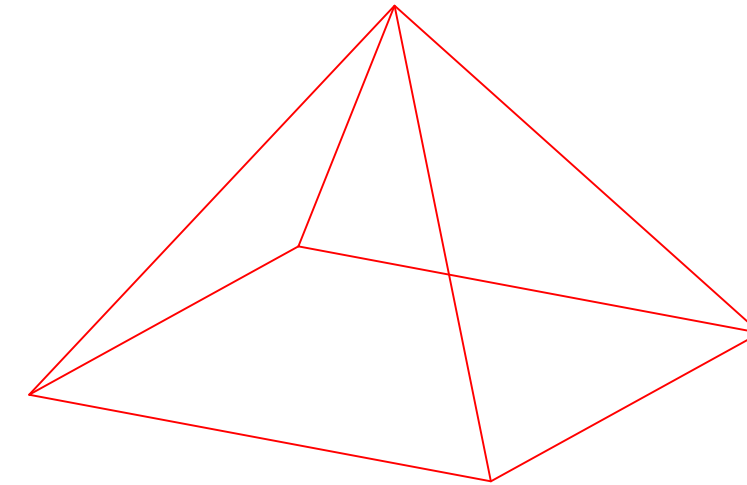
Nº	Barra tipo	Nº Piezas	Longitud (m)
A		25	1,0515

Nº	Triángulo	Nº Piezas	Área (m ²)
1		15	0,4788

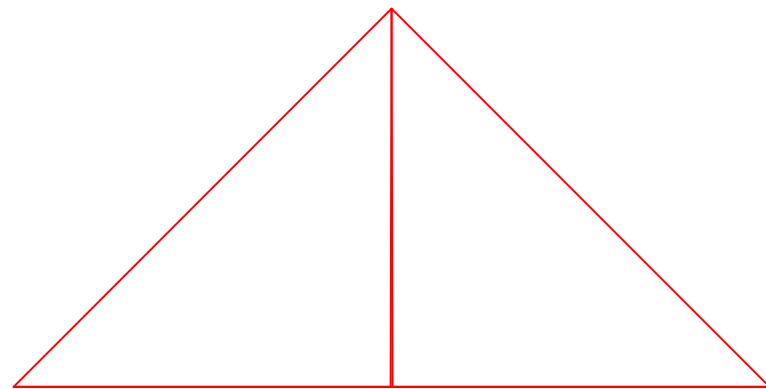
Vista en planta
Escala de vista: 1:20



Vista en 3D
Escala de vista: 1:20



Vista en alzado
Escala de vista: 1:20



CARACTERÍSTICAS GEODÉSICAS GENERALES

Poliedro base: Octaedro
 Frecuencia: V1
 Porción de esfera: 1/2
 Método de subdivisión: Ninguno
 Nº Modelo: 02
 Radio unitario: 1 m

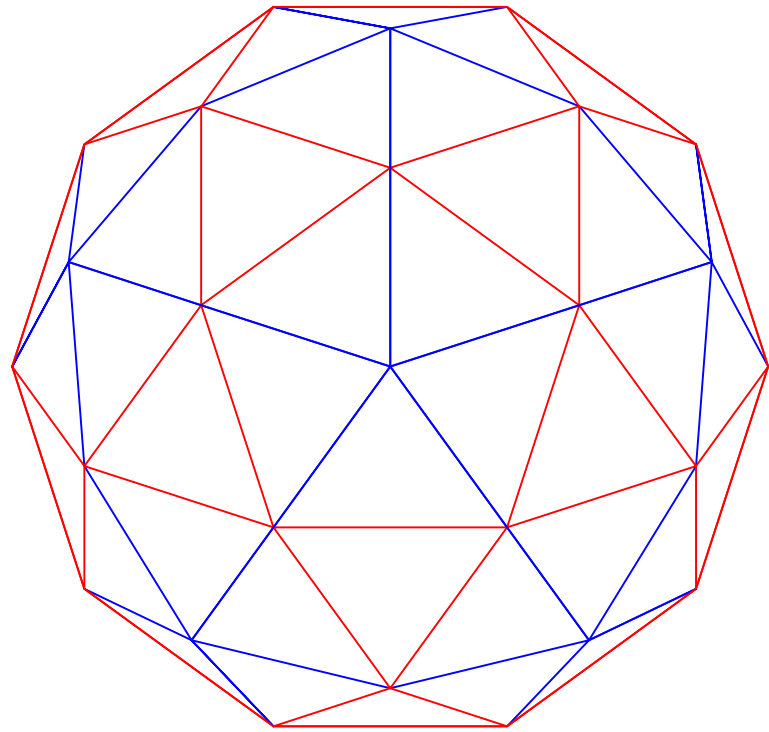
RESULTADOS

Nº de elementos únicos: 1
 Nº barras totales: 8
 Nº de triángulos totales: 4
 Longitud total de barras: 11,3136 m
 Área de la cubierta: 3,4640 m²
 Área de la base: 2,00 m²

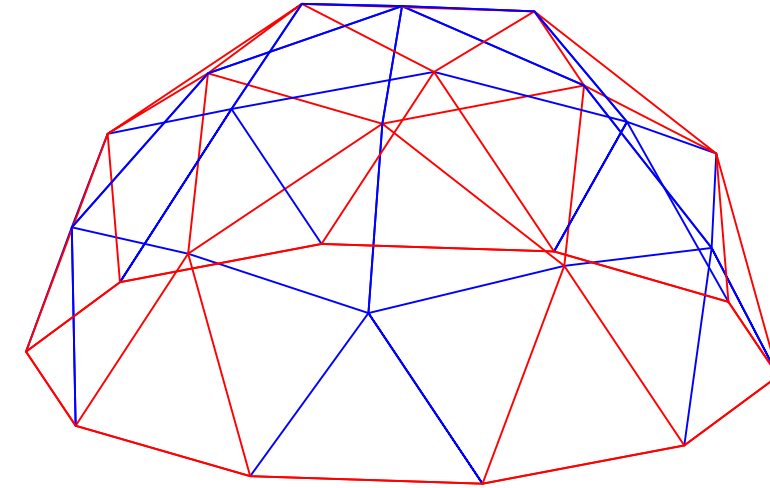
Nº	Barra tipo	Nº Piezas	Longitud (m)
A		8	1,4142

Nº	Triángulo	Nº Piezas	Área (m ²)
1		4	0,8660

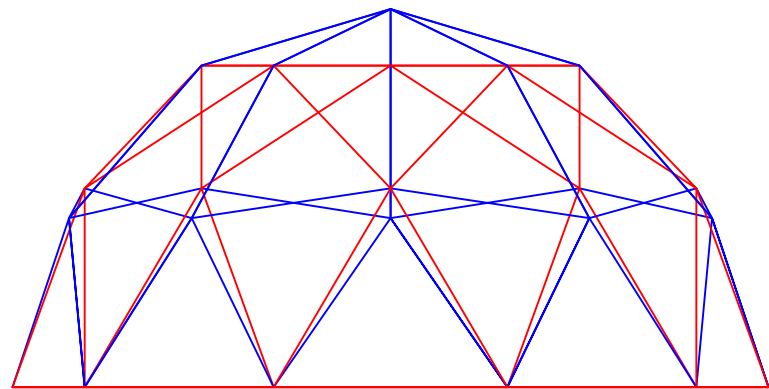
Vista en planta
Escala de vista: 1:20



Vista en 3D
Escala de vista: 1:20



Vista en alzado
Escala de vista: 1:20







CARACTERÍSTICAS GEODÉSICAS GENERALES

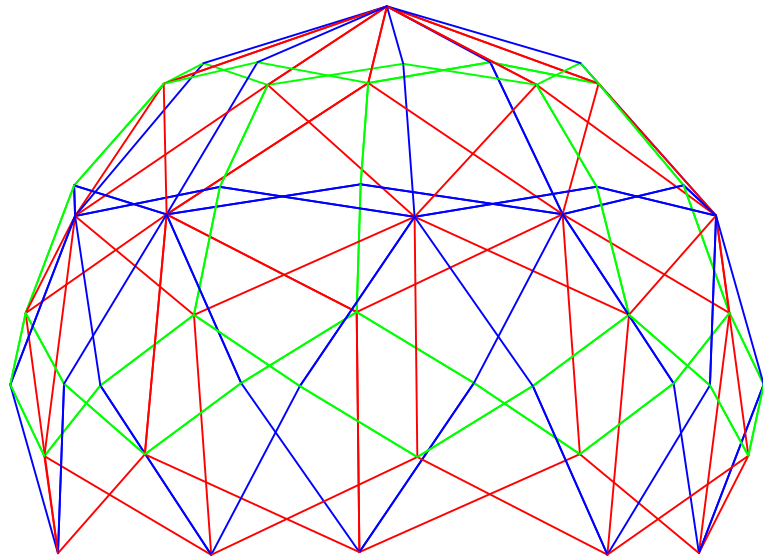
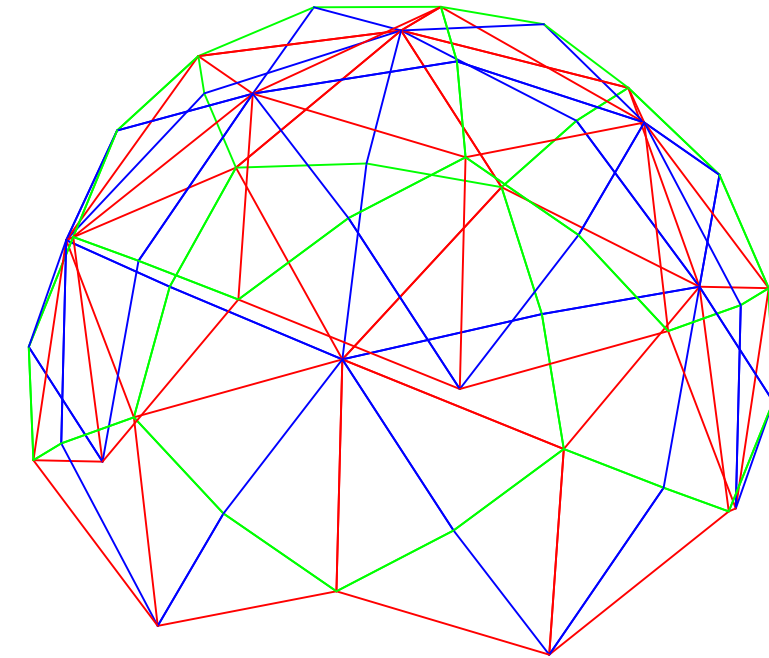
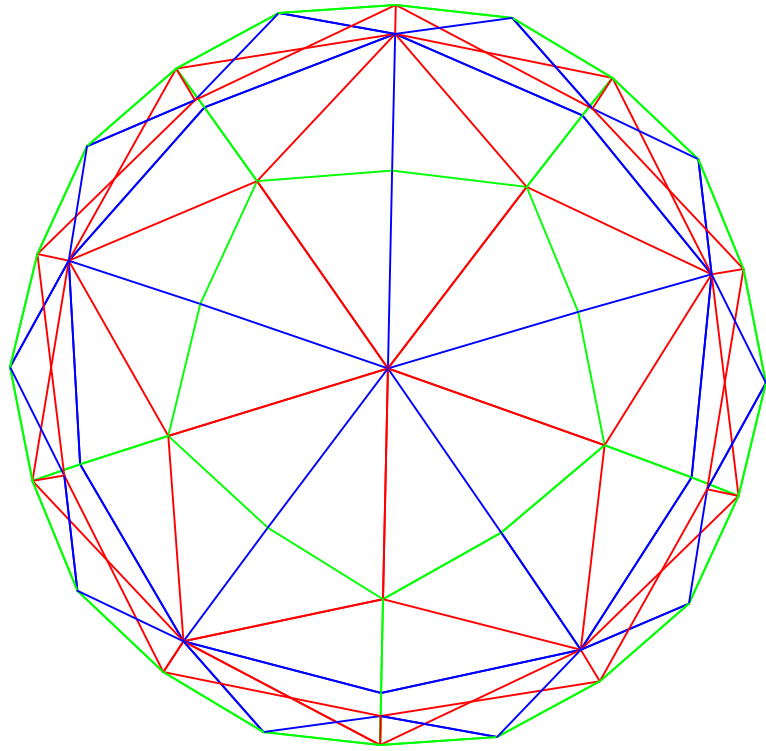
Poliedro base: Icosaedro
 Frecuencia: V2
 Porción de esfera: 1/2
 Método de subdivisión: Clase 1 - Medios Arcos
 Nº Modelo: 03
 Radio unitario: 1 m

RESULTADOS

Nº de elementos únicos: 2
 Nº barras totales: 65
 Nº de triángulos totales: 40
 Longitud total de barras: 38,0285 m
 Área de la cubierta: 5,833 m²
 Área de la base: 2,9391 m²

Nº	Barra tipo	Nº Piezas	Longitud (m)
A		35	0,6181
B		30	0,5465

Nº	Triángulo	Nº Piezas	Área (m ²)
1		10	0,1654
2		30	0,1393







CARACTERÍSTICAS GEODÉSICAS GENERALES

Poliedro base: Icosaedro
 Frecuencia: V2
 Porción de esfera: 1/2
 Método de subdivisión: Clase 2 - Triacon
 Nº Modelo: 04
 Radio unitario: 1 m

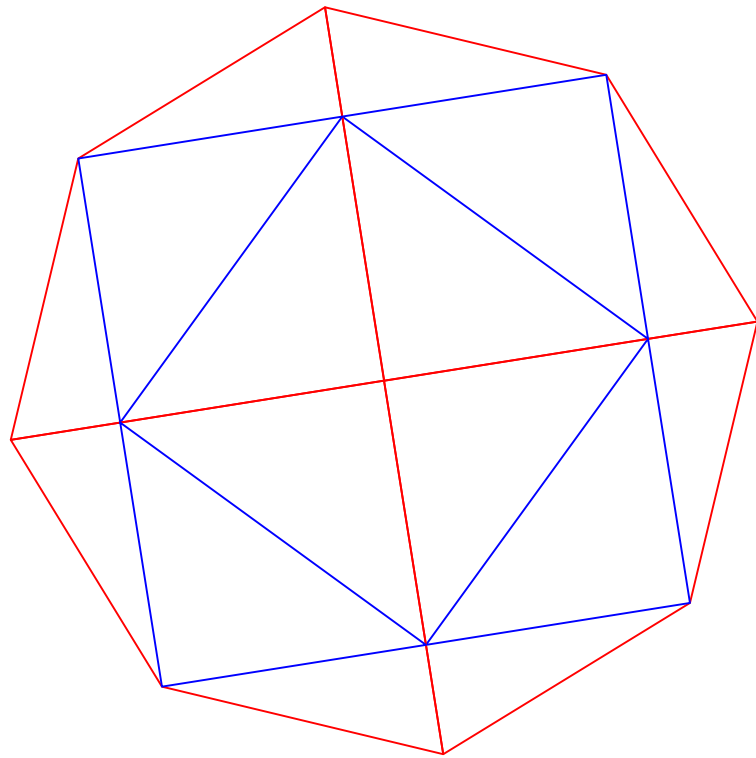
RESULTADOS

Nº de elementos únicos: 3
 Nº barras totales: 135
 Nº de triángulos totales: 80
 Longitud total de barras: 68,845 m
 Área de la cubierta: 7,920 m²
 Área de la base: 1,90 m²

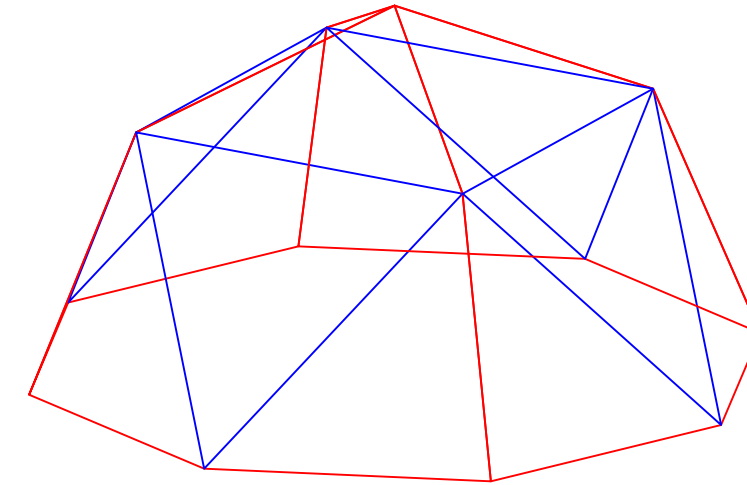
Nº	Barra tipo	Nº Piezas	Longitud (m)
A		45	0,6409
B		40	0,5465
C		50	0,3629

Nº	Triángulo	Nº Piezas	Área (m ²)
1		80	0,8660

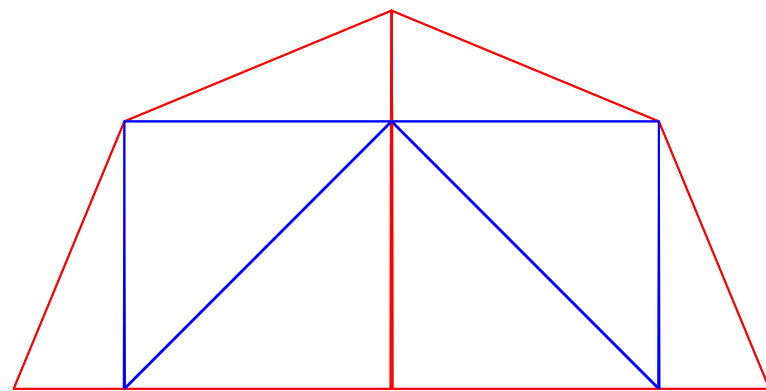
Vista en planta
Escala de vista: 1:20



Vista en 3D
Escala de vista: 1:20



Vista en alzado
Escala de vista: 1:20



CARACTERÍSTICAS GEODÉSICAS GENERALES

Poliedro base: Octaedro
 Frecuencia: V2
 Porción de esfera: 1/2
 Método de subdivisión: Medios Arcos
 Nº Modelo: 05
 Radio unitario: 1 m

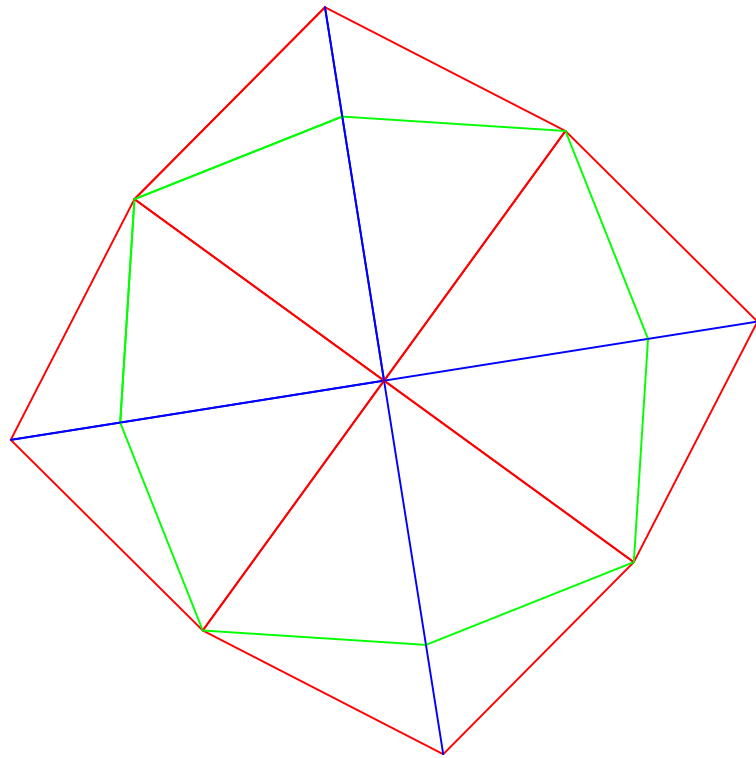
RESULTADOS

Nº de elementos únicos: 2
 Nº barras totales: 28
 Nº de triángulos totales: 16
 Longitud total de barras: 24,2464 m
 Área de la cubierta: 5,2084 m²
 Área de la base: 2,8284 m²

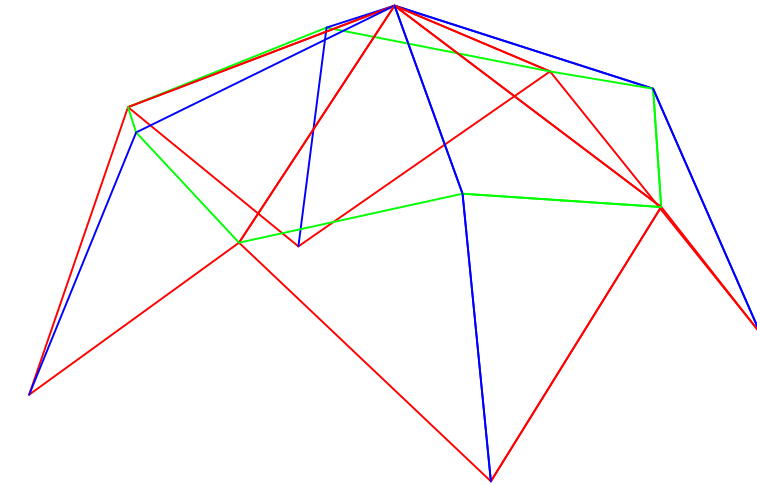
Nº	Barra tipo	Nº Piezas	Longitud (m)
A		16	0,7654
B		12	1,00

Nº	Triángulo	Nº Piezas	Área (m ²)
1		12	0,2897
2		4	0,4330

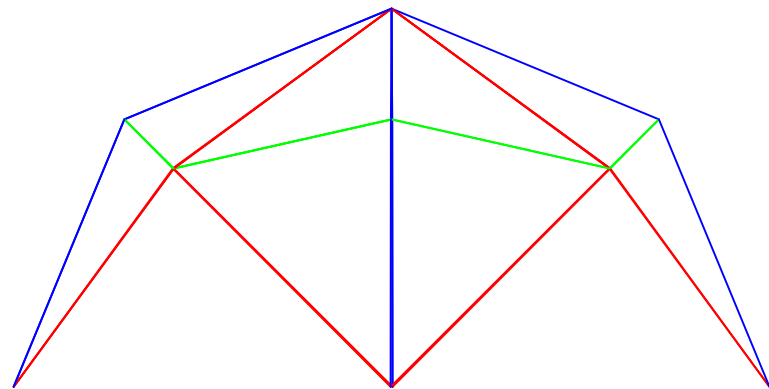
Vista en planta
Escala de vista: 1:20



Vista en 3D
Escala de vista: 1:20



Vista en alzado
Escala de vista: 1:20







CARACTERÍSTICAS GEODÉSICAS GENERALES

Poliedro base: Octaedro
 Frecuencia: V2
 Porción de esfera: 1/2
 Método de subdivisión: Clase 2 - Triacon
 Nº Modelo: 06
 Radio unitario: 1 m

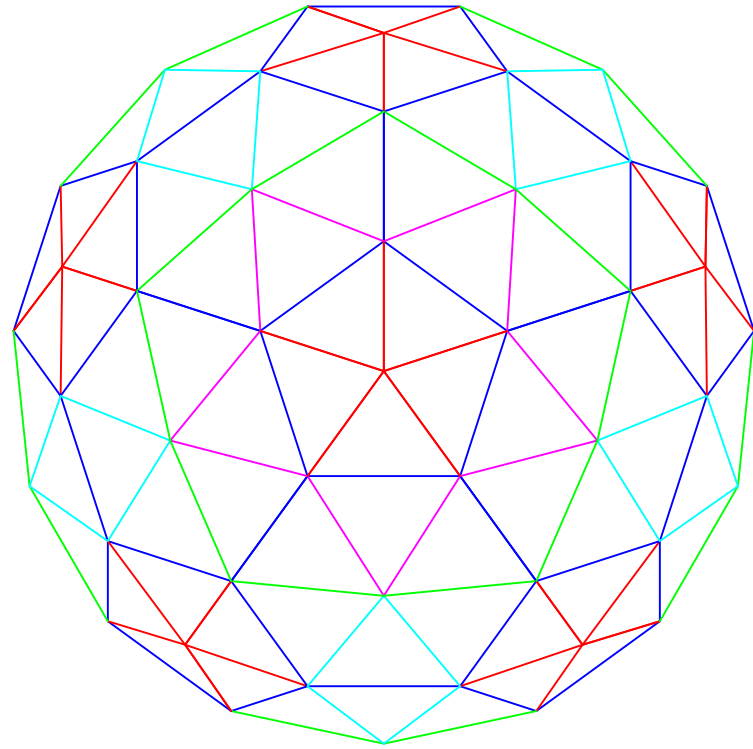
RESULTADOS

Nº de elementos únicos: 3
 Nº barras totales: 28
 Nº de triángulos totales: 16
 Longitud total de barras: 22,0024 m
 Área de la cubierta: 3,6848 m²
 Área de la base: 2,00 m²

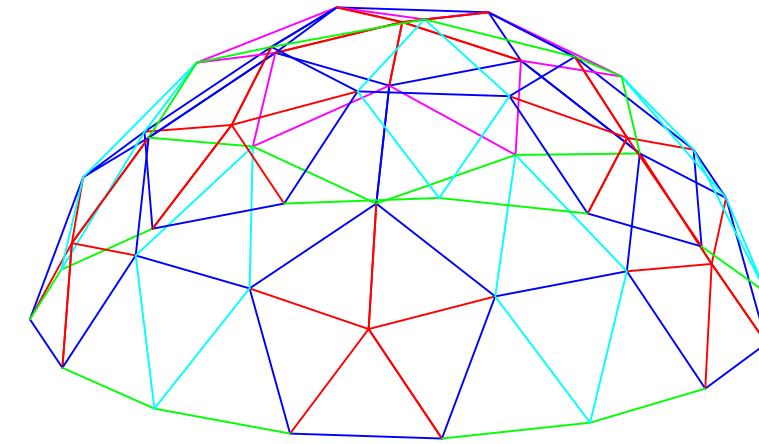
Nº	Barra tipo	Nº Piezas	Longitud (m)
A		12	0,9194
B		8	0,7654
C		8	0,6058

Nº	Triángulo	Nº Piezas	Área (m ²)
1		16	0,2303

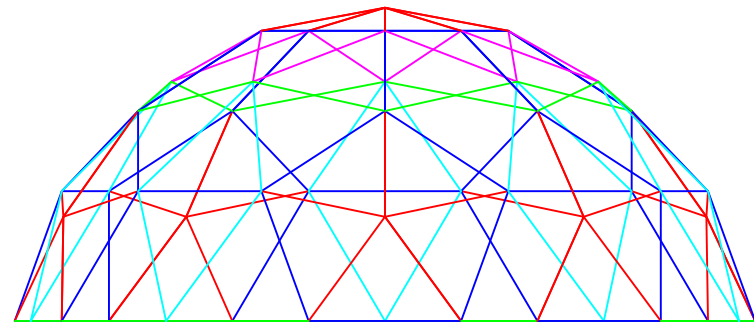
Vista en planta
Escala de vista: 1:20



Vista en 3D
Escala de vista: 1:20



Vista en alzado
Escala de vista: 1:20













CARACTERÍSTICAS GEODÉSICAS GENERALES

Poliedro base:	Icosaedro
Frecuencia:	V3
Porción de esfera:	5/12
Método de subdivisión:	Clase 1 - Arcos Iguales 3GC
Nº Modelo:	07
Radio unitario:	1 m

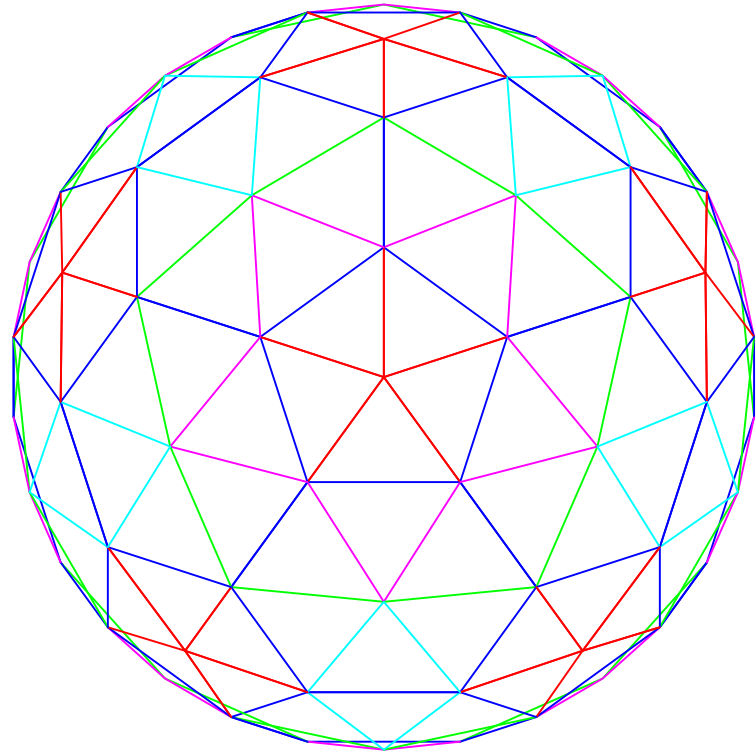
RESULTADOS

Nº de elementos únicos:	5
Nº barras totales:	125
Nº de triángulos totales:	75
Longitud total de barras:	49,380 m
Área de la cubierta:	5,021 m ²
Área de la base:	2,961 m ²

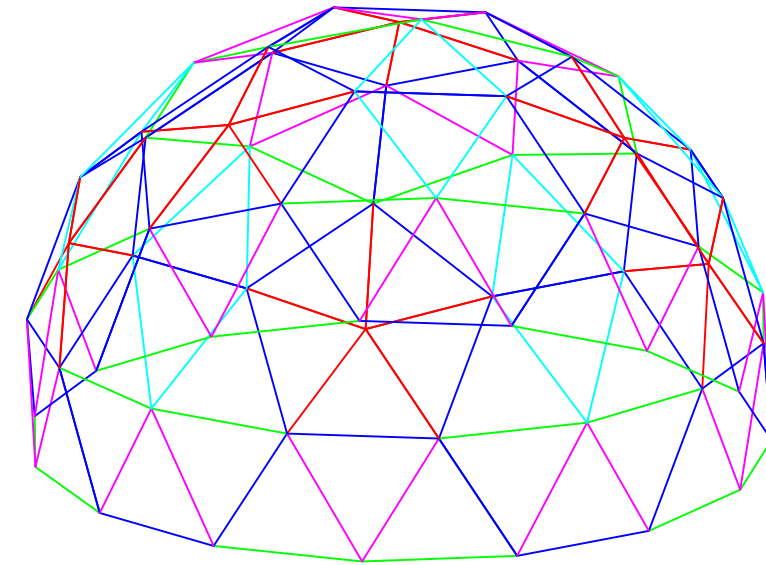
Nº	Barra tipo	Nº Piezas	Longitud (m)
A		30	0,3486
B		45	0,4035
C		10	0,3987
D		20	0,4127
E		20	0,4262

Nº	Triángulo	Nº Piezas	Área (m ²)
1		30	0,0574
2		5	0,0694
3		10	0,071
4		10	0,0758
5		20	0,0742

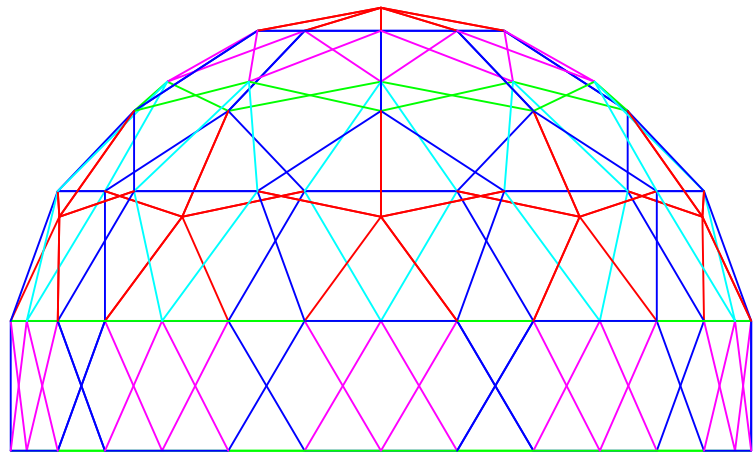
Vista en planta
Escala de vista: 1:20



Vista en 3D
Escala de vista: 1:20



Vista en alzado
Escala de vista: 1:20













CARACTERÍSTICAS GEODÉSICAS GENERALES

Poliedro base: Icosaedro
 Frecuencia: V3
 Porción de esfera: 7/12
 Método de subdivisión: Clase 1 - Arcos Iguales 3GC
 Nº Modelo: 08
 Radio unitario: 1 m

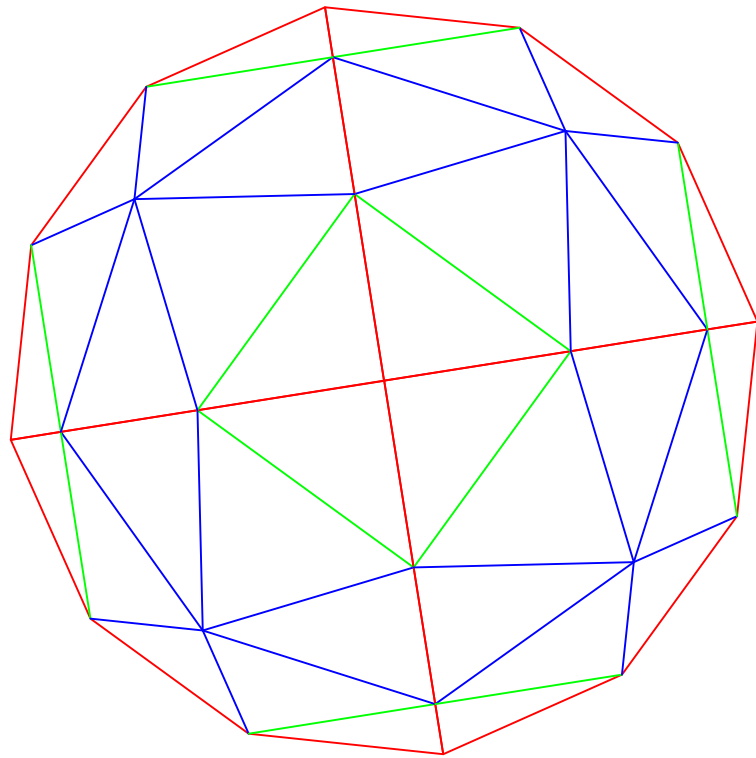
RESULTADOS

Nº de elementos únicos: 5
 Nº barras totales: 170
 Nº de triángulos totales: 105
 Longitud total de barras: 67,534 m
 Área de la cubierta: 7,135 m²
 Área de la base: 2,961 m²

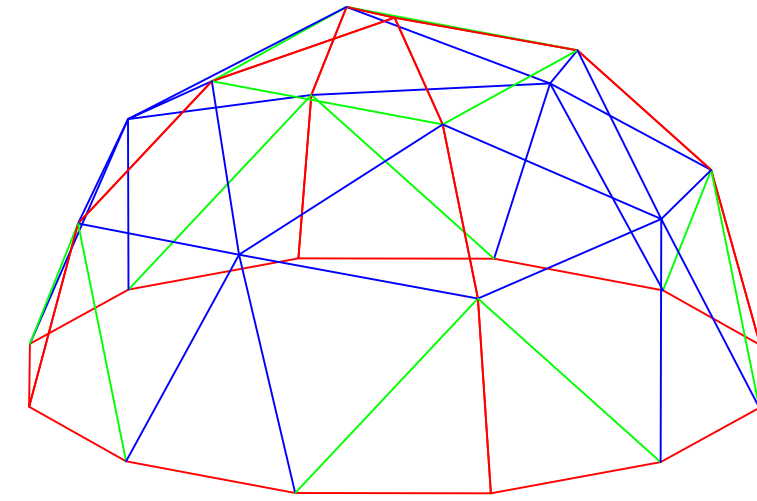
Nº	Barra tipo	Nº Piezas	Longitud (m)
A		30	0,3486
B		60	0,4035
C		30	0,3987
D		30	0,4127
E		20	0,4262

Nº	Triángulo	Nº Piezas	Área (m ²)
1		30	0,0574
2		15	0,0694
3		30	0,071
4		10	0,0758
5		20	0,0742

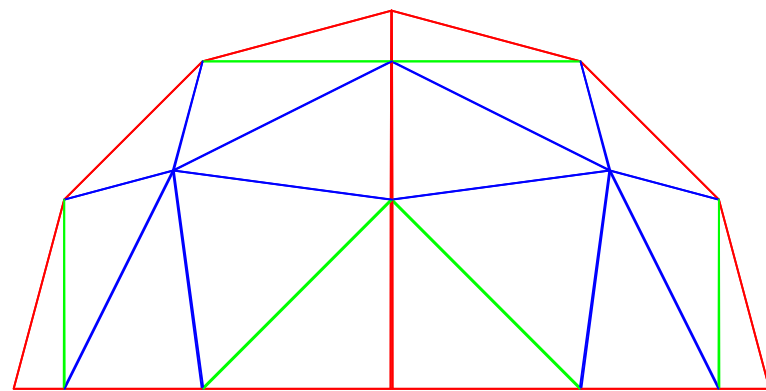
Vista en planta
Escala de vista: 1:20



Vista en 3D
Escala de vista: 1:20



Vista en alzado
Escala de vista: 1:20









CARACTERÍSTICAS GEODÉSICAS GENERALES

Poliedro base: Octaedro
 Frecuencia: V3
 Porción de esfera: 1/2
 Método de subdivisión: Clase 1 - Arcos Iguales 3GC
 Nº Modelo: 09
 Radio unitario: 1 m

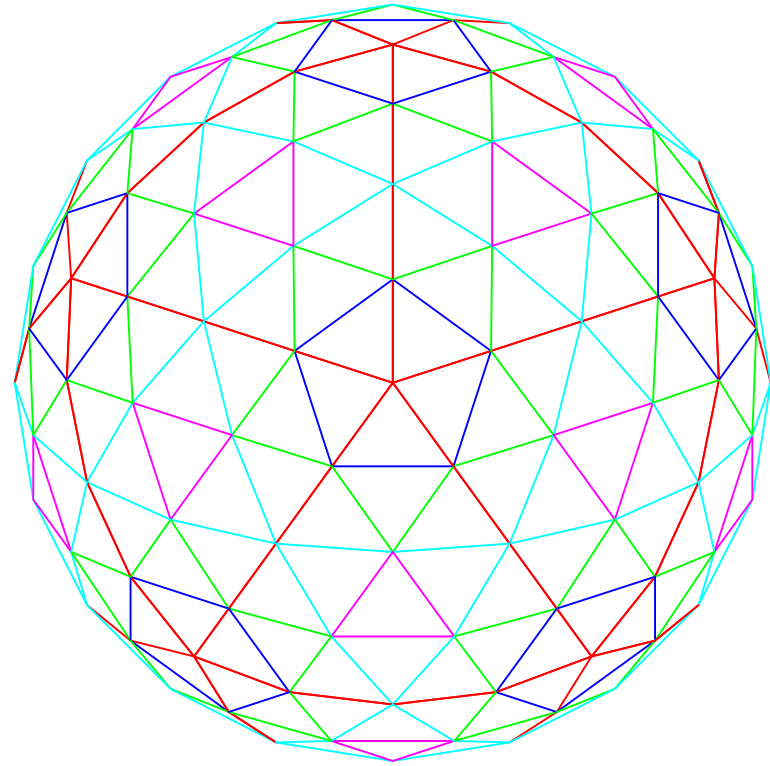
RESULTADOS

Nº de elementos únicos: 3
 Nº barras totales: 60
 Nº de triángulos totales: 36
 Longitud total de barras: 36,5100 m
 Área de la cubierta: 5,7720 m²
 Área de la base: 3,00 m²

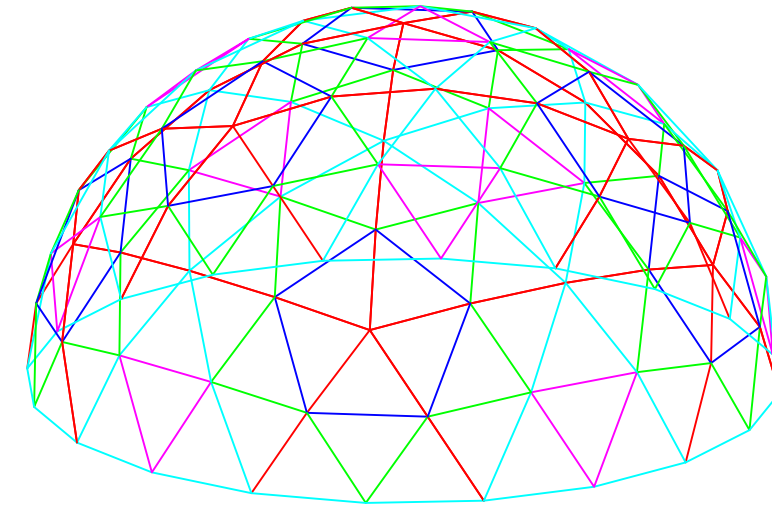
Nº	Barra tipo	Nº Piezas	Longitud (m)
A		24	0,5176
B		24	0,6501
C		12	0,7071

Nº	Triángulo	Nº Piezas	Área (m ²)
1		12	0,1337
2		12	0,1929
3		12	0,1544

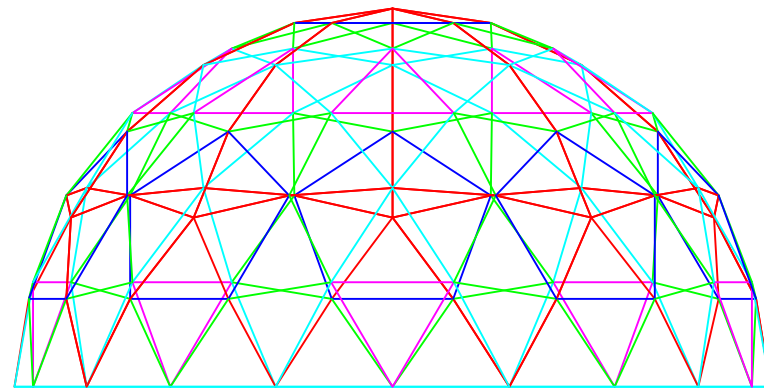
Vista en planta
Escala de vista: 1:20



Vista en 3D
Escala de vista: 1:20



Vista en alzado
Escala de vista: 1:20













CARACTERÍSTICAS GEODÉSICAS GENERALES

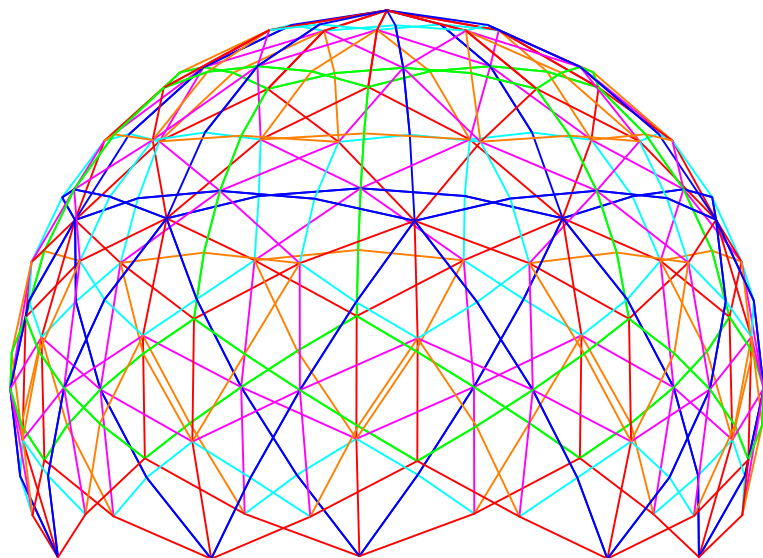
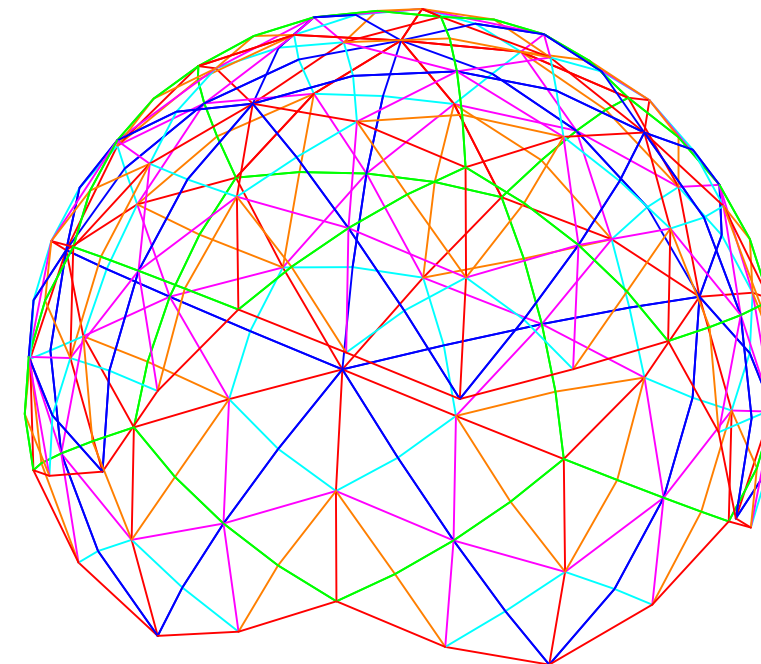
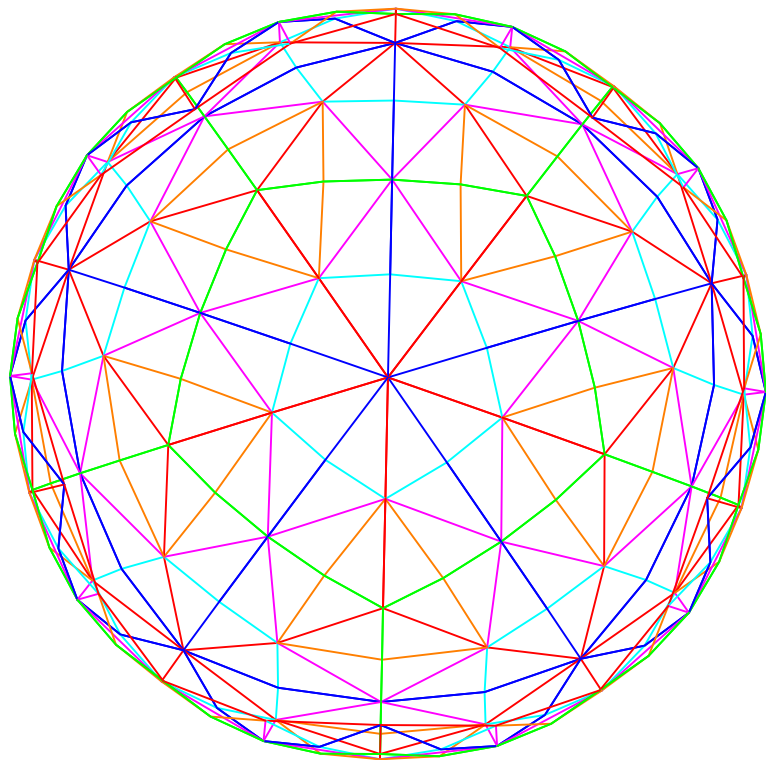
Poliedro base:	Icosaedro
Frecuencia:	V4
Porción de esfera:	1/2
Método de subdivisión:	Clase 1 - Medios Arcos
Nº Modelo:	10
Radio unitario:	1 m

RESULTADOS

Nº de elementos únicos:	5
Nº barras totales:	250
Nº de triángulos totales:	160
Longitud total de barras:	79,619 m
Área de la cubierta:	6,16 m ²
Área de la base:	3,090 m ²

Nº	Barra tipo	Nº Piezas	Longitud (m)
A		60	0,2579
B		30	0,3213
C		30	0,3249
D		60	0,3129
E		70	0,2855

Nº	Triángulo	Nº Piezas	Área (m ²)
1		30	0,036
2		30	0,0379
3		10	0,0457
4		60	0,0364
5		30	0,0434













CARACTERÍSTICAS GEODÉSICAS GENERALES

Poliedro base: Icosaedro
 Frecuencia: V4
 Porción de esfera: 1/2
 Método de subdivisión: Clase 2 - Triacon
 Nº Modelo: 11
 Radio unitario: 1 m

RESULTADOS

Nº de elementos únicos: 6
 Nº barras totales: 490
 Nº de triángulos totales: 320
 Longitud total de barras: 130,711 m
 Área de la cubierta: 8,256 m²
 Área de la base: 1,902 m²

Nº	Barra tipo	Nº Piezas	Longitud (m)
A		90	0,3247
B		80	0,2759
C		80	0,1822
D		80	0,1894
E		80	0,2807
F		80	0,3404

Nº	Triángulo	Nº Piezas	Área (m ²)
1		80	0,0261
2		80	0,0261
3		80	0,0255
4		80	0,0255

ANEJO 04. DISEÑO ARQUITECTÓNICO

DENOMINACIÓN	TITULACIÓN	MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
	PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).	
	CENTRO EDUCATIVO	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.

ÍNDICE

1. DISEÑO ARQUITECTÓNICO	4
1.1. TIPOS DE UNIONES	4
1.2. TIPOS DE CIMENTACIÓN	6
1.3. PUERTAS Y VENTANAS	8
1.3.1. APERTURA DE PUERTAS	8
1.3.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS VENTANAS	9
1.4. CERRAMIENTO DEL DOMO	11
1.4.1. CERRAMIENTO CON TABLERO	11
1.4.2. REVESTIMIENTOS EXTERIORES	12
1.4.3. AISLAMIENTO TÉRMICO Y ACÚSTICO	13
1.4.4. REVESTIMIENTO INTERIOR	14

Listado de ilustraciones

Ilustración 1. Ejemplo de uniones tradicionales Good Karma.	4
Ilustración 2. Unión Good Karma. Fuente: Acid Dome.	5
Ilustración 3. Unión tradicional Semicone. Fuente: Acid Domes.	5
Ilustración 4. Unión tradicional Cone. Fuente: Acid Domes.	5
Ilustración 5. Unión tradicional Joint. Fuente: Acid Domes.	5
Ilustración 6. Ejemplos de conectores.	5
Ilustración 7. Cimentación de zapatas aisladas bajo forjado de madera.	6
Ilustración 8. Muro de bloques de hormigón sobre zapata corrida circular.	6
Ilustración 9. Ejemplos de ejecución de losa de hormigón armado y aislamiento de la base.	7
Ilustración 10. Cimentaciones sobre pilotes.	7
Ilustración 11. Cimentación con superadobe.	7
Ilustración 12. Zapatas desmontables.	7
Ilustración 13. Cimentación tipo Plots.	8
Ilustración 14. Posibles ubicaciones de la puerta.	8
Ilustración 15. Ejemplo de puerta rectangular sobre Domo V2 para invernadero.	9
Ilustración 16. Ejemplo de ventanas con marco.	10
Ilustración 17. Ojo de buey abatible.	10
Ilustración 18. Ejemplo de lucernario.	10
Ilustración 19. Ejemplo de domo cubierto con policarbonato compacto.	11
Ilustración 20. Alternativas de revestimiento exterior. Fuente: Manual Midomo.	12

LISTADO DE TABLAS

No se encuentran elementos de tabla de ilustraciones.

1. DISEÑO ARQUITECTÓNICO

1.1. TIPOS DE UNIONES

Para un domo geodésico el diseño de la unión es casi tan relevante como lo puede ser casi cualquier variable geodésica principal, es decir, es igualmente de importante que elegir el método de subdivisión y la frecuencia correctos.

Sin embargo, los tipos de uniones para un domo están bastante acotados. En este epígrafe trataremos de clasificar y reunir tipos de uniones comunes y no tan comunes que se han aplicado históricamente y se continúan ejecutando en la actualidad.

Los tipos de uniones los podemos clasificar en dos grandes grupos, uniones tradicionales y uniones con conectores. Es evidente que la diferencia entre uno y otro tipo se basa en el uso o no de conectores para el ensamblaje de la cúpula, pero también influye del tipo de material que vamos a emplear para la estructura, si la estructura es de madera o metálica los sistemas de uniones son completamente diferentes. Podemos describir a continuación con más profundidad cada uno de ellos.

El sistema de uniones tradicionales o uniones sin conectores resulta más sencillo y requiere menos tecnología para su aplicación. La metodología se basa en dotar de cierta geometría a los elementos de la estructura para que estos sean fácilmente ensamblados entre sí. Diferenciamos las uniones tradicionales empleadas para estructuras geodésicas de madera, en las cuales se realizan los cortes necesarios en taller, de manera que estos elementos se ensamblen como si fueran un puzzle y se fijen entre sí mediante encolado y tornillería. Por otro lado, este sistema también es aplicable a entramados ligeros metálicos de estructuras geodésicas, en los cuales también se deforman en sus extremos para el ensamblado en obra. A continuación, trataremos de ver y describir cada uno de estos sistemas tradicionales.

El sistema Good Karma es el más empleado históricamente y es probable que también sea el más empleado en la actualidad para domos de mediana y pequeña envergadura. El sistema aplica un corte en los extremos de los listones o vigas de madera rectangulares, este corte se realiza en dos ángulos de dos planos diferentes simultáneamente. Es decir, se calcula un ángulo sobre el plano del propio triángulo al que pertenece ese listón, de manera que se pueda ensamblar el triángulo, y un segundo corte en el denominado ángulo axial, que es el que dota de curvatura al domo. Esta tarea, tiene un trabajo de cálculo geométrico detrás, pero con los datos precisos es muy sencillo de ejecutar; con una simple ingletadora puedes realizar un corte con dos ángulos simultáneamente, obteniendo el resultado que se muestra en las siguientes ilustraciones.



Ilustración 1. Ejemplo de uniones tradicionales Good Karma.

La superposición de unos elementos con otros, y el ensamblado mediante encolado y tornillería proporciona uniones rígidas que tienen un buen comportamiento para estructuras de mediana y pequeña envergadura. Entre sus ventajas es la escasa tecnificación para su fabricación y sencillez de montaje.

Por otro lado, existen programas informáticos como Acid Domes que proporcionan resultados de los cortes de los sistemas de uniones tradicionales, basados en Good Karma pero variando la forma del corte. Entre estos destacan sistemas que son menos frecuentes para la construcción de cúpulas, pero que pueden ser útiles para algunas aplicaciones, como son los sistemas Semicone, Cone y Joint. Si bien, la unión tipo joint no tiene ejes concurrentes, sino esviados al contrario que el resto de sistemas de unión.

En las ilustraciones adjuntas observamos que el sistema Good Karma y Semicone requieren del doble de listones por cada arista de la cúpula, y que el sistema Joint genera una distribución asimétrica de los elementos de madera. A priori, el sistema Cone puede ser el más eficiente pero su unión es menos rígida. Para decidir qué tipo de unión es mejor del sistema tradicional se deberá de recurrir a un análisis estructural y una valoración económica general.



Ilustración 2. Unión Good Karma. Fuente: Acid Dome.

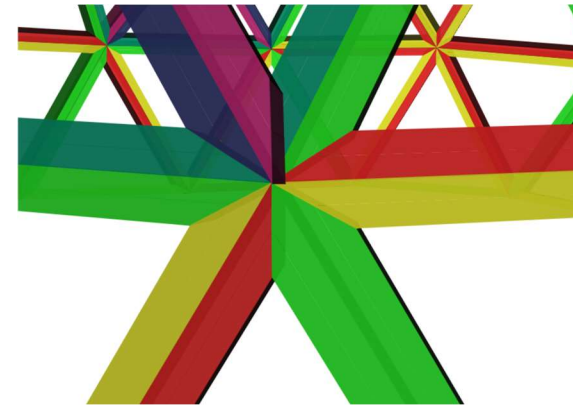


Ilustración 3. Unión tradicional Semicone. Fuente: Acid Domes.

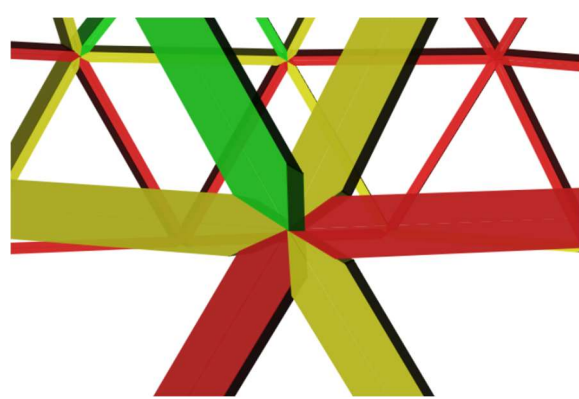


Ilustración 4. Unión tradicional Cone. Fuente: Acid Domes.



Ilustración 5. Unión tradicional Joint. Fuente: Acid Domes.

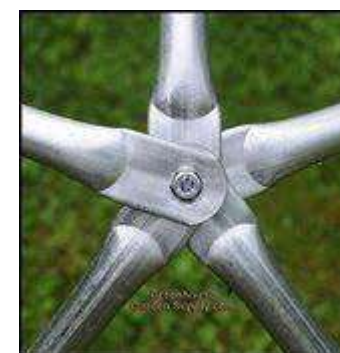


Ilustración 6. Ejemplos de conectores.

Ahora bien, la tipología de uniones mediante el uso de conectores es ampliamente variable, y actualmente no tiene una clasificación interna de este grupo, normalmente existen patentes y diseños realizados por empresas del sector de las cúpulas geodésicas. Este tipo de unión tiene mucha más complejidad a la hora de su fabricación, pero agiliza los tiempos de montaje en gran medida. Sin embargo, su estandarización no es sencilla, puesto que son diferentes para cada cúpula y deben de ser rediseñadas y fabricadas a medida en cada caso. A continuación, se muestran ejemplos de los conectores más comunes.

Dentro de esta categoría existen multitud de variaciones y patentes creadas por empresas con el objetivo de optimizar la fabricación de este elemento que interviene de una forma crucial en la fabricación y montaje del domo. Su importancia se debe a que es un elemento que puede llegar a tener un gran peso en el presupuesto de construcción; por ejemplo, una cúpula geodésica de frecuencia V3 tiene un número de vértices que requieren de un conector de 61 piezas hechas a medida, lo que puede suponer un elevado coste a la estructura y se debe de valorar adecuadamente cuál es el sistema que ofrece mejores ventajas competitivas.

1.2. TIPOS DE CIMENTACIÓN

En el presente epígrafe se pretende tratar algunas consideraciones de las tipologías de cimentación que se suelen utilizar para domos geodésicos, aunque todo ello depende del tipo de terreno y las cargas que vayamos a transmitirle y siempre deberemos en cada caso adaptarnos a la geotecnia de la zona.

Dado que el objetivo del proyecto es crear modelos estándar de cúpulas geodésicas analizaremos los posibles tipos de cimentación que se podrían realizar.

- Zapatas aisladas. No muy diferente de las zapatas aisladas para cualquier otro tipo de construcción, se trata de ejecutar zapatas aisladas en el terreno y sobre estas apoyar un forjado de madera o similar sobre el que irá el domo.



Ilustración 7. Cimentación de zapatas aisladas bajo forjado de madera.

- Zapata corrida. Se trata de crear una viga de cimentación perimetral al domo geodésico debiendo ser continua. Para realizar este tipo de cimentación habrá que encofrar y armar adecuadamente. La forma de esta zapata corrida podría ser en circunferencia o cualquier otro

polígono que se adapte a los elementos de la base del domo. Es conveniente una vez ejecutada la viga de cimentación, levantar un pequeño muro perimetral con el fin de subir la estructura al menos un palmo desde el nivel del suelo para reducir humedades.



Ilustración 8. Muro de bloques de hormigón sobre zapata corrida circular.

- Losa de hormigón. Se trata de ejecutar una losa de hormigón armado que soporte el peso de la estructura y de los elementos de su interior y reparta de forma uniforme las cargas al terreno. Se puede ejecutar de forma redonda, cuadrada o de cualquier otra forma. Es conveniente apoyar la estructura sobre una hilera de ladrillos o bloques de hormigón para levantar la estructura del domo respecto a la losa y que dicha estructura quede separada de posibles acumulaciones de agua. La elevación puede servir para que los rastreles sobre los que descansa la tarima queden circundados por el murete y, por tanto, la tarima interior vaya a la misma altura que la base de la estructura del domo y no más arriba. También, se puede mejorar colocando un material aislante entre los rastreles y una lámina plástica colocada sobre el muro donde apoya el domo, de manera que se facilite que el agua escurra hacia el exterior, como se puede ver en la siguiente ilustración.



Ilustración 9. Ejemplos de ejecución de losa de hormigón armado y aislamiento de la base.

- Pilotes. Cuando el estrato resistente se encuentre en zonas más profundas lo conveniente es utilizar un sistema de pilotes para sostener la estructura del domo. Estos pilotes pueden ser hincados o ejecutados in situ, y pueden ser de madera, metálicos o de hormigón, siendo el más frecuente este último. También se puede elegir la tipología de pilotes cuando se quiera ubicar el domo en una zona con mucha pendiente y sea más conveniente crear una plataforma elevada antes que realizar movimientos de tierra excesivos. Apoyado sobre los pilotes se deberá de ejecutar un forjado mediante vigas y viguetas prefabricadas según las condiciones de cada caso.



Ilustración 10. Cimentaciones sobre pilotes.

- Superadobe. Esta técnica descrita por algunos autores se realiza introduciendo en sacos de polipropileno biodegradable una mezcla compactada de arena, arcilla, cal y agua. Se colocan alineados en hileras continuas, asentados sobre una capa de gravas que drene el fondo de la excavación y una lámina plástica. Entre cada hilera de sacos y la inmediatamente superior se coloca un alambre de espino.



Ilustración 11. Cimentación con superadobe.

- Zapatas desmontables. Uno de los problemas de construcción de domos en algunos lugares es por la prohibición de construir cualquier tipo de estructura permanente, y se entiende que la cimentación lo sería. Por lo que algunos fabricantes (como Piloedre o Diamond Pier) ofrecen una solución de unas zapatas prefabricadas ancladas al terreno que se pueden desmontar sin afectar al mismo, y en principio, no infringe ninguna normativa.



Ilustración 12. Zapatas desmontables.

- Plots. Se trata de elementos prefabricados de diferentes materiales y medidas que se utilizan como pequeños soportes sobre los que descansan las vigas del forjado de madera que van a formar una superficie nivelada sobre la que apoyará la estructura del domo. Su ventaja principal es que están diseñados para permitir regular la altura, lo que los hace ideales para nivelar suelos y también son capaces de soportar cargas muy altas. Este sistema no se considera un sistema de cimentación, puesto que requiere de apoyar sobre una cimentación tipo losa o similar.



Ilustración 13. Cimentación tipo Plots.

1.3. PUERTAS Y VENTANAS

Las puertas y ventanas en un domo geodésico requieren especial atención en el diseño, puesto que no son elementos convencionales y las posibilidades en cuanto a su forma y orientación son de lo más variado. Es evidente que para realizar una puerta se debe de hacer una apertura, con lo que romperíamos el patrón de triángulos geodésico que hemos calculado en los anteriores anejos y nos afectaría directamente sobre el comportamiento estructural, no obstante, supone una acción necesaria en este proyecto.

1.3.1. APERTURA DE PUERTAS

Dado que cada modelo de domo geodésico tiene una distribución distinta, será necesario diseñar una puerta de características diferentes para cada caso, más adelante, mostraremos las puertas que se han diseñado para las cúpulas que definiremos con todos sus detalles para ser construidas.

El diseño de la puerta buscará funcionalidad y sencillez, por lo que se proyectará una puerta de dimensiones estándar que cumpla con requisitos de seguridad de uso y accesibilidad del Código

Técnico de la Edificación para que esta pueda ser más fácilmente admitida en diversos proyectos, ya que diseñamos prototipos de domos geodésicos completos.

El primer condicionante de diseño que hay que solventar es la ubicación de la puerta, para afectar lo menos posible a comportamiento estructural del domo buscaremos una zona simétrica donde realizar la apertura. Dado que todas las tipologías de domos generan patrones repetitivos de pentágonos y hexágonos, trataremos de utilizar ubicar la apertura en estas composiciones geométricas. A continuación, se muestra una figura con un ejemplo de una estructura geodésica de base icosaédrica y frecuencia 4, donde se representa la realización de una apertura utilizando la configuración del pentágono y la del hexágono.

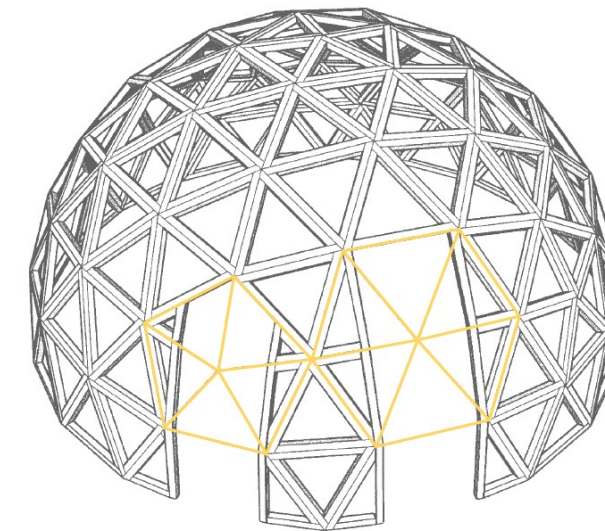


Ilustración 14. Posibles ubicaciones de la puerta.

En los domos que no sean similares al ejemplo ilustrado, igualmente se deberá buscar los patrones simétricos repetitivos de la estructura para ubicar ahí la apertura. En el caso del domo en frecuencia V4, el poder ubicar la puerta en pentágonos o en hexágonos, nos da 10 posibles puntos de la estructura para su colocación. Para este proyecto, se tratará de utilizar la configuración del hexágono, puesto que la arista superior servirá de dintel de la puerta o como base para la colocación de un avance.

Para ejecutar la puerta en este tipo de estructuras, lo primero que se debe de ejecutar es el domo geodésico completo por dos simples razones. La primera que, al ser una estructura ligera y que permite cierto grado de movimiento, esta debe de estar bien posicionada en cuanto a su curvatura y posiciones exactas de apoyo en la base, y que la estructura esté ejecutada al completo facilita esta tarea. Y lo segundo, es que si dejamos el hueco desde el inicio podría crear inestabilidades cuando se esté ejecutando ya que no tendría una distribución de esfuerzos homogénea durante la

construcción, y esto es necesario, porque, aunque se utilicen andamios y bases móviles para el montaje, en momentos puntuales se utiliza la estructura como apoyo para la colocación de nuevos niveles.

No obstante, la estructura debe de ser proyectada y dimensionada con la apertura de la puerta, ya que cualquier modificación del patrón geodésico debilita a la estructura. En obra, la ejecución de la apertura puede ser una tarea sencilla con el uso de un nivel láser que nos marque la posición de los cortes que se deben de realizar.

Las cúpulas que se diseñen en este proyecto contarán con una apertura para la puerta según lo descrito en este epígrafe. Se destaca que, según el uso que se le quiera dar al domo, lo propio es diseñar un pequeño avance para encajar la configuración rectangular de la puerta con la configuración de curvatura geodésica.



Ilustración 15. Ejemplo de puerta rectangular sobre Domo V2 para invernadero.

1.3.2. CARACTERÍSTICAS DE LAS VENTANAS

Las ventanas pueden ir colocadas en cualquiera de los triángulos que forma la estructura, éstas pueden disponerse desde las mínimas necesarias para iluminación y ventilación hasta cubrir la mitad de la esfera o su totalidad. Las combinaciones y disposiciones de las ventanas son infinitas y están altamente relacionadas con el uso del domo y su diseño artístico, arquitectónico y funcional. Por lo

que en este epígrafe nos centraremos en características técnicas básicas de las ventanas y los estándares a seguir para su diseño y construcción.

Entre las ventanas debemos de diferenciar entre fijas y abatibles. Las ventanas fijas proporcionarán iluminación natural y eficiencia energética, mientras que las ventanas abatibles, además de ello, también nos proporcionan ventilación natural. Según el código técnico de la edificación, existe un mínimo de ventanas para cualquier edificación, según el uso de los espacios que se dispongan. Dado que este proyecto es un prototipo, se realizará una hipótesis de distribución interior y en relación a esto se colocarán las ventanas que correspondan. Por ejemplo, si un domo geodésico dispone de una habitación, un baño y una cocina, al menos debe de haber una ventana abatible por cada uno de estos espacios.

Si bien, una de las cosas que debemos tener en cuenta antes de definir las características técnicas de las ventanas, es qué tipo de cerramiento y con qué materiales vamos a cubrir el domo, cuestión que analizaremos en profundidad en el siguiente epígrafe de este anejo. Debemos de conocer con anterioridad, a qué nivel va a quedar la superficie exterior, ya que es a ese nivel, y no al de la estructura, al que tendremos que ajustar las ventanas para que no queden hundidas con respecto a la cubierta, ya que esto puede producir patologías por un mal funcionamiento del drenaje de cubierta.

Las ventanas fijas se pueden ejecutar en obra de dos formas, bien en un simple cristal sin enmarcar, o bien con un cristal enmarcado.

Para colocar cristales sin marco, se tratará de que este cristal tenga un grosor igual al del material del cerramiento, para evitar complicaciones en su ejecución. El proceso de ejecución es sencillo, en primer lugar, se deberá de pegar el cristal triangular a la cara exterior de las aristas con cinta de doble cara VHB, muy resistente y duradera. Al disponer los cristales sobre las aristas y por la propia curvatura del domo se quedarán huecos entre cristal y cristal, un espacio que aprovecharemos para la colocación de Masilla de Polímero de alta calidad, que garantizará la impermeabilización y fijación del cristal a la estructura.

Se debe de emplear Masilla de polímero, ya que tiene mejores características que la de poliuretano, y además la primera soporta los rayos ultravioletas y tiene mejor resistencia a tracción y adherencia a mayor número de materiales diferentes. Esta solución puede ser válida para domos geodésicos de pequeña y mediana envergadura, para trabajos más exigentes se recomienda emplear silanos modificados con base epoxi u otro tipo de adhesivos resistentes.

En cuanto a las ventanas fijas con marco, este ha de quedar embutido en el triángulo de la estructura, por lo que se deberá de definir las dimensiones precisas del marco para que su cara externa quede a nivel de cubierta, y no a un nivel inferior.



Ilustración 16. Ejemplo de ventanas con marco.

Para la ventana abatible, al igual que la ventana fija con marco, se deberá disponer de una plantilla del triángulo donde va a ser ubicada para su fabricación. El premarco de la ventana deberá de ser en madera, aluminio o PVC. Cabe destacar, que el proceso de fabricación de una ventana triangular requiere mucha mano de obra y que su coste es elevado con respecto a las ventanas estándares. No obstante, se plantea una alternativa fácil de instalar y más económica ya que es un producto estándar que no requiere de fabricación a medida, el ojo de buey abatible, se instala inscrito en un triángulo y puede estar ubicado casi en cualquier lugar de la estructura.



Ilustración 17. Ojo de buey abatible.

Debe de establecerse ciertos criterios de dónde deben de estar ubicadas las ventanas abatibles, puesto que cuanto más arriba las coloquemos del domo mejor para la ventilación, ya que el calor se concentra en las zonas altas. Pero también deben de colocarse a una altura a la que sea fácil poder abrirlas, por lo que se debe de buscar una altura intermedia. Además de esto, se deberá de buscar un triángulo con un vértice que apunte hacia el terreno quedando su arista opuesta en un nivel superior, y esta debe de ser horizontal. Si la arista estuviera inclinada generaría complicaciones en el abatimiento de la ventana.

Otro método de ventilación utilizado comúnmente en domos geodésicos es la colocación de un lucernario en la parte más alta. Al estar ubicado en la zona más elevada del domo, la ventilación del calor será la mejor posible, además, con el lucernario se podrán emplear ventanas abatibles rectangulares estandarizadas y fáciles de encontrar en el mercado, por lo tanto, mucho más económicas. Por lo que con un lucernario facilitaremos la circulación del aire, reduciendo la acumulación de calor y la cantidad de luz es mucho mayor, y no tiene complejidad técnica su ejecución.



Ilustración 18. Ejemplo de lucernario.

Como alternativa al lucernario, que permitiría una mejora de la ventilación, sería colocar en la parte más elevada un extractor eólico. Sin embargo, esta opción no se ha considerado para la estandarización de domos geodésicos de este proyecto.

En el diseño estandarizado de la cúpula es totalmente necesario definir el tipo de cristal a emplear para las ventanas, con este fin se hará una breve descripción de diferentes tipologías de cristales que podrían ser convenientes utilizar:

- Cristales laminados con cámara de aire. Se trata de dos cristales con una cámara de aire intermedia, la cara exterior es de cristal laminado resistente a impactos con rotura segura ante fuertes impactos. Además, ofrece una protección frente a la radiación ultravioleta y mejora la climatización.
- Cristal inteligente. Estos cristales tienen la capacidad de filtrar la radiación solar, mejorando el confort y optimizando el consumo de aire acondicionado en épocas de calor y de calefacción en invierno. También cuentan con aislamiento acústico y pueden ser laminados para evitar roturas.
- Policarbonato compacto. Es un material plástico, similar al vidrio, que se comercializa en planchas que son fácilmente manipulables y se puede cortar con un cúter. Es resistente a las roturas, ligero, buen aislante térmico y eléctrico; además, se puede encolar y soldar.
- Policarbonato celular. Se comercializa en placas de policarbonato compuestas por paredes muy finas, unidas entre sí por nervios internos, creando una estructura interna que le confiere unas características excelentes como aislante térmico y acústico. Son fáciles de cortar, ligeras y resistentes incluso al granizo.



Ilustración 19. Ejemplo de domo cubierto con policarbonato compacto.

Los cristales son una parte fundamental del aislamiento del domo, por lo que este aislamiento que ofrezcamos deberá de estar acorde con el aislamiento que proporcione el resto del cerramiento del domo.

1.4. CERRAMIENTO DEL DOMO

El presente epígrafe tiene como objeto exponer la información necesaria a tener en cuenta para diseñar y colocar el cerramiento de un domo geodésico. Los pasos que se van a ir describiendo por orden de ejecución serán: Cerramiento con tablero y sellado de juntas, impermeabilización y revestimiento exterior, aislamiento térmico y/o acústico y revestimiento interior. Las soluciones técnicas aquí descritas se corresponden con soluciones aplicadas en el sector de construcciones geodésicas que con más frecuencia se utilizan en la actualidad.

Es importante enfatizar que la ejecución del cerramiento requiere técnicas más avanzadas en la ejecución por varias razones. La primera, la dificultad en su ejecución y en el empleo de medios auxiliares. Cuando montamos la estructura, esta va autoportándose a medida que se van colocando nuevos niveles y nos podemos apoyar sobre ella para realizar ciertas labores de izado de nuevas piezas elevadas. Sin embargo, cuando estamos colocando la cubierta con tablero la superficie se hace prácticamente inaccesible debido a su elevada curvatura. Por ello, para ciertas labores hay que contar con medios auxiliares para su ejecución. Uno de estos medios de seguridad sería colocar un punto de anclaje en la cúspide del domo o en varios puntos mediante la colocación de una argolla, para o bien asegurar una escalera o asegurar una línea de vida. Como medios auxiliares, también se pueden emplear plataformas móviles para realizar ciertos trabajos sobre la cubierta, y el uso de andamios, aunque estos no son muy eficientes debido a la esfericidad del domo.

Se ha de tener en cuenta que a medida que incrementamos el tamaño del domo, también lo hace y en gran medida el volumen de aire interior; este dato se ha de tener en cuenta para definir un correcto aislamiento térmico.

1.4.1. CERRAMIENTO CON TABLERO

La solución que se va a describir y aplicar en este proyecto se basa en: colocar sobre la estructura un tablero de madera u otro material que a continuación detallaremos, proceder al sellado de sus juntas, la impermeabilización del mismo y aplicar un revestimiento exterior y acabado final de la estructura.

Los diferentes tipos de tablero que se pueden emplear son:

- Tableros OSB o de fibras orientadas (*"oriented strand board"*). Estos tableros están formados por sucesivas capas de virutas, orientadas estas últimas en la misma dirección, cada capa se prensa y se une a otra capa de forma perpendicular, lo que le proporciona resistencia; el proceso es similar a los tableros con contrachapados. Suelen estar fabricados de madera de pino, abeto o de chopo cuando son de mejor calidad. Estos tableros se clasifican en 4 grupos,

siendo el OSB Clase 3 el que vamos a emplear para este proyecto, ya que está diseñado para emplearlo en ambientes exteriores húmedos.

- Antes de ser colocado sobre la estructura se le deberá de aplicar una membrana acrílica o puente de unión, ya que su superficie se puede astillar con mucha facilidad en ambientes húmedos y esto puede ser fuente de problemas graves por generarse huecos en el tablero.
- Tableros marinos o fenólicos. Estos tableros de madera contrachapada mediante un pegamento altamente resistente al agua y la humedad, están diseñados para soportar bien condiciones meteorológicas extremas, ya sea por humedad, rayos ultravioletas, viento, etc. Sus condiciones técnicas son más ventajosas en ambientes extremos con respecto al OSB, pero su precio también es más elevado. Este material, suele ser de madera de abedul y se suele utilizar para la construcción de muelles, velero, canoas, muebles de cocina, etc.; no se le debe de confundir con el contrachapado común.
- Tableros de madera-cemento. Estos tableros están compuestos por virutas de madera y cemento Portland, tienen buenas características resistentes y aguantan bien los ambientes exteriores, su precio no es muy elevado, y son una buena alternativa.
- Tableros de cemento para exterior. Son tableros fabricados a base de cemento Portland con aditivos y aligerantes, cubierto por una malla de fibra. Son muy estables y ligeros, además de incombustibles, propiedad que no tiene el resto de tableros descritos. Entre otras de sus ventajas destacan que no se debilitan con el agua, ni permiten la anidación de hongos, son fáciles de cortar con un cúter y sobre ellos se puede aplicar el revestimiento que se desee.
- Panel Wedi. Esta solución de cubierta está configurada por un núcleo de poliestireno extruido revestido con una lámina de cemento cola reforzada con fibra de vidrio, formando una unidad sólida y compacta, reforzada en las juntas y en las esquinas; se suministra con superficie acabada o preparada para enlucir o alicatar. Es un material muy estable, impermeable, termoaislante y resistente al vapor.

Cualquiera de estos paneles descritos deberá de confeccionarse con las medidas de cada triángulo de la estructura y se deben colocar atornillándose a esta. Ahora bien, debido a su curvatura quedarán huecos entre estos triángulos que es preciso rellenar con masilla impermeabilizante.

Dependiendo del tipo de tablero que se emplee será aconsejable un tipo de masilla para el sellado u otra, los tipos más habituales: son Polímero MS o silicona MS líquida.

1.4.2. REVESTIMIENTOS EXTERIORES

A continuación, se describen soluciones técnicas para el revestimiento de la cúpula geodésica más frecuentemente empleados. Primeramente, se muestra una imagen extraída del Manual Midomo, que resume en una ilustración las diferentes posibilidades de revestimiento.

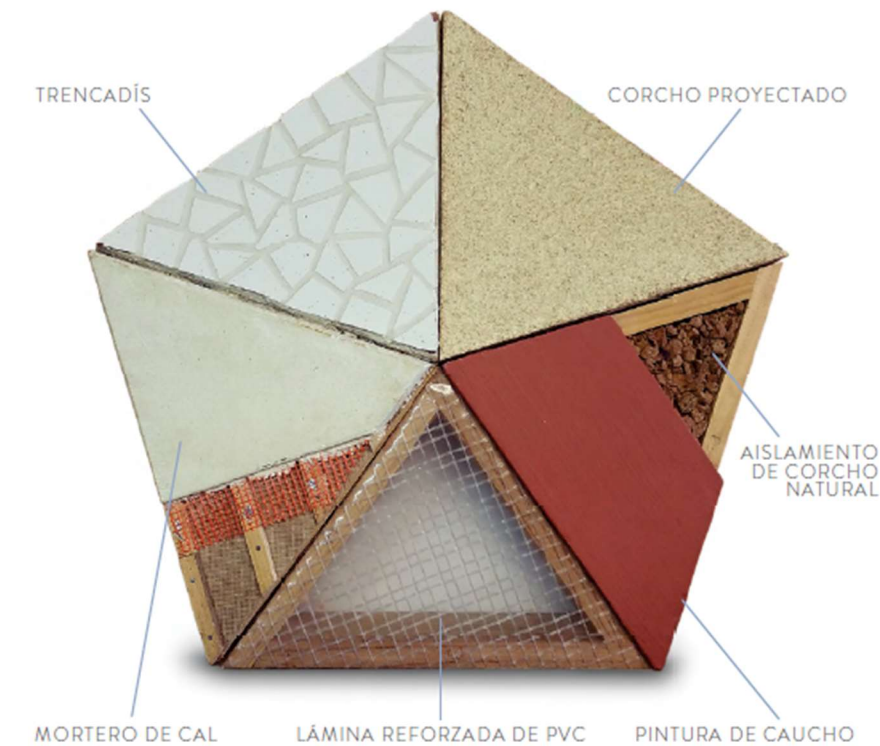


Ilustración 20. Alternativas de revestimiento exterior. Fuente: Manual Midomo.

Las alternativas de revestimiento exterior propuestas son las siguientes:

- **Pintura de caucho.** Es la opción más económica para proporcionar una capa impermeable al tablero colocado previamente. Consiste en aplicar varias capas de pintura que se obtiene a partir de caucho natural o sintético con resinas añadidas que incrementan la resistencia UV y reforzada con fibras. Aportan resistencia al agua y tienen muy buenas propiedades fungicidas que impiden el crecimiento de hongos. A pesar de ser una opción económica para impermeabilizar este tipo de cubierta requiere un mantenimiento mucho más frecuente, aproximadamente cada año.
- **Pintura cerámica o térmica.** Este tipo de pintura está compuesta por microesferas cerámicas huecas y vacías unidas por un ligante de máxima calidad, producen una ruptura del puente térmico, ya que en el vacío no existe transferencia de calor. Es un buen aislamiento térmico, y

es impermeable, pero permite el paso de vapor de agua desde el interior, evitando la condensación y la anidación de hongos. Es más resistente a los ambientes externos que la pintura de caucho.

- **Silicona líquida.** Pintar el domo con silicona líquida puede ser muy útil para impermeabilizar, es muy elástica, permeable al vapor de agua, resistente a los rayos UV, pintable y antimoho.
- **Corcho proyectado.** Consiste en una mezcla de corcho natural (corteza de alcornoque), celulosa de las hojas de los mismos árboles, una emulsión acrílica y pigmentos naturales. Su puesta en obra correcta es mediante la proyección de la mezcla con una pistola específica y un compresor. El cerramiento con este tipo de cubierta es muy elástico y duradero, impermeable y un buen aislante térmico, aunque no el definitivo. Además, su acabado es muy estético por lo que es una opción muy frecuente para cubrir domos. Sin embargo, su impermeabilidad no es duradera, por lo que siempre será necesario antes de proyectarlo aplicar una membrana acrílica pura o resina de unión. Algunos fabricantes suministran la mezcla de corcho proyectado y la membrana acrílica compatible.
- **Teja asfáltica.** Esta técnica tiene muy buenos resultados en cuanto a su impermeabilización. Su composición asfáltica de alta resistencia, fibra de vidrio y minerales, proporcionan buenas propiedades de firmeza y durabilidad. Aunque sus acabados no son perfectos en la práctica.
- **Planchas de PVC Termosellado.** Las planchas de PVC compacto configuran una solución completa de cubierta e impermeabilización. Es una solución muy resistente a los ácidos y agentes químicos, son aislantes eléctricamente y cuentan con un excelente comportamiento mecánico, son ligeras y duraderas, sin duda una excelente opción. Su colocación en obra basta con recortar todos los triángulos, pegarlos con el pegamento adecuado y sellar las juntas con calor, garantizando la impermeabilización. Es una de las soluciones que menos mantenimiento requiere.
- **Sistema SATE.** El sistema SATE (Sistema de Aislamiento Térmico Exterior) es un sistema de aislamiento aplicado desde el exterior de la estructura que ofrece grandes ventajas, entre ellas que el aislamiento térmico es mucho más eficiente puesto que evitaremos puentes térmicos y al ser aplicado desde el exterior, no restará espacio en el interior. Para aplicar este sistema, previamente se debe de haber cubierto la cúpula con algún tipo de tablero descrito en el epígrafe anterior, posteriormente se cortarán los paneles aislantes con la forma de los triángulos del domo. Las planchas del sistema SATE normalmente son de poliestireno expandido, lana mineral o corcho natural, habrá que elegir el material y el grosor acorde con

el grado de aislamiento deseado. Se fijarán las planchas mediante un pegamento adecuado y se seguirán los pasos del fabricante. Finalmente, se obtiene un buen aislamiento con un acabado excelente, duradero, sin pérdida de espacio interior, y además un aspecto estético muy bueno, ya que con este sistema no se ocultarán las armónicas líneas que forma la estructura geodésica cuando se visualice desde el interior, cuestión que no sucede con el resto de casos.

Más adelante, conjuntamente con la valoración económica y con la valoración de las ventajas e inconvenientes de cada método se convendrá cual será el sistema de cubierta exterior más adecuado para la industrialización de domos geodésicos.

1.4.3. AISLAMIENTO TÉRMICO Y ACÚSTICO

Salvo si el revestimiento exterior elegido es el sistema SATE, para el resto de casos será preciso disponer un aislamiento térmico y/o acústico en el interior del domo. Existen muchas variedades de materiales aislantes, algunos con mejores ventajas en cuanto al aislamiento acústico y otros con mejores propiedades térmicas. Sin embargo, nos decantaremos por el empleo de materiales lo más naturales posible, aunque garantizando siempre los grados de aislamiento que sean necesarios.

Una forma común de proceder para aislar una cúpula geodésica, y a priori, la más eficiente, es emplear el espesor de la estructura del domo para rellenarlo con aislante, es decir, si un domo para ser utilizado como una vivienda vacacional de 5m de diámetro, es construido con listones de 70 x 30 mm, se dispondrá de 7 cm de espesor para ocuparlos con material aislante. En algunos casos, donde las temperaturas sean extremas, será necesario incrementar el ancho de los listones, no por motivos estructurales, sino para poder contar con más espacio para disponer aislamiento.

Ahora se describirán algunos de los materiales habitualmente empleados en el sector de la construcción como aislantes. Se diferencian entre aislantes sintéticos, lanas minerales y aislantes ecológicos.

Aislantes ecológicos:

- **Corcho natural.** Se trata de corteza de alcornoque, que tras ser extraída del árbol esta vuelve a crecer sobre el tronco una y otra vez, a lo largo de la vida del árbol, que son aproximadamente unos 150 años. Por ello, es un material altamente sostenible, siendo España el segundo productor mundial, sólo por detrás de Portugal.

- El corcho se puede obtener tanto en planchas como triturado, y sus cualidades son excelentes, es un buen aislante térmico y acústico, con buena resistencia a los parásitos y roedores; es estable y duradero a lo largo del tiempo. También es el único aislante ecológico resistente a ambientes húmedos y no lleva ningún tipo de cola.
- **Celulosa de papel reciclado.** Esta celulosa se obtiene a partir de periódico reciclado. Se puede obtener en manta o triturada. El comportamiento es muy bueno a ambientes húmedos, es capaz de absorber la humedad del ambiente y liberarla después sin sufrir cambios. Es resistente al fuego y a la descomposición.
- **Tableros de fibra de madera.** Es una alternativa ecológica y económica, son transpirables y resistentes a ambientes húmedos, e idóneos para el aislamiento acústico.

Aislantes sintéticos. Son materiales compuestos por materiales sintéticos como el plástico y polímeros procedentes del petróleo, son muy efectivos térmicamente.

- Poliestireno expandido (EPS). Uno de los materiales más empleados por su baja densidad y baja conductividad térmica.
- Poliestireno extruido (XPS). Con las mismas propiedades que el anterior, pero resistente a la humedad.
- Poliuretano. Mejor rendimiento térmico que los anteriores, aplicado normalmente proyectado.

Por otro lado, tenemos las lanas minerales, que es el aislante más empleado en la actualidad. Son productos aislantes constituidos por un entrelazado de filamentos de materiales pétreos que forman un fieltro que mantiene entre ellos aire en estado inmóvil. Son versátiles y eficaces, proporcionando un buen aislamiento térmico y acústico, además de un elevado nivel de protección contra el fuego. Podemos distinguir entre dos tipos de lanas minerales fundamentales:

- Lana de roca o lana mineral. Se fabrica a partir de roca volcánica y se presenta en forma de manta, panel no rígido o rollo. Se utiliza en cubiertas, forjados, fachadas, suelos, falsos techos, tabiques interiores, etc.
- Lana de vidrio. Se fabrica fundiendo arena a altas temperaturas y su estructura está formada por finas fibras de vidrio unidas por un aglomerante o resina. Se considera mejor aislante acústico que la lana de roca y resiste mejor la humedad. A mismo espesor que otros aislantes, este material consigue mejor grado de aislamiento, pues debido a su baja conductividad térmica tiene una gran eficiencia.

Otro famoso sistema que existe en el mercado son los paneles sándwich. Funcionan como aislante y como cerramiento, están formados generalmente por dos chapas de acero, núcleo de poliuretano, tablero de fibras y tablero de madera con acabado decorativo en la parte vista interior.

1.4.4. REVESTIMIENTO INTERIOR

Este epígrafe trata de describir qué materiales y técnicas se pueden emplear para cerrar el domo en su parte interior.

- **Tableros (DM, Contrachapado, Pladur, etc.).** Se puede emplear cualquier tipo de tablero fino como DM, contrachapado o placas de cartón-yeso (pladur) para cerrar el domo en su parte interior. Se debe de cortar previamente en los triángulos que forma el domo, colocarlos y atornillarlos a la estructura, y sellar sus juntas. Con este método la estructura dejará de ser visible, pero se podrá apreciar su geometría geodésica con el acabado final de este tablero.
- **Cerramiento de contrachapado encajado en las aristas.** Este sistema se trata de realizar previamente a la ejecución del domo una ranura en el interior de cada listón. De manera que, al armar el triángulo, se encaja en esas ranuras el contrachapado fino. El acabado es mucho más elegante y preciso que el atornillado a la estructura, ahorrándonos el sellado de juntas y tornillos. Y de este modo, no se ocultará la estructura, siendo visible desde el interior.

ANEJO 05. GEOLOGÍA Y GEOTECNIA

DENOMINACIÓN	TITULACIÓN	MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
	PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).	
	CENTRO EDUCATIVO	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.

ÍNDICE

1. OBJETO	4
2. METODOLOGÍA DE TRABAJO	4
2.1. ESTUDIO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO	4
3. GEOLOGÍA	4
3.1. ENCUADRE GEOLÓGICO	4
3.1.1. ESTRATIGRAFÍA Y LITOLOGÍA	4
3.2. TECTÓNICA	4
3.3. ESTUDIO DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA	4
4. CONCLUSIONES	6

Listado de ilustraciones

*Ilustración 1. Localización de las obras proyectadas sobre el mapa geológico de España en su Hoja N°747. Fuente: IGME.*5
Ilustración 2. Leyenda del Mapa Geológico de España......5

1. OBJETO

El presente anejo corresponde al Estudio Geológico y Geotécnico para el PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).

El objeto del mismo es determinar la naturaleza de los terrenos existentes, así como sus características geológico-geotécnicas para así poder establecer los condicionantes necesarios para la construcción de las estructuras geodésicas. Para ello, el desarrollo de los trabajos del presente estudio estará basado en los siguientes apartados:

- Descripción del área de estudio y sus datos generales.
- Caracterización geológica-geotécnica de los materiales presentes.
- Geomorfología, tectónica, hidrogeología.
- Recomendación de parámetros del suelo. Capacidad portante del terreno y estabilidad.
- Agresividad y alterabilidad de los materiales sobre las estructuras.
- Presencia del agua.

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

2.1. ESTUDIO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO

Los trabajos objeto del proyecto se centran en la determinación de las características geológico-geotécnicas con el fin de poder realizar las comprobaciones de los modelos de cálculo que han sido realizados en la elaboración de la presente documentación técnica. La propuesta metodológica seguida puede sintetizarse en los siguientes apartados:

1. Estudio de información geológica existente: para lo cual se ha recurrido en primer lugar a los documentos publicados por el IGME consultando los mapas geológicos a E=1/50.000. En concreto el mapa que se relaciona a continuación ha sido establecido como referencia para el trabajo.

- Mapa Geológico de España. Escala 1/50.000. Hoja Nº 747. Sueca. IGME.

3. GEOLOGÍA

3.1. ENCUADRE GEOLÓGICO

3.1.1. ESTRATIGRAFÍA Y LITOLOGÍA

La zona de la obra está ocupada en su mayor parte por la porción meridional de la llanura cuaternaria del golfo de Valencia, desde La Albufera hasta las cercanías de la Sierra de Corbera al Sur. En ella tiene lugar el curso inferior del río Júcar.

Geológicamente está situada en las estribaciones orientales de la Rama Sur de la Cordillera Ibérica y en el comienzo de la subsidencia del Mioceno Superior del Mar Mediterráneo.

En la parte noroeste de la hoja de Sueca aparece un suave macizo calcáreo de 200 a 300 m de altitud, constituido por la terminación del anticlinal cretácico de Llombay de directrices Ibéricas. En el borde oriental de este macizo se apoya discordante el Mioceno marino, que se sumerge hacia el Este debajo del Cuaternario.

Otro relieve importante en la zona, en el ángulo SE, es el Cretácico Superior de la montaña de Oro (233 m.) en Cullera, que sobresale aisladamente entre el Cuaternario y el mar.

3.2. TECTÓNICA

No aparecen en los depósitos cuaternarios de esta Hoja del IGME pruebas evidentes de la existencia de neotectónica.

3.3. ESTUDIO DE INFORMACIÓN GEOLÓGICA

Para el estudio de información geológica se recurre a los documentos publicados por el IGME consultando los mapas geológicos en la hoja Nº 747 del mapa geológico de España en Sueca.

La obra se ubica sobre el mapa geológico como se muestra en la siguiente figura:

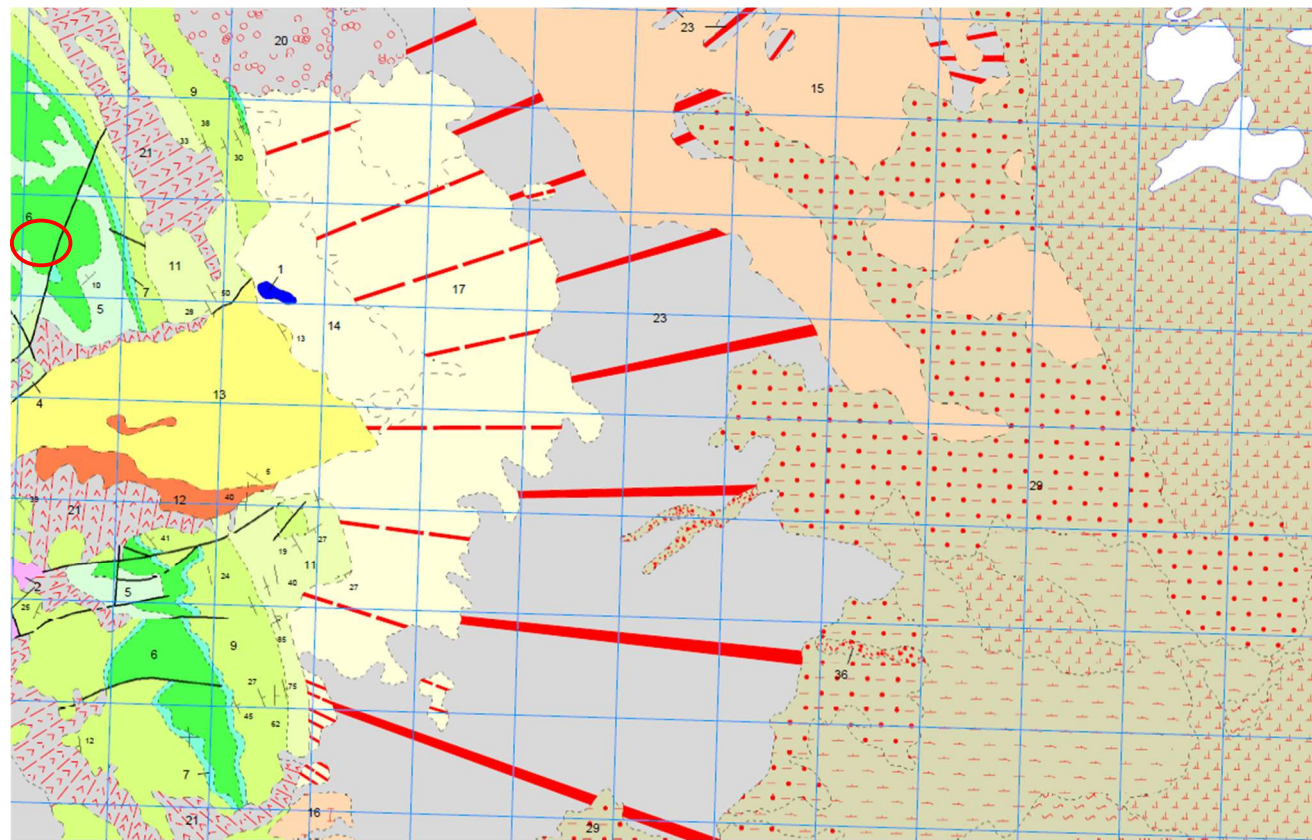
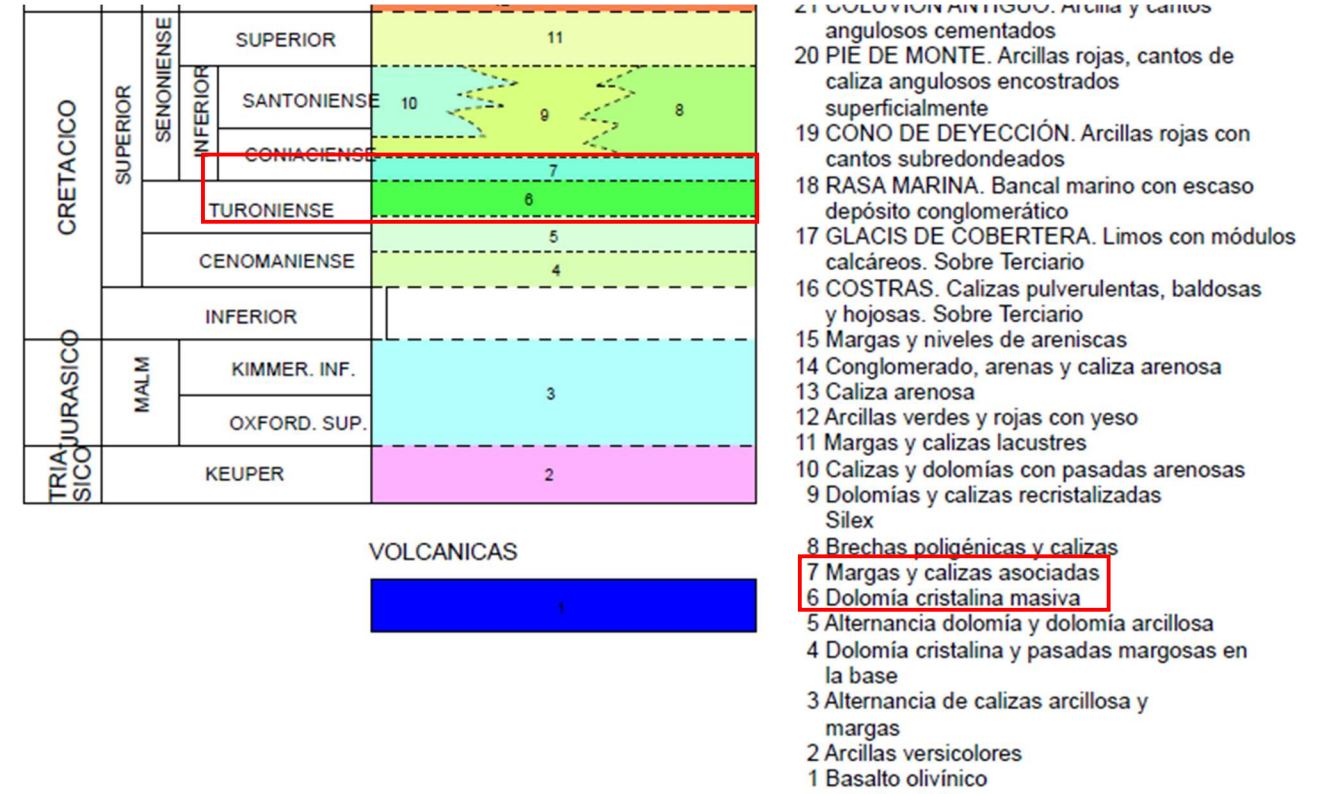


Ilustración 1. Localización de las obras proyectadas sobre el mapa geológico de España en su Hoja N°747. Fuente: IGME



SIMBOLOS CONVENCIONALES

-----	Contacto concordante	- - - - -	Contacto discordante
—————	Falla conocida	——— ———	Falla supuesta
+	Estratificación subhorizontal	—+—	Estratificación subvertical
⊥	Estratificación invertida	—⊥—	Estratificación
—+—+—+—	Rasa litoral		

Ilustración 2. Leyenda del Mapa Geológico de España.

Podemos observar según el mapa geológico de España que las obras proyectadas se encuentran principalmente sobre Dolomía cristalina masiva y también, aunque en menor medida, margas y calizas asociadas, correspondientes con la enumeración 6 y 7 de la leyenda.

4. **CONCLUSIONES**

La información geológica-geotécnica que ha permitido desarrollar el cálculo de las cimentaciones de las estructuras geodésicas se basa en los datos existentes de otros proyectos cercanos a la zona de actuación, considerando los siguientes parámetros de propiedades del terreno como razonables para realizar el estudio de la cimentación, suponiendo la existencia de un relleno superficial característico de esta zona:

- Resistencia del terreno en situaciones persistentes: 0,20 MPa.
- Resistencia del terreno en situaciones sísmicas y accidentales: 0,30 MPa.
- Módulo de balasto: $K_{30} = 100.000 \text{ kN/m}^3$ (Para el cálculo de la viga de cimentación se ha hallado el módulo de balasto equivalente a partir del K_{30} en función de las dimensiones de la viga).

ANEJO 06. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

DENOMINACIÓN	TITULACIÓN	MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
	PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).	
	CENTRO EDUCATIVO	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.

ÍNDICE		ANEXO 1: COMBINACIÓN DE ACCIONES ELU	44
1. OBJETIVOS DEL ANEJO	5	ANEXO 2: COMBINACIÓN DE ACCIONES ELS	49
2. ANÁLISIS DOMO GEODÉSICO 1	5		
2.1. CÁLCULO Y APLICACIÓN DE CARGAS	5		
2.1.1. ÁREA TRIBUTARIA	5		
2.1.2. ACCIONES PERMANENTES	7		
2.1.3. ACCIONES VARIABLES	8		
2.1.3.1. Sobrecarga de Uso	9		
2.1.3.2. Sobrecarga de nieve	11		
2.1.3.3. Acción del viento	11		
2.1.3.4. Acciones térmicas	16		
2.1.4. ACCIONES ACCIDENTALES	17		
2.1.4.1. Acciones sísmicas	17		
2.1.4.2. Incendio	17		
2.2. COMBINACIÓN DE ACCIONES	17		
2.2.1. COMBINACIÓN DE ACCIONES ELU	17		
2.2.2. COMBINACIÓN DE ACCIONES ELS	18		
2.3. ESFUERZOS DE CÁLCULO	18		
2.4. REACCIONES DE CÁLCULO	20		
2.5. DESPLAZAMIENTOS DE CÁLCULO	21		
3. ANÁLISIS DOMO GEODÉSICO 2	22		
3.1. CÁLCULO Y APLICACIÓN DE CARGAS	22		
3.1.1. CÁLCULO DE ÁREAS TRIBUTARIAS	22		
3.1.2. ACCIONES PERMANENTES	23		
3.1.3. ACCIONES VARIABLES	23		
3.1.3.1. Sobrecarga de uso	23		
3.1.3.2. Sobrecarga de nieve	24		
3.1.3.3. Acción del viento	25		
3.1.3.4. Acciones térmicas.	30		
3.2. ESFUERZOS DE CÁLCULO	30		
3.3. REACCIONES DE CÁLCULO	32		
3.4. DESPLAZAMIENTOS DE CÁLCULO	32		
4. ANÁLISIS DE ESTRUCTURA 3	33		
4.1. CÁLCULO Y APLICACIÓN DE CARGAS	33		
4.1.1. CÁLCULO DE ÁREAS TRIBUTARIAS	33		
4.1.2. ACCIONES PERMANENTES	33		
4.1.3. ACCIONES VARIABLES	34		
4.1.3.1. Sobrecarga de uso	34		
4.1.3.2. Sobrecarga de nieve	35		
4.1.3.3. Acción del viento	36		
4.1.3.4. Acciones térmicas	41		
4.2. ESFUERZOS DE CÁLCULO	41		
4.3. REACCIONES DE CÁLCULO	43		
4.4. DESPLAZAMIENTOS DE CÁLCULO	43		

Listado de ilustraciones

Ilustración 1. Baricentro del triángulo y medianas.....	6	Ilustración 50. Flectores máximos y mínimos sobre el eje paralelo al canto de la pieza en ELU - Domo 2. (Momento 2 -2).	31
Ilustración 2. Área tributaria asignable a la barra medianera entre ambos triángulos.....	6	Ilustración 51. Flectores máximos y mínimos sobre el eje perpendicular al canto de la pieza en ELU - Domo 2. (Momento 3 -3).....	31
Ilustración 3. Esquema de cargas triangular.....	6	Ilustración 52. Reacciones máximas en los apoyos de la estructura en ELS – Domo 2.....	32
Ilustración 4. Enumeración de barras de la puerta Domo 1.....	7	Ilustración 53. Máximos desplazamientos en ELS – Domo 2.....	32
Ilustración 5. Carga muerta aplicada al domo geodésico 1.....	8	Ilustración 54. Imagen del modelo de SAP2000 de la estructura 3.....	33
Ilustración 6. Clasificación del domo 1 por filas.....	9	Ilustración 55. Denominación de las piezas de la puerta del domo geodésico 3.....	33
Ilustración 7. Sobrecarga de uso distribuida de SCU1 y SCU2 para domo 1.....	10	Ilustración 56. Aplicación de la carga muerta a la estructura 3.....	34
Ilustración 8. Cargas concentradas de SCU1 en Domo 1.....	10	Ilustración 57. Aplicación de la sobrecarga de uso - domo 3.....	35
Ilustración 9. Carga concentrada de SCU2 en domo 1.....	10	Ilustración 58. Aplicación de la carga puntual de sobrecarga de uso 1 en domo 3.....	35
Ilustración 10. Aplicación de la carga de nieve en domo 1.....	11	Ilustración 59. Aplicación de la carga puntual de la sobrecarga de uso 2 en domo 3.....	35
Ilustración 11. Valor básico de la velocidad del viento.....	12	Ilustración 60. Aplicación de la sobrecarga de nieve en la estructura 3.....	36
Ilustración 12. Valores de coeficiente de exposición Ce.....	12	Ilustración 61. Viento de presión 1 – Barlovento – Domo 3.....	37
Ilustración 13. Distribución de las cargas de viento en cubiertas esféricas.....	12	Ilustración 62. Viento de succión 1 – Barlovento – Domo 3.....	38
Ilustración 14. Coeficiente eólico en cubiertas esféricas.....	12	Ilustración 63. Viento de presión 1 – Sotavento – Domo 3.....	38
Ilustración 15. Viento de presión dirección 1 - Barlovento.....	14	Ilustración 64. Viento de succión 1 – Sotavento – Domo 3.....	39
Ilustración 16. Viento de succión dirección 1 - Barlovento.....	14	Ilustración 65. Viento de presión 2 – Barlovento – Domo 3.....	39
Ilustración 17. Viento de presión dirección 1 - Sotavento.....	15	Ilustración 66. Viento de succión 2 – Barlovento – Domo 3.....	40
Ilustración 18. Viento de succión dirección 1 - Sotavento.....	15	Ilustración 67. Viento de presión 2 – Sotavento – Domo 3.....	40
Ilustración 19. Viento de presión dirección 2 - Barlovento.....	15	Ilustración 68. Viento de succión 2 – Sotavento – Domo 3.....	41
Ilustración 20. Viento de succión dirección 2 - Barlovento.....	15	Ilustración 69. Axil máximo y mínimo en ELU - Domo 3.....	41
Ilustración 21. Viento de presión dirección 2 - Sotavento.....	16	Ilustración 70. Cortante máximo y mínimo en la dirección paralela al canto de la pieza en ELU - Domo 3. (Cortante 2-2). 41	41
Ilustración 22. Viento de succión dirección 2 - Sotavento.....	16	Ilustración 71. Cortante máximo y mínimo en la dirección perpendicular al canto de la pieza en ELU - Domo 3. (Cortante 3-3).....	42
Ilustración 23. Isotermas de temperatura anual máxima del aire.....	16	Ilustración 72. Torsión máxima y mínima en ELU - Domo 3.....	42
Ilustración 24. Axil máximo y mínimo en ELU - Domo 1.....	19	Ilustración 73. Flectores máximos y mínimos sobre el eje paralelo al canto de la pieza en ELU – Domo 3. (Momento 2 -2).	42
Ilustración 25. Cortante máximo y mínimo en la dirección paralela al canto de la pieza en ELU - Domo 1. (Cortante 2-2) .19	19	Ilustración 74. Flectores máximos y mínimos sobre el eje perpendicular al canto de la pieza en ELU - Domo 3. (Momento 3 -3).....	42
Ilustración 26. Cortante máximo y mínimo en la dirección perpendicular al canto de la pieza en ELU - Domo 1. (Cortante 3-3).....	19	Ilustración 75. Reacciones máximas en los apoyos de la estructura en ELS – Domo 3.....	43
Ilustración 27. Torsión máxima y mínima en ELU - Domo 1.....	19	Ilustración 76. Máximos desplazamientos en ELS – Domo 3.....	43
Ilustración 28. Flectores máximos y mínimos sobre el eje paralelo al canto de la pieza en ELU - Domo 1. (Momento 2 -2).	20		
Ilustración 29. Flectores máximos y mínimos sobre el eje perpendicular al canto de la pieza en ELU - Domo 1. (Momento 3 -3).....	20		
Ilustración 30. Reacciones máximas en los apoyos de la estructura en ELS – Domo 1.....	20		
Ilustración 31. Máximos desplazamientos en ELS.....	21		
Ilustración 32. Representación del modelo de la estructura geodésica 2.....	22		
Ilustración 33. Denominación de las piezas de la puerta del domo geodésico 2.....	22		
Ilustración 34. Aplicación de la carga muerta a la estructura 2.....	23		
Ilustración 35. Aplicación de la sobrecarga de uso 1 - domo 2.....	24		
Ilustración 36. Aplicación de la carga de sobrecarga de uso 2 en domo 2.....	24		
Ilustración 37. Aplicación de la sobrecarga de nieve en la estructura 2.....	25		
Ilustración 38. Viento de presión 1 - Barlovento.....	26		
Ilustración 39. Viento de succión 1 - Barlovento.....	27		
Ilustración 40. Viento de presión 1 - Sotavento.....	27		
Ilustración 41. Viento de succión 1 - Sotavento.....	28		
Ilustración 42. Viento de presión 2 - Barlovento.....	28		
Ilustración 43. Viento de succión 2 - Barlovento.....	29		
Ilustración 44. Viento de presión 2 - Sotavento.....	29		
Ilustración 45. Viento de succión 2 - Sotavento.....	30		
Ilustración 46. Axil máximo y mínimo en ELU - Domo 2.....	30		
Ilustración 47. Cortante máximo y mínimo en la dirección paralela al canto de la pieza en ELU - Domo 2. (Cortante 2-2) .30	30		
Ilustración 48. Cortante máximo y mínimo en la dirección perpendicular al canto de la pieza en ELU - Domo 2. (Cortante 3-3).....	31		
Ilustración 49. Torsión máxima y mínima en ELU - Domo 2.....	31		

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Áreas tributarias de las piezas del domo geodésico 1.	7	Tabla 54. Viento de presión 1 – Sotavento – Domo 3.	38
Tabla 2. Área tributaria en barras de la puerta - Domo 1.	7	Tabla 55. Viento de succión 1 – Sotavento – Domo 3.	38
Tabla 3. Cálculo de la carga muerta por superficie del domo 1.	8	Tabla 56. Viento de presión 2 – Barlovento – Domo 3.	39
Tabla 4. Cálculo de la carga muerta por barra del domo 1.	8	Tabla 57. Viento de succión 2 – Barlovento – Domo 3.	39
Tabla 5. Agrupación de filas domo 1.	9	Tabla 58. Viento de presión 2 – Sotavento – Domo 3.	40
Tabla 6. Sobrecarga de uso según la inclinación de la cubierta.	9	Tabla 59. Viento de succión 2 - Sotavento.	40
Tabla 7. Coeficiente de inclinación SCU.	9	Tabla 60. Esfuerzos de cálculo - Domo 3.	43
Tabla 8. Distribución de cargas de sobrecarga de uso por fila.	10	Tabla 61. Valor máximo de las reacciones ELU - Domo 3.	43
Tabla 9. Valor característico de la sobrecarga de nieve.	11	Tabla 62. Desplazamientos y giros máximos en ELS - Domo 3.	43
Tabla 10. Coeficientes de inclinación por sobre carga de nieve.	11		
Tabla 11. Distribución de carga de nieve por barra en Domo 1.	11		
Tabla 12. Coeficientes eólicos.	13		
Tabla 13. Acciones de viento sobre la estructura.	13		
Tabla 14. Viento de presión en dirección 1 en domo 1.	13		
Tabla 15. Viento de succión en dirección 1 en domo 1.	14		
Tabla 16. Viento de presión en dirección 2 en domo 1.	14		
Tabla 17. Viento de succión en dirección 2 en domo 1.	14		
Tabla 18. Incremento de temperatura debido a la radiación solar.	16		
Tabla 19. Temperatura mínima del aire exterior (°C).	17		
Tabla 20. Temperaturas extremas de los elementos estructurales.	17		
Tabla 21. Listado de casos de carga domo 1.	17		
Tabla 22. Coeficientes de seguridad y simultaneidad de los casos de carga.	18		
Tabla 23. Coeficientes de simultaneidad en ELS acciones de corta duración.	18		
Tabla 24. Esfuerzos de cálculo - Domo 1.	20		
Tabla 25. Valor máximo de las reacciones ELU - Domo 1.	20		
Tabla 26. Desplazamientos y giros máximos en ELS - Domo 1.	21		
Tabla 27. Áreas tributarias de domo geodésico 2.	22		
Tabla 28. Carga muerta aplicada en domo geodésico 2.	23		
Tabla 29. Coeficientes de inclinación según la fila o posiciones de la puerta.	23		
Tabla 30. Valores de la sobrecarga de uso en domo geodésico 2.	24		
Tabla 31. Coeficiente de forma por sobrecarga de nieve en domo 2.	24		
Tabla 32. Cargas distribuidas triangulares por sobrecarga de nieve en domo 2.	25		
Tabla 33. Área tributaria de cada barra en cada caso de carga de viento en domo 2.	26		
Tabla 34. Viento de presión 1 – Barlovento.	26		
Tabla 35. Viento de succión 1 - Barlovento.	26		
Tabla 36. Viento de presión 1 - Sotavento.	27		
Tabla 37. Viento de succión 1 - Sotavento.	27		
Tabla 38. Viento de presión 2 - Barlovento.	28		
Tabla 39. Viento de succión 2 - Barlovento.	28		
Tabla 40. Viento de presión 2 - Sotavento.	29		
Tabla 41. Viento de succión 2 - Sotavento.	29		
Tabla 42. Esfuerzos de cálculo - Domo 2.	32		
Tabla 43. Valor máximo de las reacciones ELU - Domo 2.	32		
Tabla 44. Desplazamientos y giros máximos en ELS - Domo 2.	32		
Tabla 45. Áreas tributarias de domo geodésico 3.	33		
Tabla 46. Carga muerta aplicada en domo geodésico 3.	34		
Tabla 47. Coeficientes de inclinación según la fila en domo 3.	34		
Tabla 48. Valores de la sobrecarga de uso en domo geodésico 2.	34		
Tabla 49. Coeficiente de forma por sobrecarga de nieve en domo 3.	35		
Tabla 50. Cargas distribuidas triangulares por sobrecarga de nieve en domo 3.	36		
Tabla 51. Área tributaria de cada barra en cada caso de carga de viento en domo 3.	37		
Tabla 52. Viento de presión 1 – Barlovento – Domo 3.	37		
Tabla 53. Viento de succión 1 – Barlovento – Domo 3.	37		

1. OBJETIVOS DEL ANEJO

El presente anejo tiene como objeto hallar los esfuerzos de cálculo que deberá de resistir cada una de las estructuras definidas en el anejo Nº 3 “Propuestas de modelos estandarizados”, para posteriormente proceder con el dimensionamiento de la estructura.

Se partirá de los modelos geométricos tridimensionales creados en la propuesta de modelos estandarizados del Anejo 3 “Propuesta de modelos estandarizados”. La geometría ha sido creada en formato CAD y será importada a SAP2000 para realizar en análisis estructural.

Los domos que son analizados en el presente anejo son los siguientes:

- Domo geodésico 1 → Diámetro 10 m, frecuencia V4. Subdivisión de Clase 1.
- Domo geodésico 2 → Diámetro 8 m, frecuencia V3. Subdivisión de Clase 1.
- Domo geodésico 3 → Diámetro 12m, frecuencia V4. Subdivisión de Clase 2.

Cabe destacar los siguientes aspectos de las bases de cálculo que se ha empleado en el modelo de elementos finitos desarrollados en SAP2000 para la realización de los cálculos del presente anejo:

- Teoría de vigas utilizada: Timoshenko.
- Las barras del modelo se consideran todas ellas articuladas, puesto que las uniones en madera no se pueden considerar nunca empotramientos. Ninguna de sus barras en sus nodos podrá transmitir momentos en ninguna dirección.
- Los ejes locales de las barras están todos orientados hacia el centro de la esfera, del mismo modo que deberá de estar construido. El eje 2 de SAP 2000, paralelo al canto tendrá que tener la dirección del centro, por lo que cada barra de la estructura tendrá una dirección diferente de sus ejes locales.
- Todas las condiciones de contorno (apoyos) de la estructura se han considerado también articulados.

2. ANÁLISIS DOMO GEODÉSICO 1

2.1. CÁLCULO Y APLICACIÓN DE CARGAS

El presente epígrafe tiene como objetivo calcular las acciones de la cúpula geodésica 1, así como documentar la aplicación de las cargas en el modelo de elementos finitos SAP2000 elaborado, para obtener los esfuerzos de cálculo con los que se dimensionará la estructura.

El modelo de SAP2000 desarrollado es un modelo con elementos tipo barra, por lo que todas las cargas aplicadas a la estructura se han estimado según el área tributaria de cada una de las barras.

2.1.1. ÁREA TRIBUTARIA

En el presente epígrafe se expone la metodología seguida para la atribución de las cargas a cada una de las barras. Una vez que el domo esté puesto en servicio, las fuerzas que deberá de resistir estarán directamente aplicadas sobre el cerramiento, que estará compuesto de tablero estructural; este elemento será el encargado de redistribuir uniformemente sus esfuerzos a las barras de la estructura.

Suponiendo uniformidad en el reparto de esfuerzos del tablero a la estructura, podemos estimar que cada una de las barras se llevará un tercio del área cargada del triángulo que tiene en uno de sus lados y un tercio del área del triángulo contiguo que tiene en su otro lado.

Para obtener el área tributaria de cada una de las barras, primero debemos de obtener el baricentro del triángulo, que es el punto donde se cruzan las medianas de la figura. El área que encierran las medianas (ejes azules) será el área tributaria aprovechable para la barra colindante a dicha superficie.

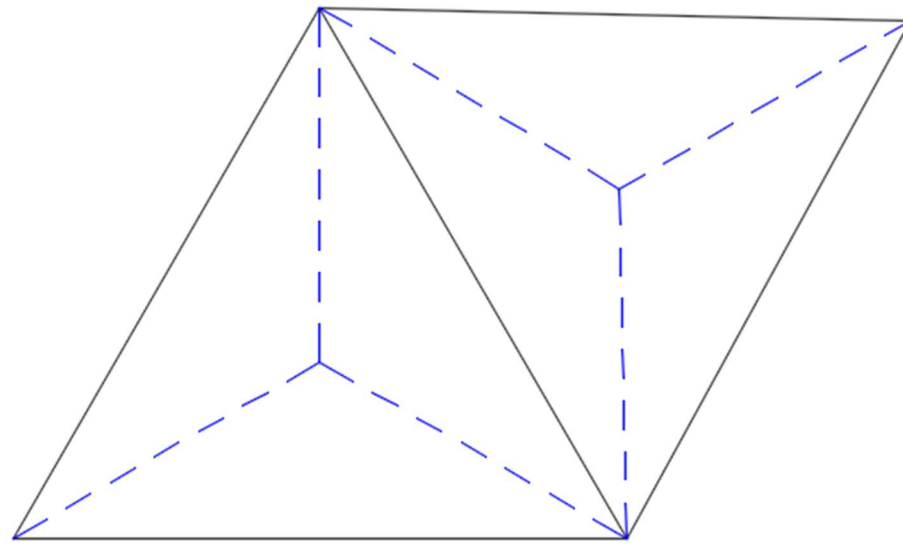


Ilustración 1. Baricentro del triángulo y medianas.

Por tanto, el área tributaria que será asignada a la barra de medianera entre ambos triángulos (barra marcada en rojo) será la superficie que queda contigua a dicha barra y encerrada entre las medianas de ambos baricentros de cada triángulo. Esta área se representa en la siguiente figura como el área sombreada en naranja.

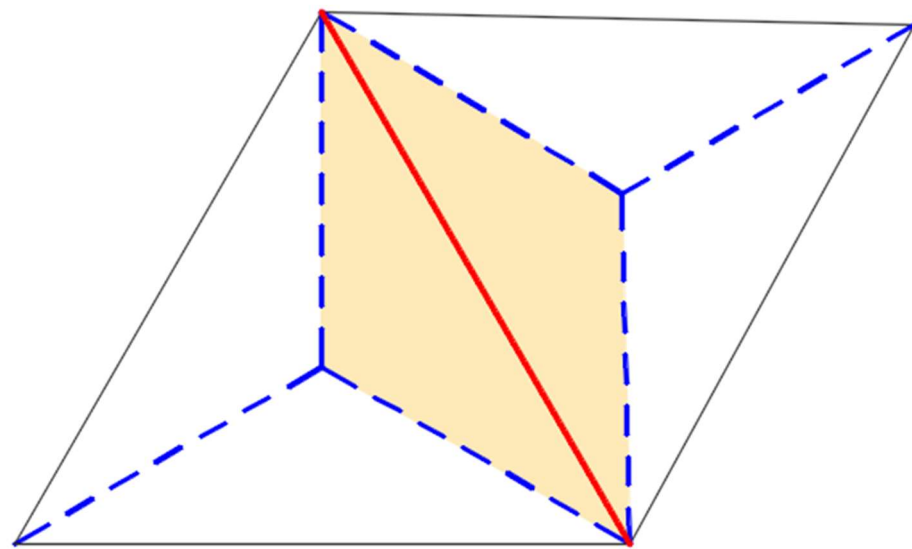


Ilustración 2. Área tributaria asignable a la barra medianera entre ambos triángulos.

Por tanto, dada la configuración del área tributaria como dos áreas triangulares, podemos estimar que la carga por metro lineal a aplicar a la barra tendrá también una configuración triangular. Se muestra el esquema de carga a aplicar a cada una de las barras:

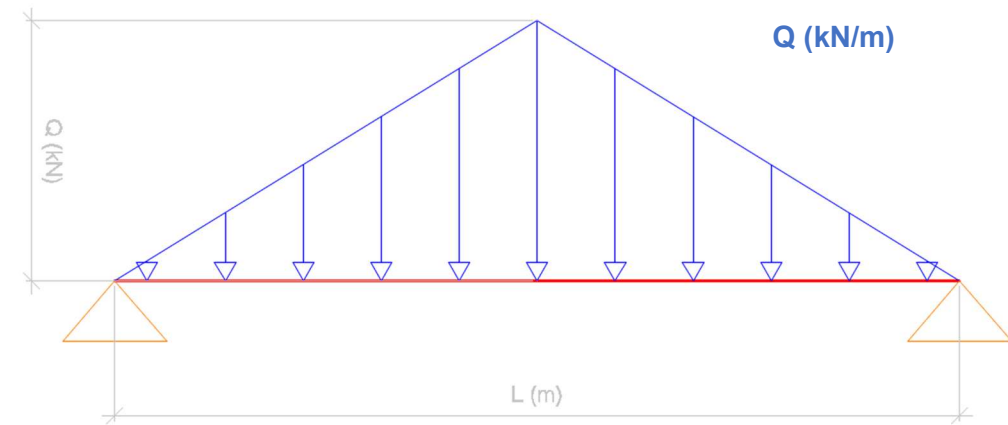


Ilustración 3. Esquema de cargas triangular.

Es posible que, la carga Q marcada en la figura como la carga máxima de la distribución triangular, no siempre esté ubicada en el centro de la barra. Esto dependerá de la uniformidad de los triángulos, es decir, si tenemos una barra con dos triángulos escalenos contiguos seguramente la carga tendrá dos picos no coincidentes. Para simplificar se puede suponer que la ley de carga tiene el mismo centro de gravedad y resultante.

No obstante, se escogerá que en cualquiera de los casos de carga y de cualesquiera que sea la configuración de sendos triángulos la carga pico siempre se ubicará en el centro de la barra entendiendo que es el caso más desfavorable para la estructura.

La forma con la que se calculará esta carga pico de la carga triangular será la siguiente:

Dada una carga por superficie aplicada sobre dos triángulos contiguos denominada P, con áreas tributarias en triángulos contiguos denominadas A₁ y A₂ y dada una longitud L de la barra. Se calcula la carga máxima q de la distribución triangular mediante la siguiente expresión:

$$q \left(\frac{kN}{m} \right) = \frac{P \left(\frac{kN}{m^2} \right) \cdot [A_1(m^2) + A_2(m^2)] \cdot 2}{L (m)}$$

Dadas las 160 barras con las que cuenta la estructura geodésica 1 se puede pensar que el número de áreas tributarias es demasiado significativo, sin embargo, dada la optimización de la geometría realizada en los anejos anteriores, podemos agrupar todas estas barras en 5 grupos de barras diferentes.

También se puede entender que las posibles combinaciones de triángulos de una misma barra pueden ser numerosas, pero esto no es así. Dada la configuración simétrica de una pieza denominada tipo B,

solo podrá estar ubicada entre los triángulos N°1 y N°2, por lo que, en cualquier parte de la que esté ubicada en la estructura siempre tendrá una misma área tributaria. Sucediendo lo mismo para el resto de barras, solo hay una posible área tributaria para cada pieza. Esto es una propiedad que facilita los cálculos y que es fruto del buen sistema de optimización aplicado para la creación de la geometría de la estructura.

Se debe de destacar que, las áreas tributarias siempre serán iguales en cada barra no dependiendo de la zona en la que estén ubicadas, pero es posible que la carga aplicada en uno de los lados de la barra sea diferente a la del otro. En este caso, se discretizará la expresión anterior del presente epígrafe, aplicando la carga correspondiente a cada área tributaria.

$$[(P_1 \cdot A_1 + P_2 \cdot A_2)] \cdot 2 / L$$

Por tanto, el área tributaria asignada a cada uno de los grupos de barras es la siguiente:

Grupo barras	Área tributaria (m2)
A	0,607
B	0,616
C	0,620
D	0,666
E	0,743

Tabla 1. Áreas tributarias de las piezas del domo geodésico 1.

Por otro lado, debemos de diferenciar las áreas tributarias que aplicaremos a las piezas de la estructura de la puerta del domo. El cálculo del área tributaria es similar al del resto del domo. Hallando el baricentro de las diferentes figuras, en este caso sobre trapecios y rectángulos en algunos casos y asignando el área entre la barra y las medianas.

Se muestra a continuación una ilustración de la enumeración de las barras de la puerta, y una tabla con sus áreas tributarias que serán utilizadas para los casos de carga gravitatorios. Veremos más adelante que en el caso de actuación del viento las áreas actuantes cambian para algunas piezas de la puerta, debido a que el viento no actúa en todos lados por igual.

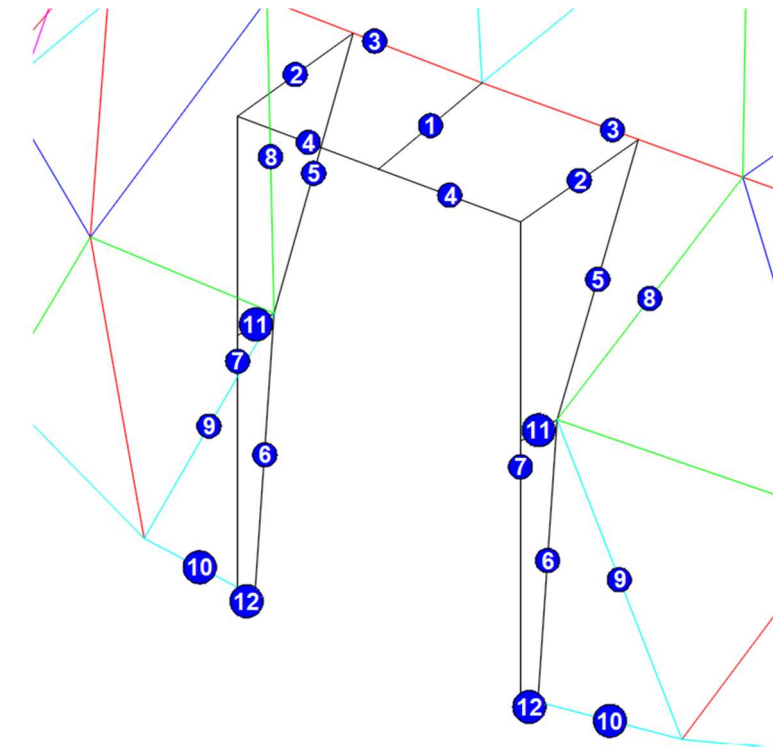


Ilustración 4. Enumeración de barras de la puerta Domo 1.

Grupo barras	Área tributaria (m2)
Barra 1	0,308
Barra 2	0,539
Barra 3	0,599
Barra 4	0,436
Barra 5	0,234
Barra 6	0,232
Barra 7	0,661
Barra 8	0,437
Barra 9	0,475
Barra 10	0,172
Barra 11	0,158
Barra 12	0,029

Tabla 2. Área tributaria en barras de la puerta - Domo 1.

2.1.2. ACCIONES PERMANENTES

El peso propio a tener en cuenta es el de los elementos estructurales y el cerramiento. Este valor característico de carga se determinará como el valor medio obtenido a partir de las dimensiones nominales de los pesos específicos de todos los elementos de la cúpula.

Para la estructura se empleará madera maciza aserrada de tipo C24, cuyo peso específico medio alcanza el valor de 4,20 kN/m³. El peso propio de la estructura será una carga aplicada automáticamente por el programa SAP2000.

Las cargas permanentes que tendrá la estructura será el peso de su cubierta, como se ha definido en apartados anteriores. El domo principalmente se cubrirá con tableros de madera con virutas de OSB orientadas y la aplicación de 3 cm de corcho proyectado orgánico, excepto algunos triángulos que irán acristalados y la carga muerta variará. No obstante, se ha estimado que toda la estructura estará cargada por el peso de la cubierta (sin acristalar) por ser esta una carga más desfavorable.

La cubierta estará compuesta por doble capa de tablero OSB de 15 mm de espesor, 7 cm de lana de roca, 3 cm de corcho proyectado y pintura de poliuretano para la impermeabilización. Se calcula a continuación las cargas que transmitirá a la estructura:

Material	Peso específico (kN/m ³)	Espesor (m)	Carga (kN/m ²)
Tablero OSB (x2)	10	0,015	0,15
Lana de Roca	2	0,010	0,02
Corcho proyectado	4	0,005	0,02
Pintura con poliuretano	3,33	0,003	0,01

Carga Muerta	0,35
---------------------	-------------

Tabla 3. Cálculo de la carga muerta por superficie del domo 1.

Según las áreas tributarias y la expresión de cálculo de la carga distribuida triangular expresada en el epígrafe anterior, se obtienen los siguientes resultados de carga muerta para cada una de las barras:

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra	Longitud	Carga Triangular (kN/m)
A	0,607	0,21	1,380	0,308
B	0,616	0,22	1,606	0,269
C	0,620	0,22	1,427	0,304
D	0,666	0,23	1,564	0,298
E	0,743	0,26	1,625	0,320
Barra 1	0,308	0,11	0,758	0,284
Barra 2	0,539	0,19	0,847	0,446
Barra 3	0,599	0,21	1,380	0,304
Barra 4	0,436	0,15	0,812	0,376
Barra 5	0,234	0,08	1,321	0,124
Barra 6	0,232	0,08	1,389	0,117
Barra 7	0,661	0,23	2,500	0,185
Barra 8	0,437	0,15	1,427	0,215
Barra 9	0,475	0,17	1,564	0,213
Barra 10	0,172	0,06	0,742	0,162
Barra 11	0,158	0,06	0,264	0,418

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra	Longitud	Carga Triangular (kN/m)
Barra 12	0,029	0,01	0,129	0,159

Tabla 4. Cálculo de la carga muerta por barra del domo 1.

Teniendo en cuenta que la carga muerta es una carga gravitatoria y que afecta a toda la estructura se muestra una ilustración de su aplicación en SAP2000.

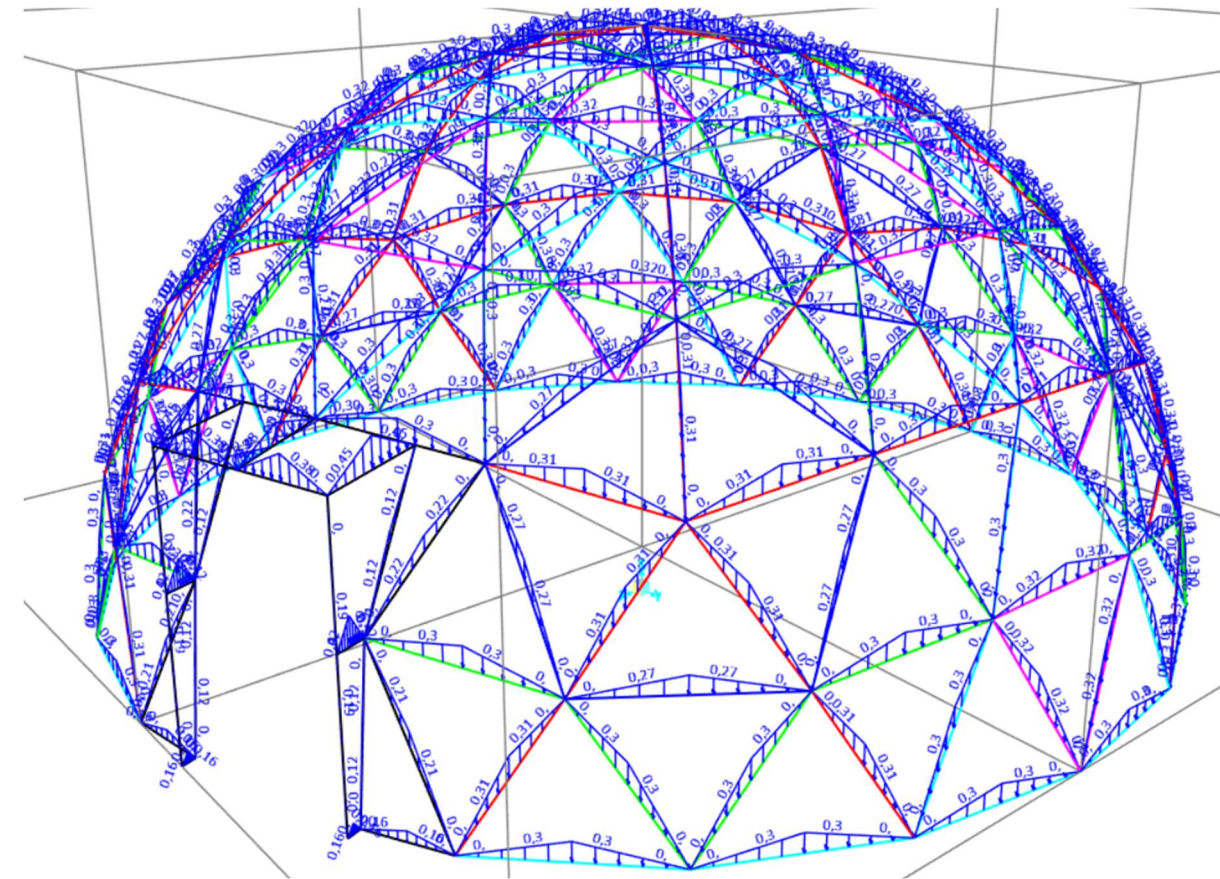


Ilustración 5. Carga muerta aplicada al domo geodésico 1.

2.1.3. ACCIONES VARIABLES

Las acciones variables son aquellas que pueden actuar o no sobre el domo, como las debidas a su uso o los agentes climáticos, como viento, nieve o acciones térmicas.

Según indica el CTE la aplicación de las cargas sobre cubiertas varía en función del ángulo que estas forman con la horizontal. Debido a que el domo tiene un gran número de triángulos y cada uno de ellos forma un plano con un ángulo diferente con respecto a la horizontal, se debe aplicar un método que simplifique la pendiente de cada triángulo. Por tanto, se va agrupar las diferentes pendientes del domo por cada fila de triángulos, asignando a cada fila la pendiente de menor valor de los triángulos que agrupa. De esta manera, se obtiene el caso más desfavorable, puesto que según el CTE cuanto

menor es la pendiente mayor es la carga que se debe aplicar, esto tiene su coherencia por ejemplo con la acumulación de nieve, esta no se acumulará cuando la pendiente sea elevada.

Para entender la agrupación de las filas con igual inclinación se muestra la siguiente ilustración. El domo representado es un domo de ejemplo, que cuenta con las mismas filas que el domo geodésico que estamos analizando en este epígrafe. El domo en V4 se puede agrupar en 6 filas de triángulos y 2 agrupaciones más para la puerta. La agrupación definida como puerta 1 se corresponde con aquellas piezas que están dispuestas en vertical y puerta 2 para las piezas horizontales.

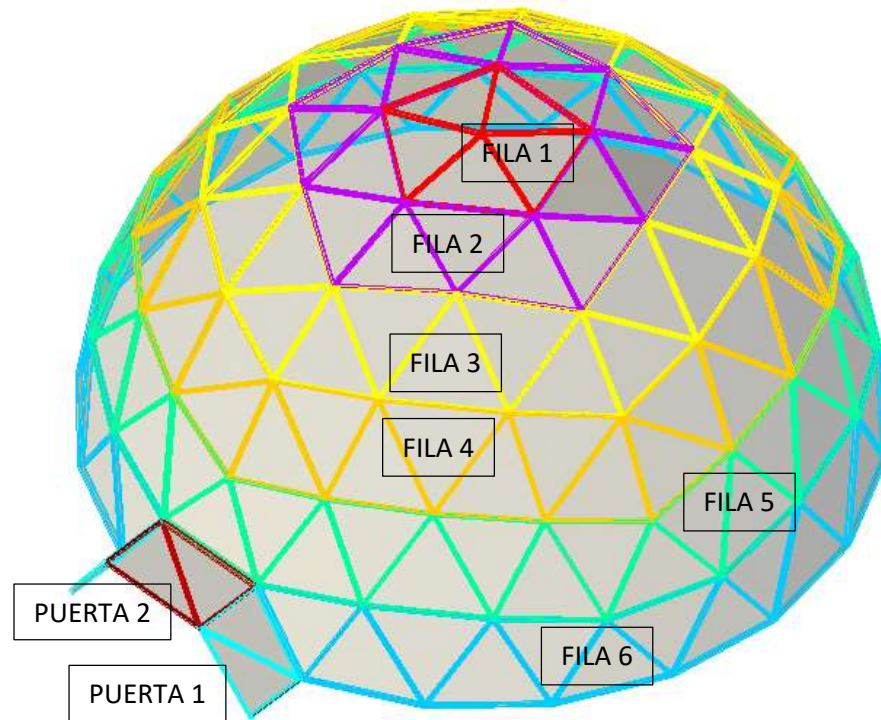


Ilustración 6. Clasificación del domo 1 por filas.

Los datos del ángulo asignado con respecto al a horizontal de todos los triángulos que corresponden con cada fila son los siguientes:

Nº FILA	ÁNGULO (Grados)
1	10°
2	17°
3	37°
4	48°
5	73°
6	80°
Puerta 1	90°
Puerta 2	0°

Tabla 5. Agrupación de filas domo 1.

2.1.3.1. Sobrecarga de Uso

La categoría de uso de la cubierta se determina que será una cubierta accesible únicamente para realizar trabajos de conservación. El CTE determina unas cargas en función de la inclinación de la cubierta, definiendo el tipo de carga para cubiertas con inclinación de 20° y 40°, siendo los valores de 0,40 kN/m² y 0,00 kN/m², respectivamente, mientras que para valores de inclinación intermedios se determinará mediante interpolación lineal entre estos dos valores.

Cubiertas accesibles solo para conservación		
Inclinación de la cubierta	Carga uniforme (kN/m ²)	Carga concentrada (kN)
<20°	0,4	1
20° < x < 40°	Interpolación lineal	1
>40°	0	1

Tabla 6. Sobrecarga de uso según la inclinación de la cubierta.

El coeficiente a aplicar para reducir la carga de sobrecarga de uso según la inclinación de la fila es la siguiente:

Fila	Coef. Inclinación
1	1,00
2	1,00
3	0,15
4	0,00
5	0,00
6	0,00
Puerta 1	0,00
Puerta 2	1,00

Tabla 7. Coeficiente de inclinación SCU.

Los resultados de aplicar las expresiones de la carga distribuida triangular y los coeficientes de inclinación según la fila, se muestran en la siguiente tabla:

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Coef. Inclinación	Carga Triangular (kN/m)
A	0,607	0,24	1,380	1	0,352
				0,15	0,053
B	0,616	0,25	1,606	1	0,307
C	0,620	0,25	1,427	1	0,347
				0,15	0,052
D	0,666	0,27	1,564	1	0,340
				0,15	0,051
E	0,743	0,30	1,625	1	0,366
				0,15	0,055
Barra 1	0,308	0,12	0,758	1	0,325

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Coef. Inclinación	Carga Triangular (kN/m)
Barra 2	0,178	0,07	0,847	1	0,169
Barra 3	0,174	0,07	1,380	1	0,101
Barra 4	0,154	0,06	0,812	1	0,152

Tabla 8. Distribución de cargas de sobrecarga de uso por fila.

Se han considerado dos posibles sobrecargas de uso, según dos situaciones diferentes de mantenimiento de la estructura, tratando de simular dos casos desfavorables. Las denominaremos SCU1 y SCU2, ambas tienen el mismo valor de cargas, pero tienen diferentes posiciones de la carga concentrada.

Acceder a la cubierta esférica del domo una vez ejecutado el cerramiento es una tarea complicada que requiere necesariamente de medios auxiliares como elevadores motorizados u otros elementos de seguridad en obra. Habitualmente durante la colocación del tablero se coloca una argolla clavada sobre la estructura que sirva de agarre de una línea de vida con un arnés sobre el operario. Este elemento suele disponerse en la clave del domo y puede acarrear cargas que se considera necesarias considerar a nivel de diseño. Por tanto, se han considerado dos situaciones donde operarios trabajan en diferentes posiciones del domo y usan este elemento de seguridad para operar sobre el domo cuando este está en fase de ejecución.

A continuación, se muestran las cargas aplicadas distribuidas para la sobrecarga de uso 1 (SCU1) y la sobrecarga de uso 2 (SCU2).

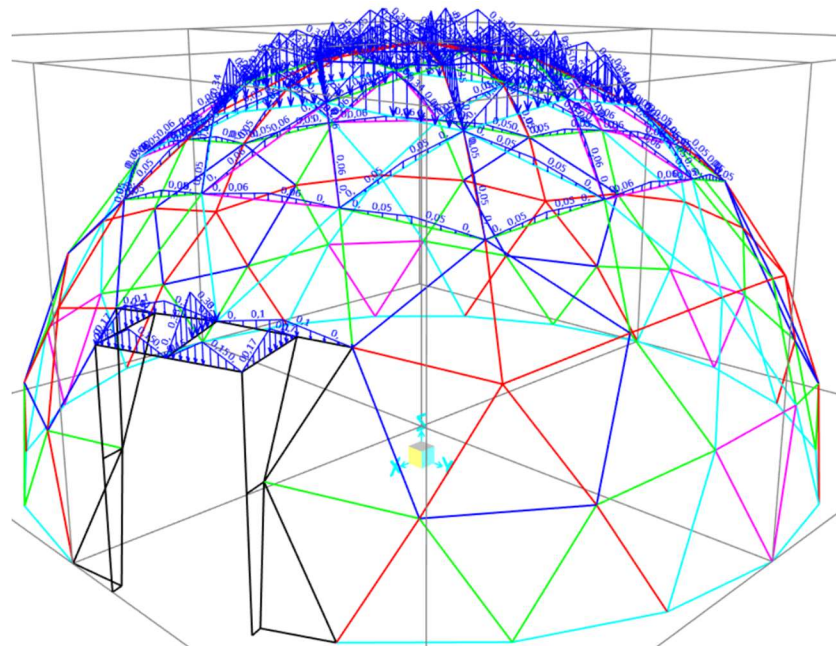


Ilustración 7. Sobrecarga de uso distribuida de SCU1 y SCU2 para domo 1.

Las cargas puntuales aplicadas son conservadoras suponiendo que trabajan hasta 3 y 4 operarios a la vez.

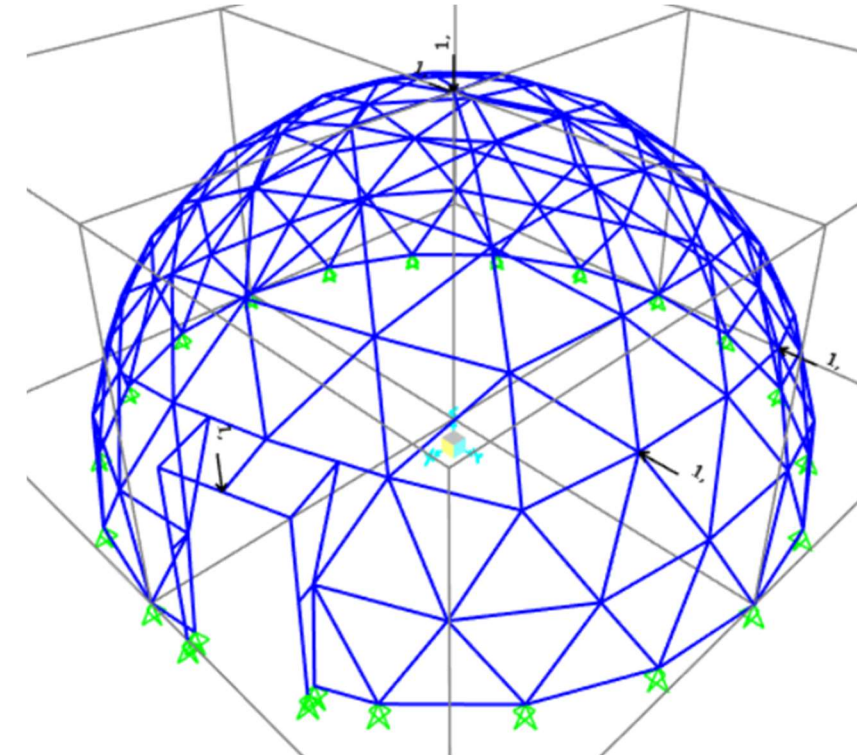


Ilustración 8. Cargas concentradas de SCU1 en Domo 1.

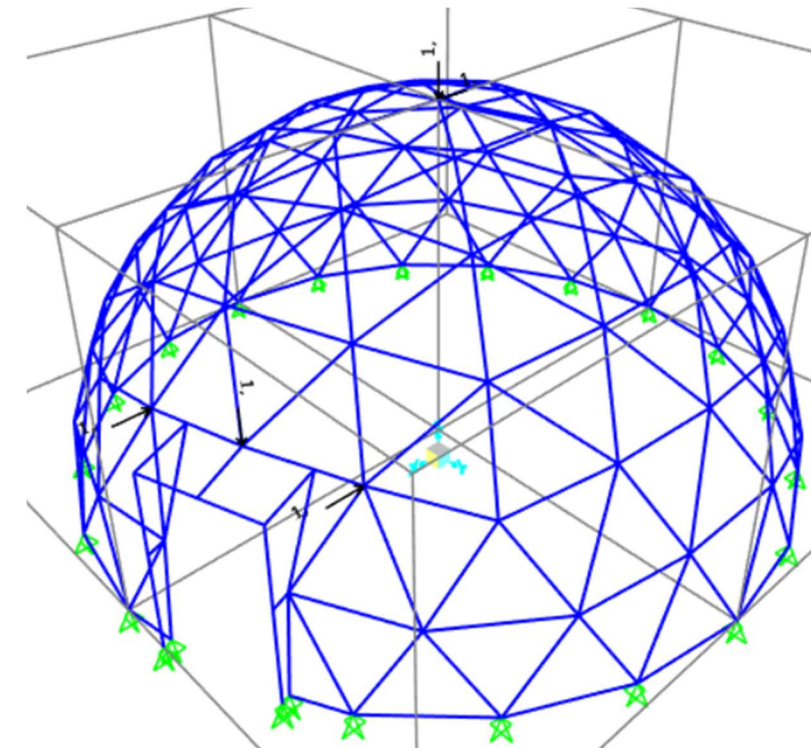


Ilustración 9. Carga concentrada de SCU2 en domo 1.

2.1.3.2. Sobrecarga de nieve

Considerando el domo de estudio una estructura ligera se tomará la carga de nieve por unidad de superficie según la siguiente expresión:

$$q_n = \mu \cdot s_k$$

siendo:

- μ coeficiente de forma de la cubierta según 3.5.3
- s_k el valor característico de la carga de nieve sobre un terreno horizontal según 3.5.2

La actuación se situará cercana al núcleo urbano del municipio de Picassent, cuya elevación sobre el nivel del mar es de 70 metros y el clima invernal es de valor 5. Con ello obtendremos el valor característico de la carga de nieve según el Anejo E del CTE – Acciones en la edificación.

Sobrecarga de nieve		
Parámetro	Valor	Unidad
Clima invernal	5	-
Altitud emplazamiento	70	m
Valor característico de la carga s_k	0,235	kN/m ²

Tabla 9. Valor característico de la sobrecarga de nieve.

El coeficiente de forma de la cubierta varía en función de la inclinación de la misma. Asignando el valor de 1 para cubiertas con inclinación igual o menor a 30° y el valor de 0 para cubiertas con inclinación mayor o igual a 60°, para valores intermedios se interpola linealmente.

Fila	Coef. de forma
1	1,00
2	1,00
3	0,77
4	0,00
5	0,00
6	0,00
Puerta 1	0,00
Puerta 2	1,00

Tabla 10. Coeficientes de inclinación por sobre carga de nieve.

A continuación, se muestra la carga triangular de nieve calculada según las expresiones anteriores.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Coeficiente de forma	Carga Triangular (kN)
A	0,607	0,14	1,380	1,00	0,207
				0,77	0,159
B	0,616	0,14	1,606	1,00	0,180
C	0,620	0,15	1,427	1,00	0,204

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Coeficiente de forma	Carga Triangular (kN)
D	0,666	0,16	1,564	0,77	0,156
				1,00	0,200
				0,77	0,153
E	0,743	0,17	1,625	1,00	0,215
				0,77	0,165
Barra 1	0,308	0,07	0,758	1,00	0,191
Barra 2	0,178	0,04	0,847	1,00	0,099
Barra 3	0,174	0,04	1,380	1,00	0,059
Barra 4	0,154	0,04	0,812	1,00	0,089

Tabla 11. Distribución de carga de nieve por barra en Domo 1.

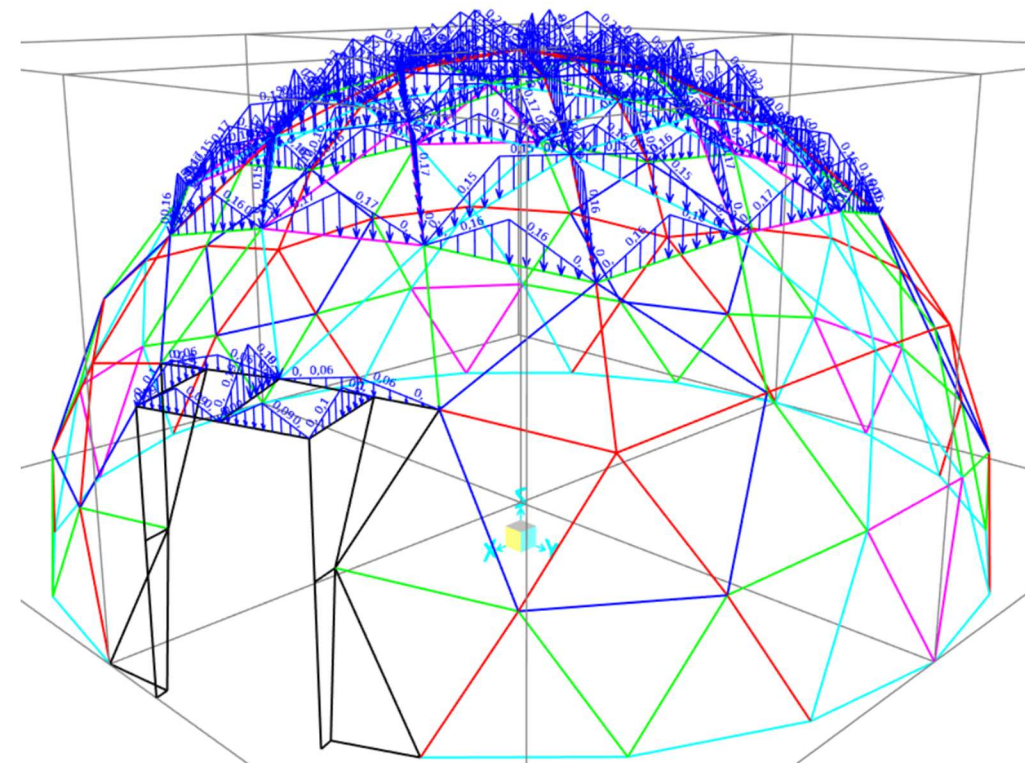


Ilustración 10. Aplicación de la carga de nieve en domo 1.

2.1.3.3. Acción del viento

La acción del viento sobre una estructura ligera como la que estamos analizando puede ser una de las acciones más significativas a las que va a estar solicitada la estructura. La acción del viento genera una fuerza perpendicular en cada punto de la estructura, esta fuerza la denominaremos como presión estática q_e , y la calcularemos mediante la siguiente expresión:

$$q_e = q_b \cdot C_e \cdot C_p$$

Siendo; q_b la presión dinámica del viento, C_e el coeficiente de exposición y C_p el coeficiente eólico.

La localidad de Picassent se encuentra en la zona A de valor básico de la velocidad del viento. Lo que corresponde una presión dinámica de 0,42 kN/m².



Figura D.1 Valor básico de la velocidad del viento, v_b

Ilustración 11. Valor básico de la velocidad del viento.

Para hallar el coeficiente de exposición, se considera que la ubicación de la obra es un terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia, y que la altura máxima que puede llegar a tener la estructura con respecto al terreno es de 6 metros. Por tanto, el coeficiente de exposición tendrá un valor de 2,50.

Tabla 3.4. Valores del coeficiente de exposición C_e

Grado de aspereza del entorno	Altura del punto considerado (m)							
	3	6	9	12	15	18	24	30
I Borde del mar o de un lago, con una superficie de agua en la dirección del viento de al menos 5 km de longitud	2,4	2,7	3,0	3,1	3,3	3,4	3,5	3,7
II Terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia	2,1	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3	3,5
III Zona rural accidentada o llana con algunos obstáculos aislados, como árboles o construcciones pequeñas	1,6	2,0	2,3	2,5	2,6	2,7	2,9	3,1
IV Zona urbana en general, industrial o forestal	1,3	1,4	1,7	1,9	2,1	2,2	2,4	2,6
V Centro de negocio de grandes ciudades, con profusión de edificios en altura	1,2	1,2	1,2	1,4	1,5	1,6	1,9	2,0

Ilustración 12. Valores de coeficiente de exposición C_e .

El coeficiente eólico o de presión depende de la forma y la orientación de la superficie respecto al viento. Debido a la forma esférica del domo se tomarán los datos del Anejo D – Tabla D13. Cubiertas

esféricas para hallar el coeficiente eólico, dónde se considera un coeficiente eólico de presión y otro de succión.

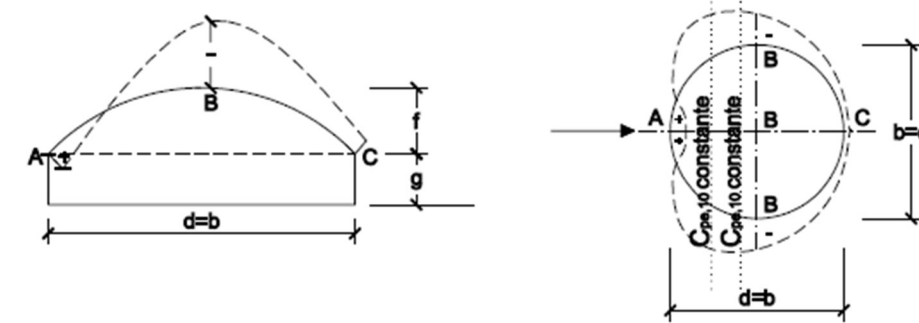


Ilustración 13. Distribución de las cargas de viento en cubiertas esféricas.

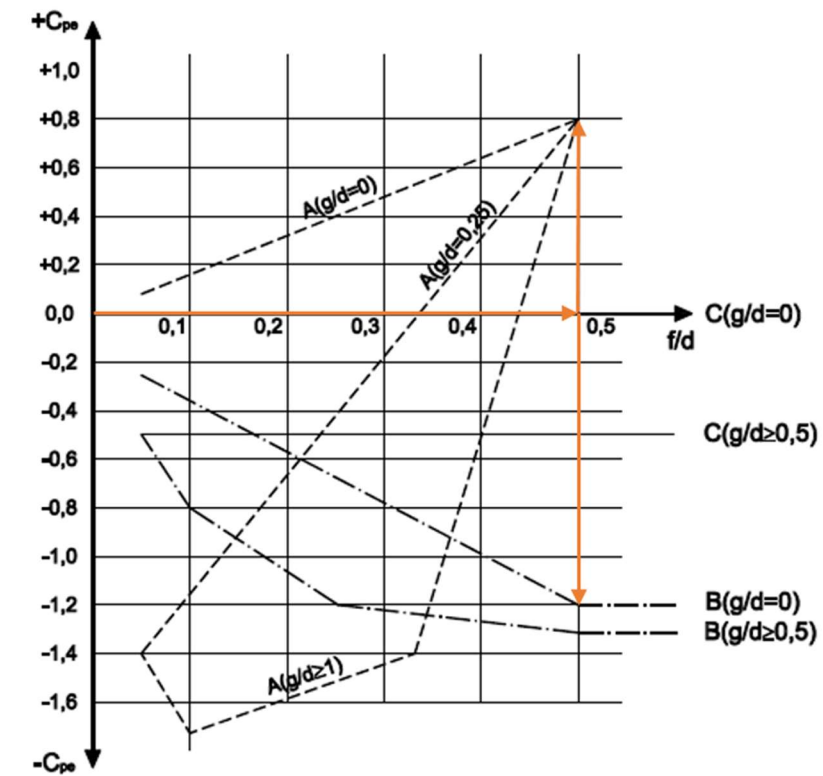


Ilustración 14. Coeficiente eólico en cubiertas esféricas.

Se consideran las siguientes premisas para hallar el coeficiente eólico:

- $g/d = 0$
- $f/d = 0,50$

Con ello se obtienen los siguientes coeficientes de eólicos según el punto de la estructura.

Coeficientes eólicos	
A	0,8
B	-1,2
C	0

Tabla 12. Coeficientes eólicos.

Con todo ello se hallan las siguientes cargas de presión y succión:

Acciones del viento			
Presión dinámica	q_b	0,42	kN/m ²
Coeficiente de exposición	C_e	2,50	-
Coeficiente eólico	A	0,8	-
	B	-1,2	-
	C	0	-
Carga de presión	$q_{\text{presión}}$	0,84	kN/m²
Carga de succión	$q_{\text{succión}}$	-1,26	kN/m²

Tabla 13. Acciones de viento sobre la estructura.

Se le aplica a la estructura 8 casos de carga de viento, diferenciando dos direcciones principales de viento y dos sentidos por cada dirección, teniendo en cuenta separadamente caso de carga por presión y por succión. Arbitrariamente se denomina barlovento al sentido del viento que produce presiones sobre la puerta (dirección 1) o presiones sobre la parte derecha del domo cuando se mira desde fuera hacia la puerta (dirección 2). Se enumeran cada uno de estos casos de carga y su codificación:

- Dirección principal 1. Sentido de la carga: Barlovento. Esta acción actúa en perpendicular al plano de la puerta en sentido hacia el interior del domo. Con ello se obtienen los siguientes casos de carga:
 - VP1-B. Viento de presión en dirección principal 1 – Barlovento.
 - VS1-B. Viento de succión en dirección principal 1 – Barlovento.
- Dirección principal 1. Sentido de la carga: Sotavento. Esta acción actúa en perpendicular al plano de la puerta empujando desde la parte opuesta de la puerta. Con ello se obtienen los siguientes casos de carga:
 - VP1-S. Viento de presión en dirección principal 1 – Sotavento.
 - VS1-S. Viento de succión en dirección principal 1 – Sotavento.

- Dirección principal 2. Sentido de la carga: Barlovento. Esta acción actúa en paralelo al plano de la puerta empujando desde el lateral derecho del domo. Con ello se obtienen los siguientes casos de carga:
 - VP2-B. Viento de presión en dirección principal 2 – Barlovento.
 - VS2-B. Viento de succión en dirección principal 2 – Barlovento.
- Dirección principal 2. Sentido de la carga: Sotavento. Esta acción actúa en paralelo al plano de la puerta empujando desde el lateral izquierdo del domo. Con ello se obtienen los siguientes casos de carga:
 - VP2-S. Viento de presión en dirección principal 2 – Sotavento.
 - VS2-S. Viento de succión en dirección principal 2 – Sotavento.

A continuación, se exponen los resultados de las cargas distribuidas triangulares que produciría los casos de viento correspondientes a la dirección principal del viento 1, todos ellos se agrupan en una sola tabla para evitar la reiteración de datos. Cabe destacar que las cargas correspondientes a los grupos de barra de la puerta son para las cargas de presión 1 barlovento y la de succión 1 sotavento.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular (kN)
A	0,6074	0,51	1,380	0,740
B	0,6162	0,52	1,606	0,644
C	0,6196	0,52	1,427	0,729
D	0,6657	0,56	1,564	0,715
E	0,743	0,62	1,625	0,768
Barra 1	0,3078	0,26	0,758	0,682
Barra 2	0,1784	0,15	0,847	0,354
Barra 3	0,5992	0,50	1,380	0,730
Barra 4	0,6616	0,56	0,812	1,368
Barra 5	0,234	0,20	1,321	0,298
Barra 6	0,2315	0,19	1,389	0,280
Barra 7	1,1877	1,00	2,500	0,798
Barra 8	0,4374	0,37	1,427	0,515
Barra 9	0,4754	0,40	1,564	0,511
Barra 10	0,1717	0,14	0,742	0,389

Tabla 14. Viento de presión en dirección 1 en domo 1.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular (kN)
A	0,6074	-0,77	1,380	-1,109
B	0,6162	-0,78	1,606	-0,967
C	0,6196	-0,78	1,427	-1,094

D	0,6657	-0,84	1,564	-1,072
E	0,743	-0,94	1,625	-1,153

Tabla 15. Viento de succión en dirección 1 en domo 1.

Del mismo modo, se exponen los datos de los valores de carga en la dirección 2. Cabe destacar que las áreas tributarias cargadas en las barras de la puerta varían en función de la aplicación de la carga.

Grupo barras	Área tributaria (m2)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular (kN)
A	0,6074	0,51	1,380	0,740
B	0,6162	0,52	1,606	0,644
C	0,6196	0,52	1,427	0,729
D	0,6657	0,56	1,564	0,715
E	0,743	0,62	1,625	0,768
Barra 2	0,3608	0,30	0,847	0,716
Barra 5	0,1125	0,09	1,321	0,143
Barra 6	0,0598	0,05	1,389	0,072
Barra 7	0,1723	0,14	2,500	0,116
Barra 11	0,1577	0,13	0,264	1,004
Barra 12	0,0292	0,02	0,129	0,381

Tabla 16. Viento de presión en dirección 2 en domo 1.

Grupo barras	Área tributaria (m2)	Carga por barra	Longitud	Carga Triangular por barra
A	0,6074	-0,77	1,380	-1,109
B	0,6162	-0,78	1,606	-0,967
C	0,6196	-0,78	1,427	-1,094
D	0,6657	-0,84	1,564	-1,072
E	0,743	-0,94	1,625	-1,153
Barra 1	0,3078	-0,39	0,758	-1,024
Barra 2	0,1784	-0,22	0,847	-0,531
Barra 3	0,4777	-0,60	1,380	-0,873
Barra 4	0,1539	-0,19	0,812	-0,477
Barra 5	0,1215	-0,15	1,321	-0,232

Tabla 17. Viento de succión en dirección 2 en domo 1.

A continuación, se muestra una ilustración sobre la aplicación de las cargas de viento en el modelo de SAP2000 de cada uno de los casos de carga mencionados.

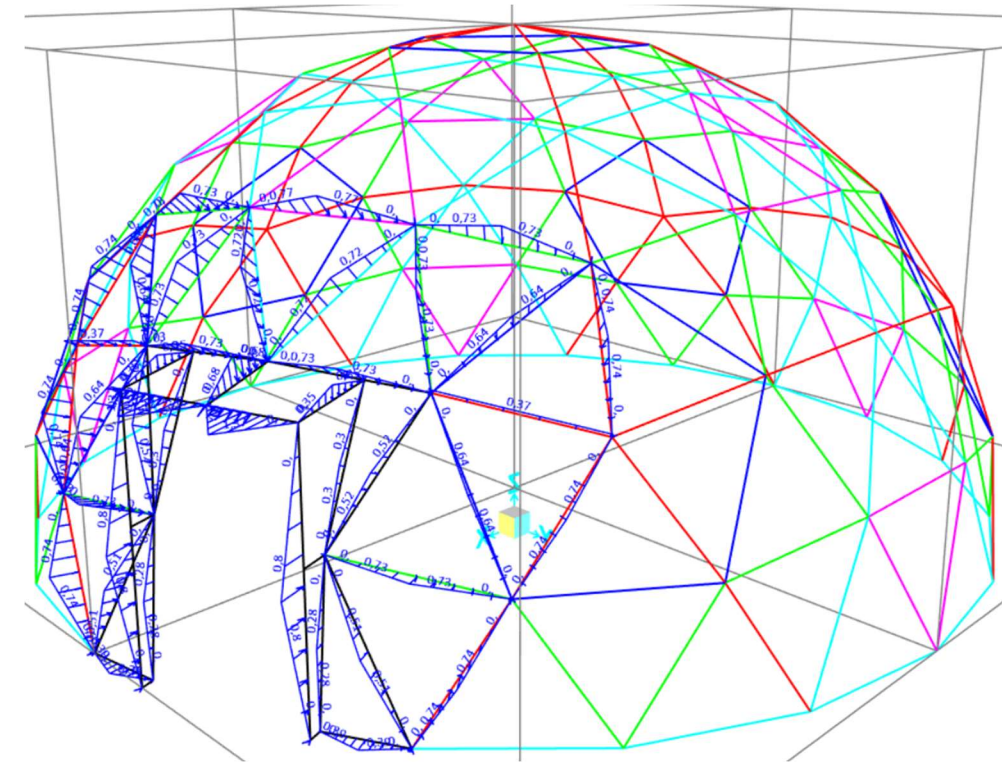


Ilustración 15. Viento de presión dirección 1 - Barlovento.

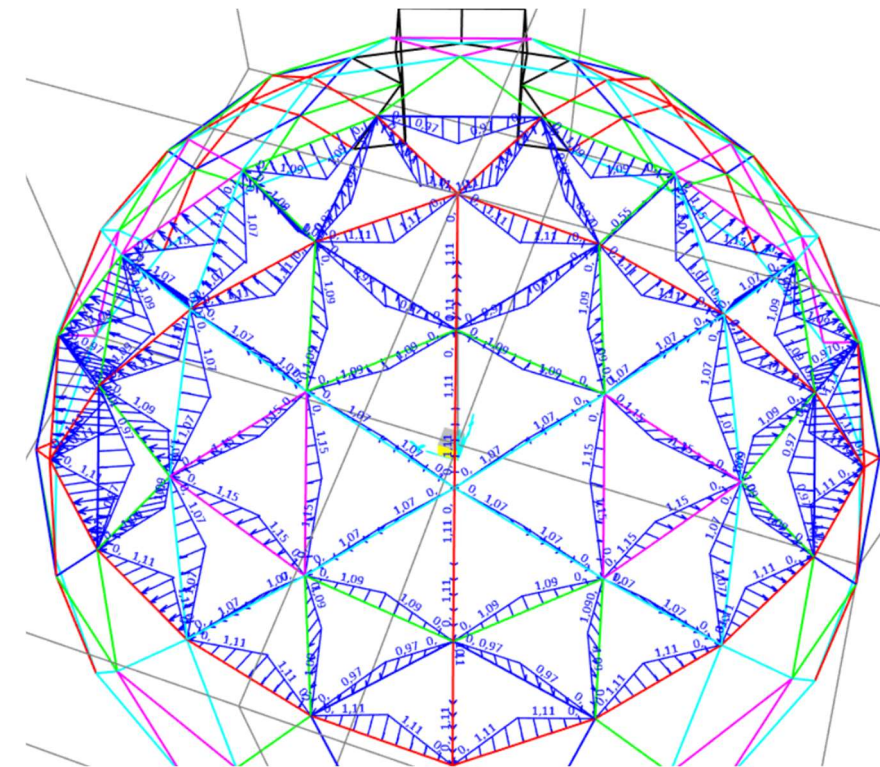


Ilustración 16. Viento de succión dirección 1 - Barlovento.

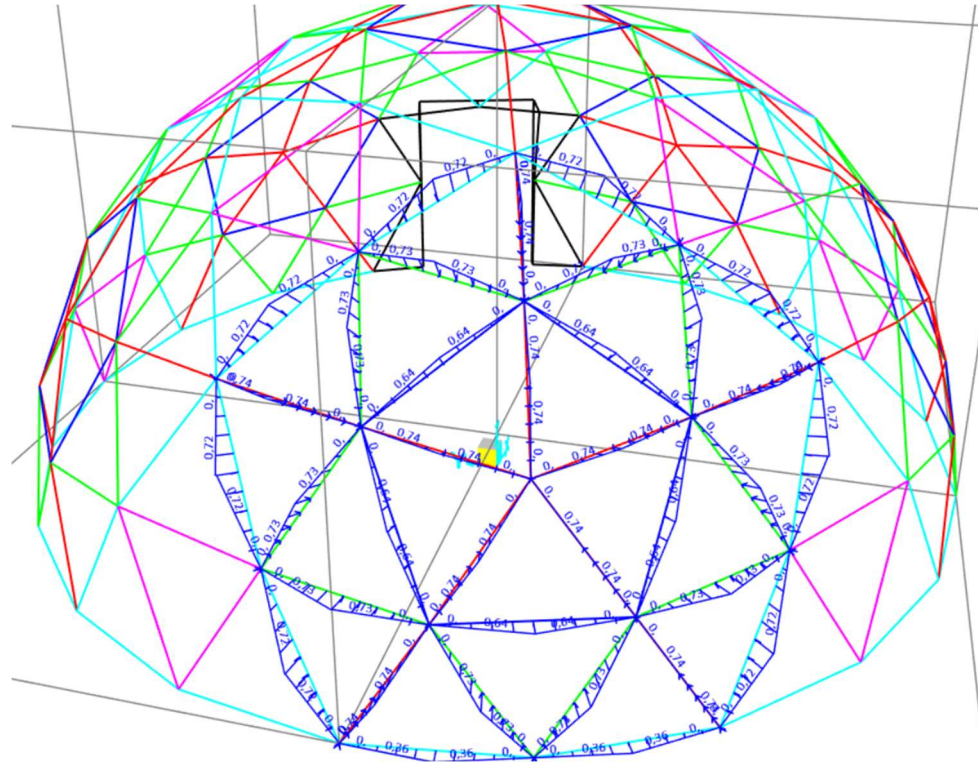


Ilustración 17. Viento de presión dirección 1 - Sotavento.

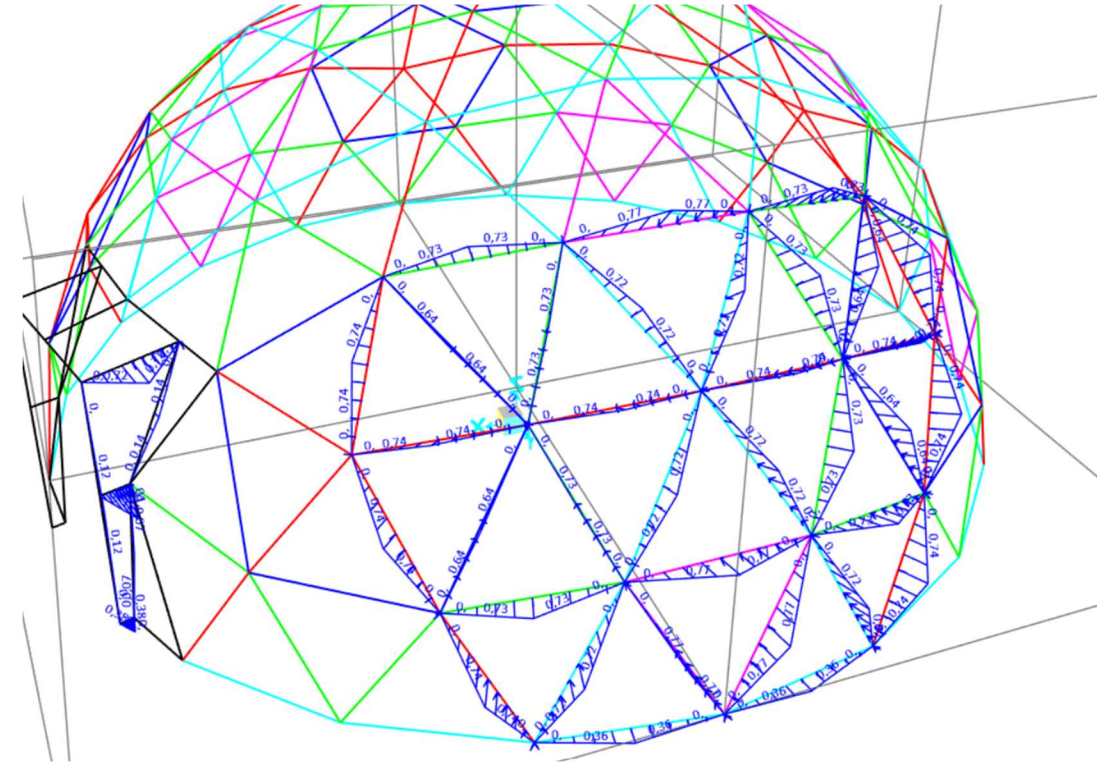


Ilustración 19. Viento de presión dirección 2 - Barlovento.

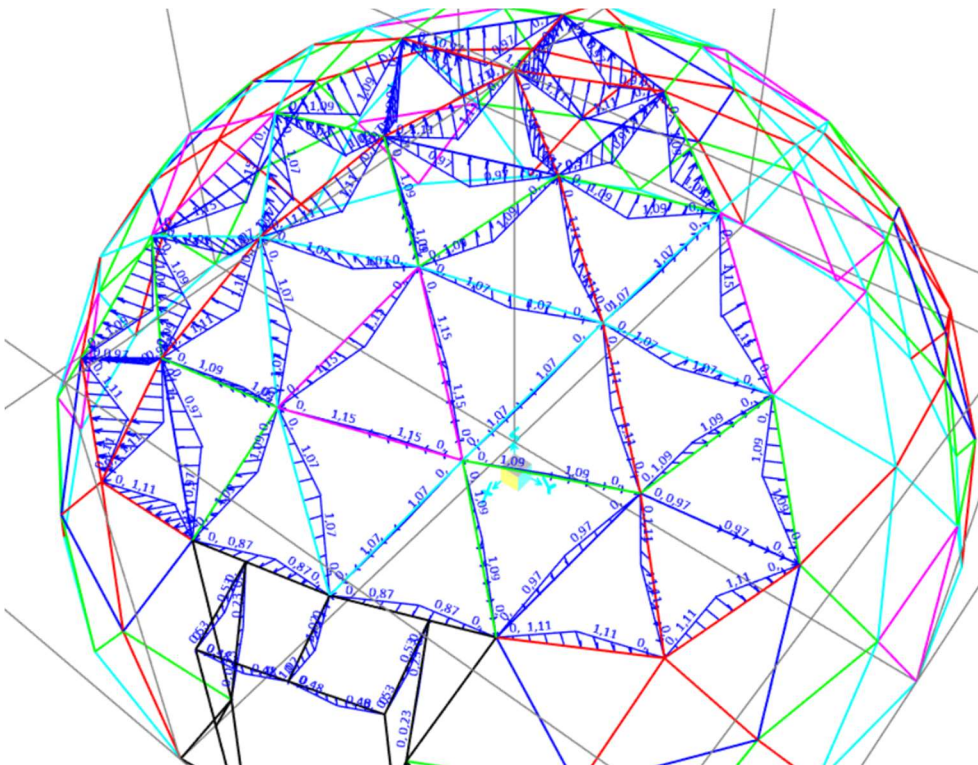


Ilustración 18. Viento de succión dirección 1 - Sotavento.

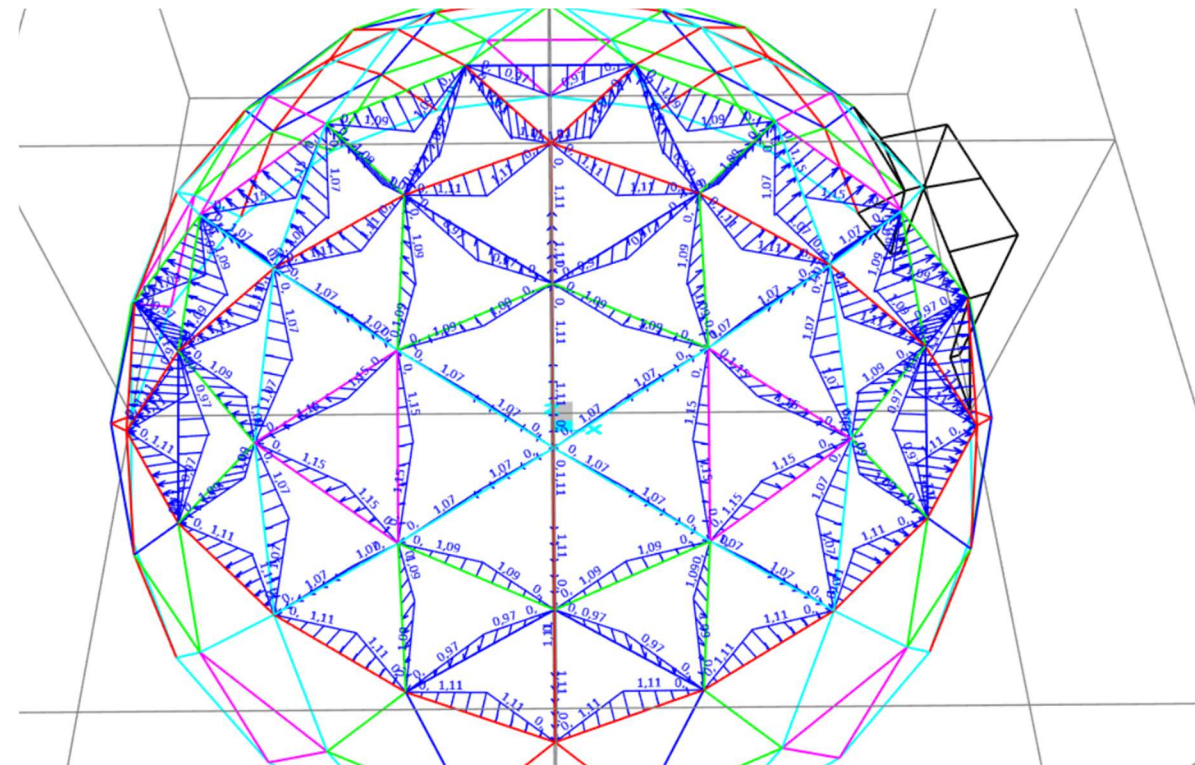


Ilustración 20. Viento de succión dirección 2 - Barlovento.

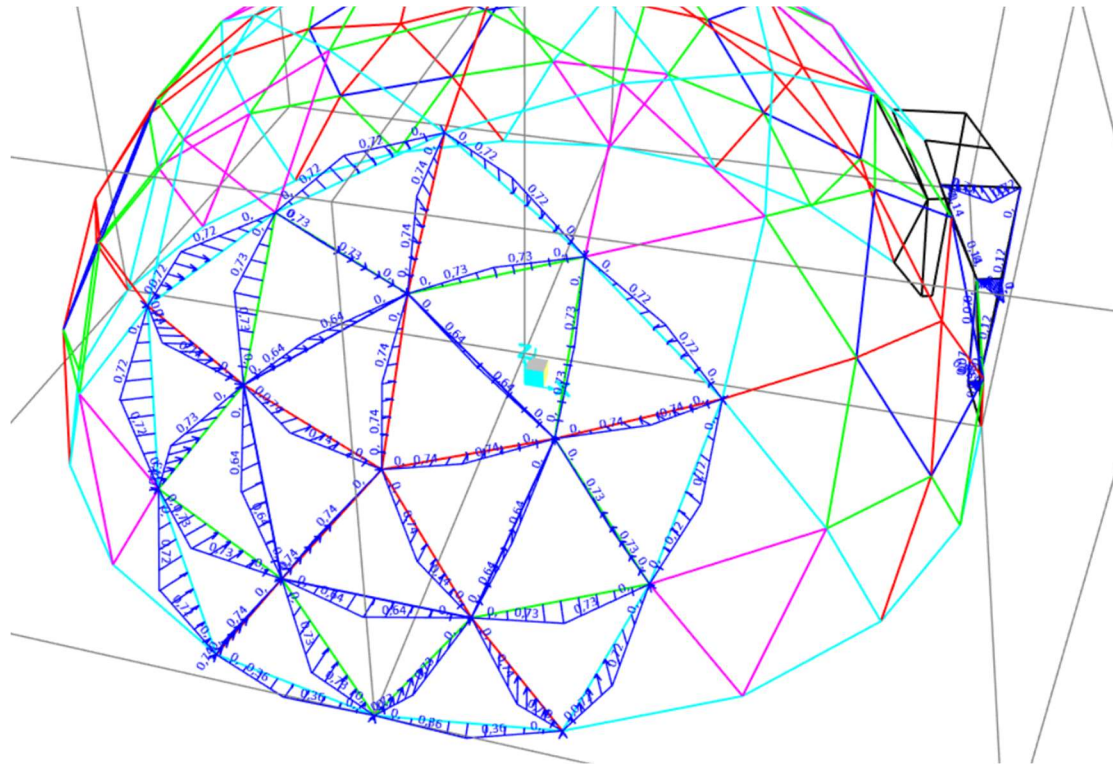


Ilustración 21. Viento de presión dirección 2 - Sotavento.

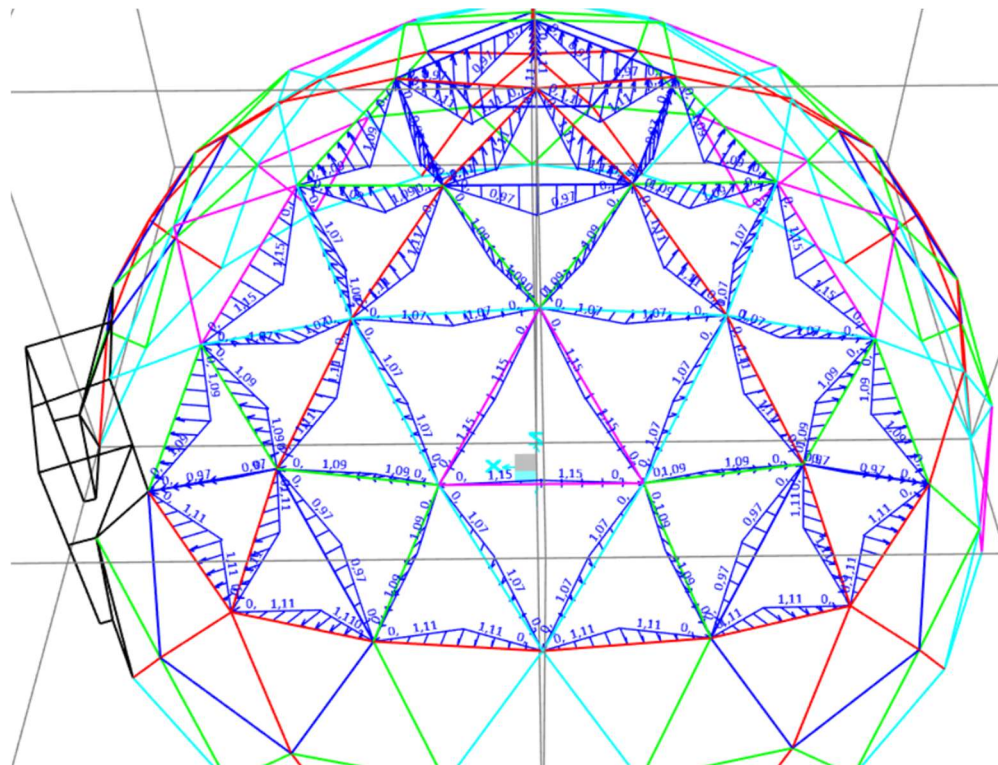


Ilustración 22. Viento de succión dirección 2 - Sotavento.

2.1.3.4. Acciones térmicas

Los efectos globales de la acción térmica pueden obtenerse de la variación media de los elementos estructurales para los efectos del verano y del invierno, a partir de una temperatura de referencia cuando se construiría la estructura, que puede tomarse en este caso de 10°C.

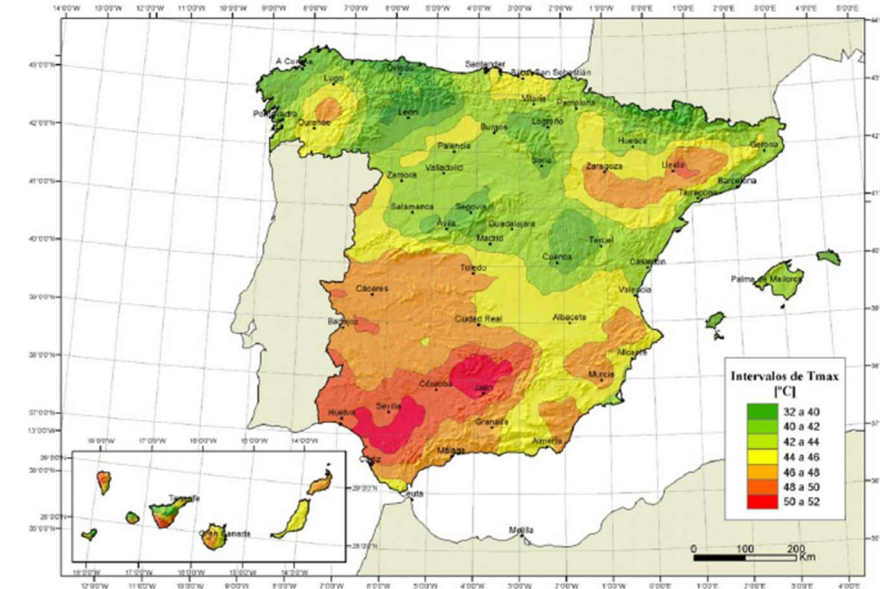


Figura E.1 Isotermas de la temperatura anual máxima del aire (T_{max} en °C)

Ilustración 23. Isotermas de temperatura anual máxima del aire.

Dada la localización del municipio de Picassent, se puede tomar que la temperatura máxima anual puede alcanzar los 46°C. La temperatura máxima a adoptar será la extrema del ambiente exterior más la incrementada en la procedente del efecto de la radiación solar según la siguiente tabla:

Tabla 3.7 Incremento de temperatura debido a la radiación solar

Orientación de la superficie	Color de la superficie		
	Muy claro	Claro	Oscuro
Norte y Este	0 °C	2 °C	4 °C
Sur y Oeste	18 °C	30 °C	42 °C

Tabla 18. Incremento de temperatura debido a la radiación solar.

La superficie será de color blanca, lo que corresponde a un color muy claro, y la orientación nos quedamos con la más desfavorable puesto que se tratará de edificaciones aisladas. Por tanto, se incrementará la temperatura +18°C.

Para la temperatura mínima del aire exterior nos guiaremos según la siguiente tabla:

Tabla E.1 Temperatura mínima del aire exterior (°C)

Altitud (m)	Zona de clima invernal, (según figura E.2)						
	1	2	3	4	5	6	7
0	-7	-11	-11	-6	-5	-6	6
200	-10	-13	-12	-8	-8	-8	5
400	-12	-15	-14	-10	-11	-9	3
600	-15	-16	-15	-12	-14	-11	2
800	-18	-18	-17	-14	-17	-13	0
1.000	-20	-20	-19	-16	-20	-14	-2
1.200	-23	-21	-20	-18	-23	-16	-3
1.400	-26	-23	-22	-20	-26	-17	-5
1.600	-28	-25	-23	-22	-29	-19	-7
1.800	-31	-26	-25	-24	-32	-21	-8
2.000	-33	-28	-27	-26	-35	-22	-10

Tabla 19. Temperatura mínima del aire exterior (°C).

Teniendo en cuenta que la zona de clima invernal corresponde a la 5 y la altitud del emplazamiento se encuentra a 70 m; la temperatura mínima en este caso sería de -6 °C.

Temperaturas extremas de los elementos estructurales (°C)	
Temperatura mínima	-6
Temperatura máxima	64

Tabla 20. Temperaturas extremas de los elementos estructurales.

2.1.4. ACCIONES ACCIDENTALES

2.1.4.1. Acciones sísmicas

No se considera la acción del sismo por no cumplir los requisitos de aplicación establecidos en la Norma de Construcción Sismo Resistente (NCSE).

La aceleración sísmica básica del emplazamiento se considera inferior a 0,04g y la importancia de la construcción se considera moderada.

2.1.4.2. Incendio

No se considera realizar un modelo de cálculo de incendio puesto que los elementos tendrán suficiente resistencia al fuego. Deberán de cumplir con una resistencia al fuego de los elementos estructurales de R30, mientras que las uniones como clavos lisos, tirafondos, pernos y conectores será de R15, y cuando se empleen pasadores tendrán R20.

2.2. COMBINACIÓN DE ACCIONES

En el siguiente epígrafe se mostrará la combinación de acciones utilizada en el cálculo de la estructura. Se puede observar en la siguiente tabla el listado de casos de carga que se van a utilizar y que se han calculado en el presente anejo.

Casos de carga	
Descripción	Código
Peso propio	PP
Carga muerta	CM
Sobrecarga de uso 1	SCU1
Sobrecarga de uso 2	SCU2
Viento de presión 1	VP1
Viento de succión 1	VS1
Viento de presión 2	VP2
Viento de succión 2	VS2
Nieve	SNOW
Temperatura máxima	Tmax
Temperatura mínima	Tmin

Tabla 21. Listado de casos de carga domo 1.

2.2.1. COMBINACIÓN DE ACCIONES ELU

Para el cálculo del valor las acciones para comprobar la capacidad portante de la estructura en una situación persistente o transitoria, se determina mediante la combinación de acciones a partir de la siguiente expresión:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

es decir, considerando la actuación simultánea de:

- todas las acciones permanentes, en valor de cálculo ($\gamma_G \cdot G_k$), incluido el pretensado ($\gamma_P \cdot P$);
- una acción variable cualquiera, en valor de cálculo ($\gamma_Q \cdot Q_k$), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis;
- el resto de las acciones variables, en valor de cálculo de combinación ($\gamma_Q \cdot \psi_0 \cdot Q_k$).

Dado que la estructura es una cubierta con acceso solo para trabajos de conservación, la sobrecarga de uso no aplicará cuando cualquiera de las acciones variables se considere la acción dominante de la combinación. Por otro lado, no se puede considerar que actúan SCU 1 y SCU2 a la vez, del mismo modo que, las 2 direcciones principales de viento no pueden actuar simultáneamente. Al igual que la temperatura máxima no es concomitante con la temperatura mínima ni con la nieve.

A continuación, se muestran los coeficientes parciales de seguridad y los coeficientes de simultaneidad de los casos de carga.

Descripción	Código	Coeficientes parciales de seguridad		Coeficientes de simultaneidad	
		Desfavorable	Favorable		
Peso propio	PP	1,35	0,80	No aplica	
Carga muerta	CM	1,35	0,80		
Sobrecarga de uso 1	SCU1	1,50	0,00	0,00	
Sobrecarga de uso 2	SCU2			0,00	
Viento de presión 1	VP1			0,60	
Viento de succión 1	VS1				
Viento de presión 2	VP2				
Viento de succión 2	VS2				
Temperatura máxima	Tmax				
Temperatura mínima	Tmin				
Nieve	SNOW				0,50

Tabla 22. Coeficientes de seguridad y simultaneidad de los casos de carga.

Se ha considerado realizar todas las combinaciones posibles de entre estos casos de carga, teniendo en cuenta la concomitancia de las acciones. Los listados de las combinaciones de acciones para las comprobaciones de estado límite último se pueden encontrar en: ANEXO 1. COMBINACIÓN DE ACCIONES ELU.

2.2.2. COMBINACIÓN DE ACCIONES ELS

Las combinaciones de acciones para comprobar que el efecto de las acciones no alcanza el valor límite admisible de servicio, se hallarán mediante la siguiente expresión para las acciones de corta duración que pueden resultar irreversibles:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

Es decir, considerando la actuación simultánea de:

- todas las acciones permanentes, en valor característico (G_k);
- una acción variable cualquiera, en valor característico (Q_k), debiendo adoptarse como tal una tras otra sucesivamente en distintos análisis;
- el resto de las acciones variables, en valor de combinación ($\psi_0 \cdot Q_k$).

Para la comprobación de estado límite de servicio se empleará la combinación característica dado que solo se va a realizar la comprobación de flechas.

Descripción	Código	Coeficientes de simultaneidad	
Peso propio	PP	No aplica	
Carga muerta	CM		
Sobrecarga de uso 1	SCU1	0,00	
Sobrecarga de uso 2	SCU2		
Viento de presión 1	VP1	0,60	
Viento de succión 1	VS1		
Viento de presión 2	VP2		
Viento de succión 2	VS2		
Temperatura máxima	Tmax		
Temperatura mínima	Tmin		
Nieve	SNOW		0,50

Tabla 23. Coeficientes de simultaneidad en ELS acciones de corta duración.

Igual que en el caso anterior, se exponen los listados de las combinaciones de acciones utilizadas para las comprobaciones de estado límite de servicio en: ANEXO 2. COMBINACIÓN DE ACCIONES ELS.

2.3. ESFUERZOS DE CÁLCULO

Para hallar los esfuerzos máximos de cálculo se ha realizado dos combinaciones de acciones de tipo envolvente, la primera, para hallar los esfuerzos de cálculo en estado límite último y la segunda para los desplazamientos máximos del estado límite de servicio.

A continuación, se muestran los esfuerzos máximos tras la combinación envolvente en ELU:

El valor máximo del axil de tracción es de 10,13 kN. Mientras que el valor máximo del axil de compresión es de -12,38 kN.

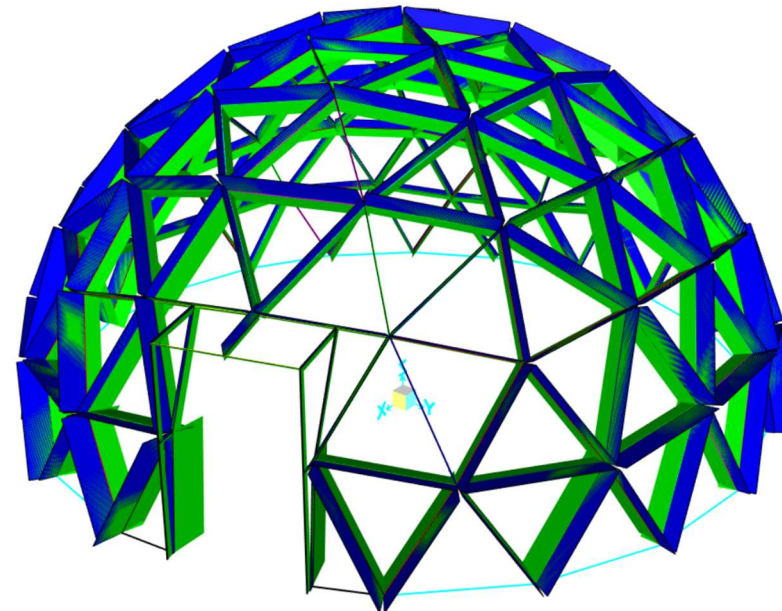


Ilustración 24. Axil máximo y mínimo en ELU - Domo 1.

El cortante 2-2 de valor máximo es de 1,66 kN, mientras que el de valor mínimo es de -1,65 kN.

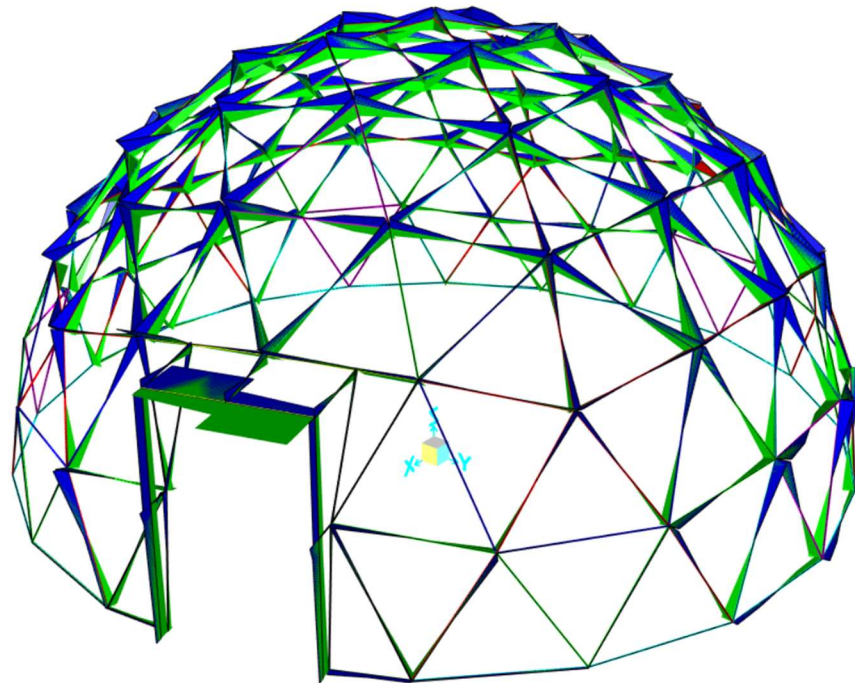


Ilustración 25. Cortante máximo y mínimo en la dirección paralela al canto de la pieza en ELU - Domo 1.
(Cortante 2-2)

El cortante 3-3 de valor máximo es de 2,19 kN y el de valor mínimo es de -2,14 kN.

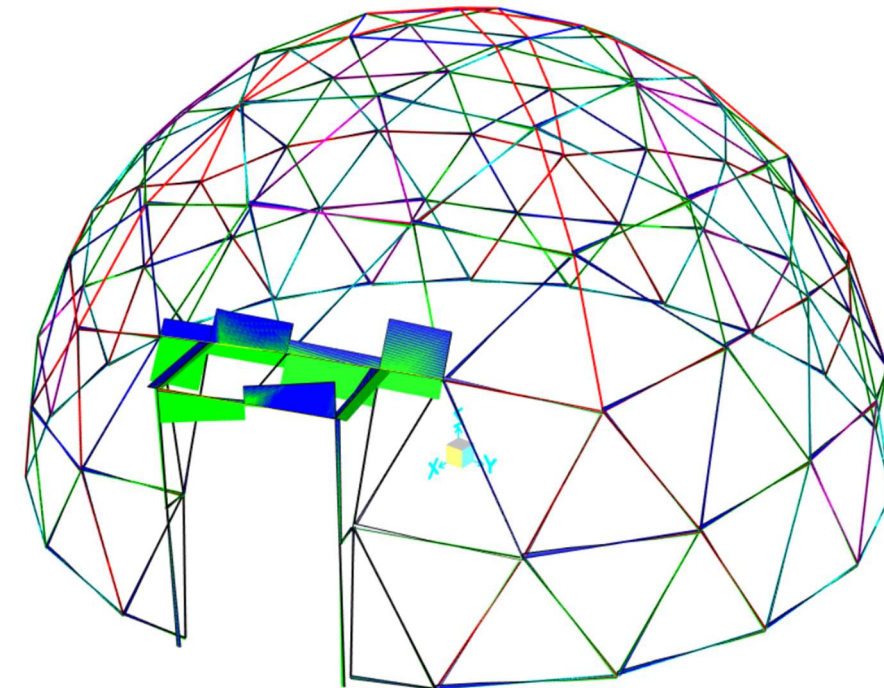


Ilustración 26. Cortante máximo y mínimo en la dirección perpendicular al canto de la pieza en ELU - Domo 1.
(Cortante 3-3).

El valor máximo de los esfuerzos de torsión es de 0,04 kN y su valor mínimo de -0,04 kN.

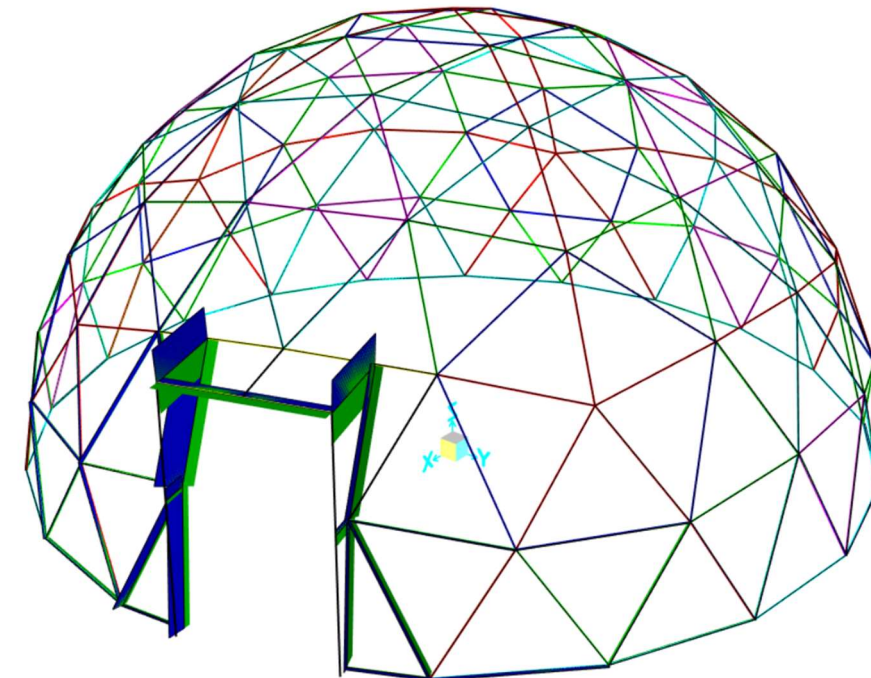


Ilustración 27. Torsión máxima y mínima en ELU - Domo 1.

El valor máximo de los esfuerzos flectores 2-2 es de 0,94 kN.m, mientras que el valor mínimo es de -1,18 kN.m.

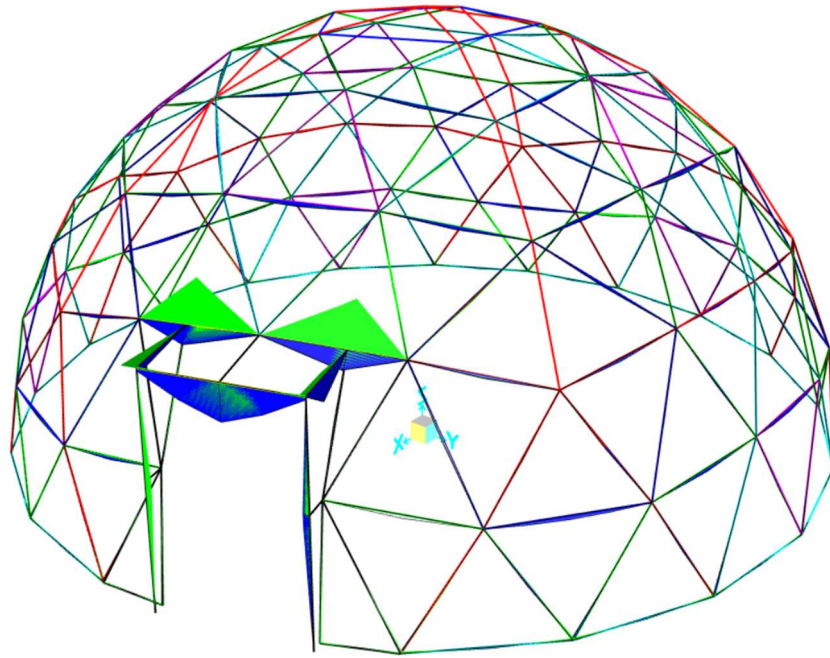


Ilustración 28. Flectores máximos y mínimos sobre el eje paralelo al canto de la pieza en ELU - Domo 1. (Momento 2 -2).

El valor máximo del esfuerzo flector 3-3 es de 0,67 kN.m y su valor mínimo es de -0,94 kN.m.

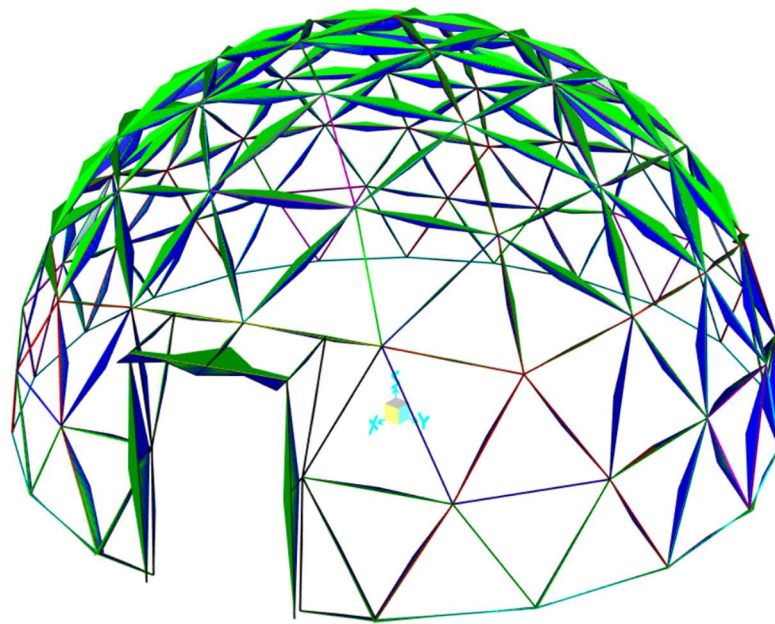


Ilustración 29. Flectores máximos y mínimos sobre el eje perpendicular al canto de la pieza en ELU - Domo 1. (Momento 3 -3).

Esfuerzos de cálculo			
Descripción	Parámetro	Valor (kN o kN.m)	Combinación
Axil máximo a tracción	P max	10,13	COMB093
Axil máximo a compresión	P min	-12,38	COMB066
Cortante positivo paralelo al canto	V2 max	1,66	COMB064
Cortante negativo paralelo al canto	V2 min	-1,65	COMB064
Cortante positivo perpendicular al canto	V3 max	2,19	COMB064
Cortante negativo perpendicular al canto	V3 min	-2,14	COMB064
Torsor máximo positivo	Tmax	0,04	COMB064
Torsor máximo negativo	Tmin	-0,04	COMB064
Flexión sobre el plano perpendicular al canto	M2 max	0,94	COMB040
Flexión sobre el plano perpendicular al canto	M2 min	-1,18	COMB064
Flexión sobre el plano paralelo máxima positiva	M3 max	0,67	COMB064
Flexión sobre el plano paralelo máxima negativa	M3 min	-0,94	COMB084

Tabla 24. Esfuerzos de cálculo - Domo 1.

2.4. REACCIONES DE CÁLCULO

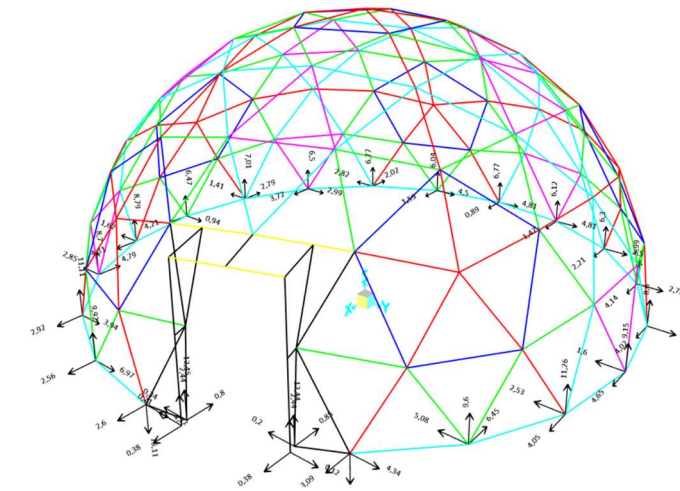


Ilustración 30. Reacciones máximas en los apoyos de la estructura en ELS – Domo 1.

Reacciones de cálculo			
Dirección de la reacción	Valor máximo de la reacción	Nº Nudo	Combinación
F1	-6,42	104	COMB092
F2	6,67	120	COMB056
F3	-14,93	121	COMB093

Tabla 25. Valor máximo de las reacciones ELU - Domo 1.

2.5. DESPLAZAMIENTOS DE CÁLCULO

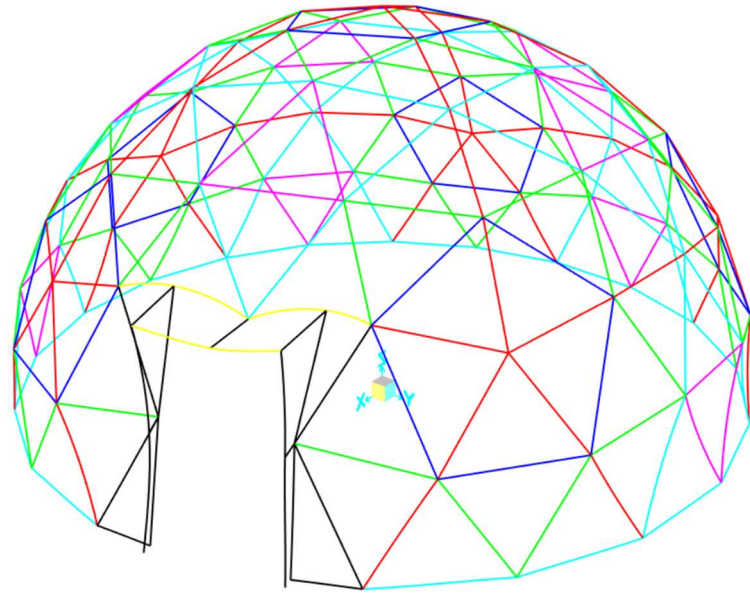


Ilustración 31. Máximos desplazamientos en ELS.

Se resume el resultado de los desplazamientos máximos del análisis estructural del domo 1:

Desplazamientos y giros de cálculo			
Dirección del desplazamiento ejes locales	Desplazamiento máximo en valor absoluto (mm)	Nº Nudo	Combinación
U1	7,0	325	ELS-COMB040
U2	3,3	222	ELS-COMB077
U3	8,0	325	ELS-COMB040
Giros	Giro máximo en valor absoluto	Nº Nudo	Combinación
R1	0,0065	302	ELS-COMB040
R2	0,0058	303	ELS-COMB020
R3	0,0080	302	ELS-COMB040

Tabla 26. Desplazamientos y giros máximos en ELS - Domo 1.

3. ANÁLISIS DOMO GEODÉSICO 2

3.1. CÁLCULO Y APLICACIÓN DE CARGAS

Para el análisis estructural de los esfuerzos de la estructura geodésica 2 del presente proyecto se seguirán los mismos criterios que para la estructura 1, desarrollados en el epígrafe 2.1 del presente anejo.

La estructura geodésica 2 se trata de un domo en frecuencia V2 de 6 metros de diámetro calculado mediante el método de Medios Arcos de Clase 1, tal y como se muestra en la siguiente imagen:

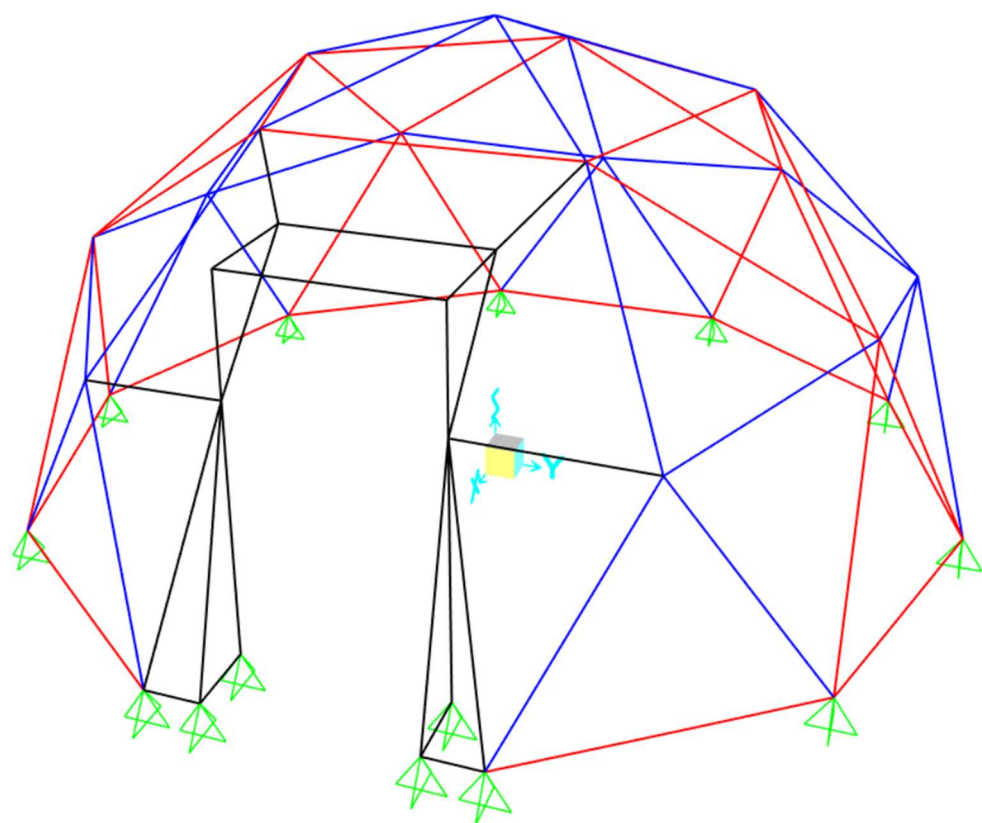


Ilustración 32. Representación del modelo de la estructura geodésica 2.

3.1.1. CÁLCULO DE ÁREAS TRIBUTARIAS

El domo geodésico 2 se compone de 65 barras distribuidas en solo dos tipos. La barra tipo A marcada en rojo y la barra tipo B en azul, según la ilustración anterior. A esto se le añaden 11 piezas especiales para la configuración de la puerta.

A continuación, se exponen las áreas tributarias para cada una de las barras

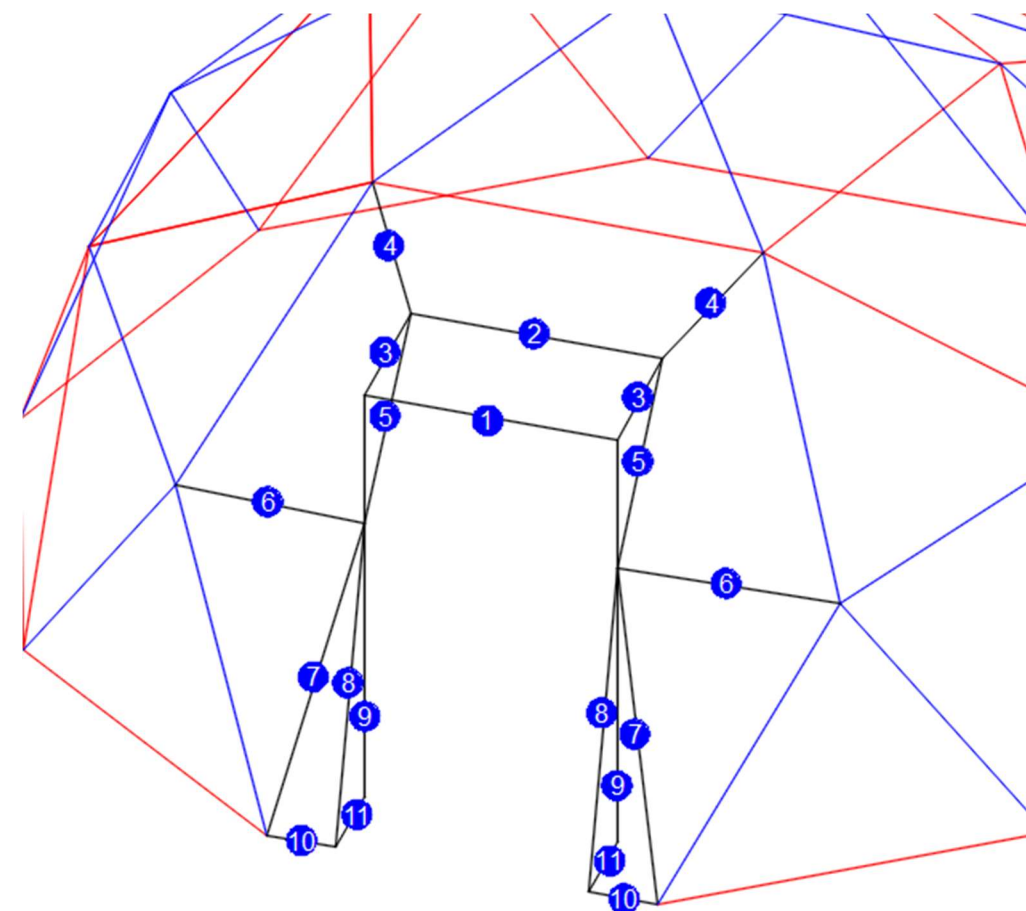


Ilustración 33. Denominación de las piezas de la puerta del domo geodésico 2.

Grupo barras	Área tributaria	LONGITUD
A	0,914	1,854
B	0,836	1,640
P1	0,202	1,200
P2	0,344	1,200
P3	0,288	0,690
P4	0,425	0,666
P5	0,321	0,983
P6	0,522	1,023
P7	0,346	1,593
P8	0,192	1,559
P9	0,192	2,200
P10	0,107	0,426
P11	0,085	0,327

Tabla 27. Áreas tributarias de domo geodésico 2.

3.1.2. ACCIONES PERMANENTES

Del mismo modo que el caso anterior, el peso propio de la estructura estará automáticamente introducido por el programa SAP2000.

Las cargas muertas que proporcionará el cerramiento de la estructura tendrán un valor de 0,35 kN/m² tal y como se han calculado para la estructura 1.

Teniendo en cuenta las áreas tributarias y las longitudes de las barras, se le aplicará al modelo los siguientes datos de cargas distribuidas triangulares, siendo el valor mostrado el valor pico de la carga triangular ubicado en el centro de la barra y desciende hasta el valor 0 en sus extremos.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular (kN/m)
A	0,914	0,32	1,854	0,345
B	0,836	0,29	1,640	0,357
A-BASE	0,496	0,17	1,854	0,187
P1	0,202	0,07	1,200	0,118
P2	0,344	0,12	1,200	0,201
P3	0,288	0,10	0,690	0,292
P4	0,425	0,15	0,666	0,447
P5	0,321	0,11	0,983	0,228
P6	0,522	0,18	1,023	0,358
P7	0,346	0,12	1,593	0,152
P8	0,192	0,07	1,559	0,086
P9	0,192	0,07	2,200	0,061
P10	0,107	0,04	0,426	0,175
P11	0,085	0,03	0,327	0,182

Tabla 28. Carga muerta aplicada en domo geodésico 2.

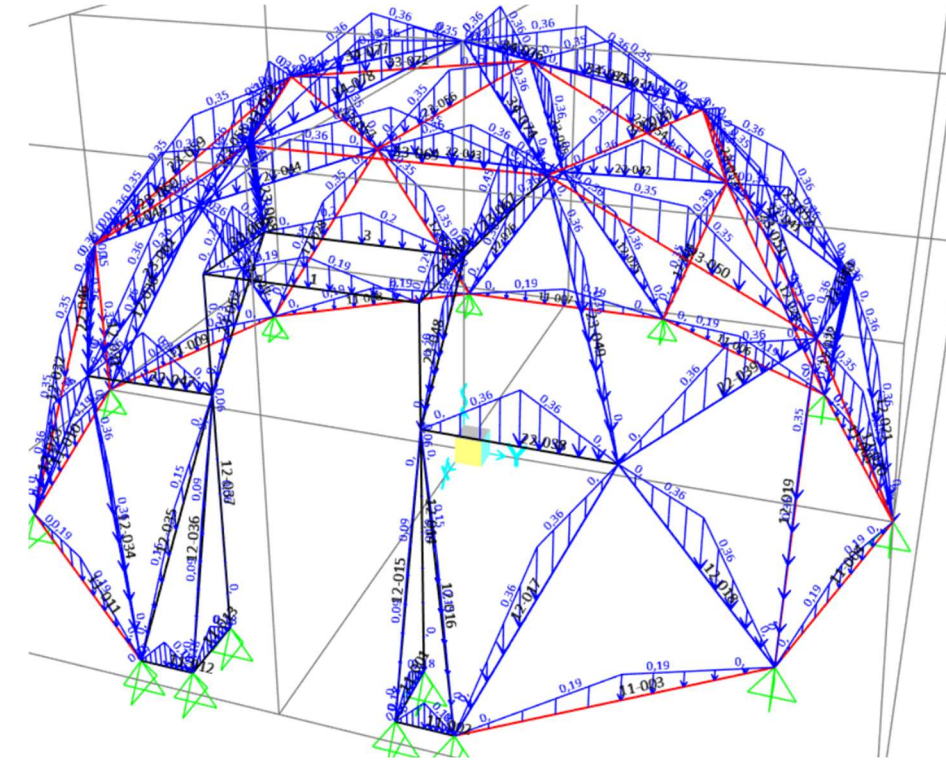


Ilustración 34. Aplicación de la carga muerta a la estructura 2.

3.1.3. ACCIONES VARIABLES

3.1.3.1. Sobrecarga de uso

Del mismo modo que para la estructura 1, se exponen a continuación los valores de los coeficientes de inclinación según las filas de la estructura para ponderar la sobrecarga de uso debida a labores de mantenimiento en función de la zona. Y posteriormente las cargas aplicadas.

Se han creado dos casos de sobrecarga de uso, en los cuales representan dos situaciones desfavorables que pueden producirse durante el mantenimiento, para ello se han variado la aplicación de cargas puntuales simulando posibles posiciones de operarios de mantenimiento.

Fila	Inclinación (grados)	Coef. Inclinación
1	16,00	1,00
2	37,00	0,16
3	79,00	0,00
Puerta 1	0,00	1,00
Puerta 2	90,00	0,00

Tabla 29. Coeficientes de inclinación según la fila o posiciones de la puerta.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Coef. Inclinación	Carga Triangular por barra
A-FILA 1	0,914	0,37	1,854	1	0,394
A-FILA 2	0,914	0,06	1,854	0,16	0,063
A-FILA 3	0,914	0,00	1,854	0,00	0,000
A-BASE	0,496	0,00	1,854	0,00	0,000
B-FILA 1	0,836	0,33	1,640	1,00	0,408
B-FILA 2	0,836	0,05	1,640	0,16	0,065
B-FILA 3	0,836	0,00	1,640	0,00	0,000
P1	0,202	0,08	1,200	1,00	0,134
P2	0,344	0,14	1,200	1,00	0,229
P3	0,288	0,12	0,690	1,00	0,333
P4	0,425	0,00	0,666	0,00	0,000
P5	0,321	0,00	0,983	0,00	0,000
P6	0,522	0,00	1,023	0,00	0,000
P7	0,346	0,00	1,593	0,00	0,000
P8	0,192	0,00	1,559	0,00	0,000
P9	0,192	0,00	2,200	0,00	0,000
P10	0,107	0,00	0,426	0,00	0,000
P11	0,085	0,00	0,327	0,00	0,000

Tabla 30. Valores de la sobrecarga de uso en domo geodésico 2.

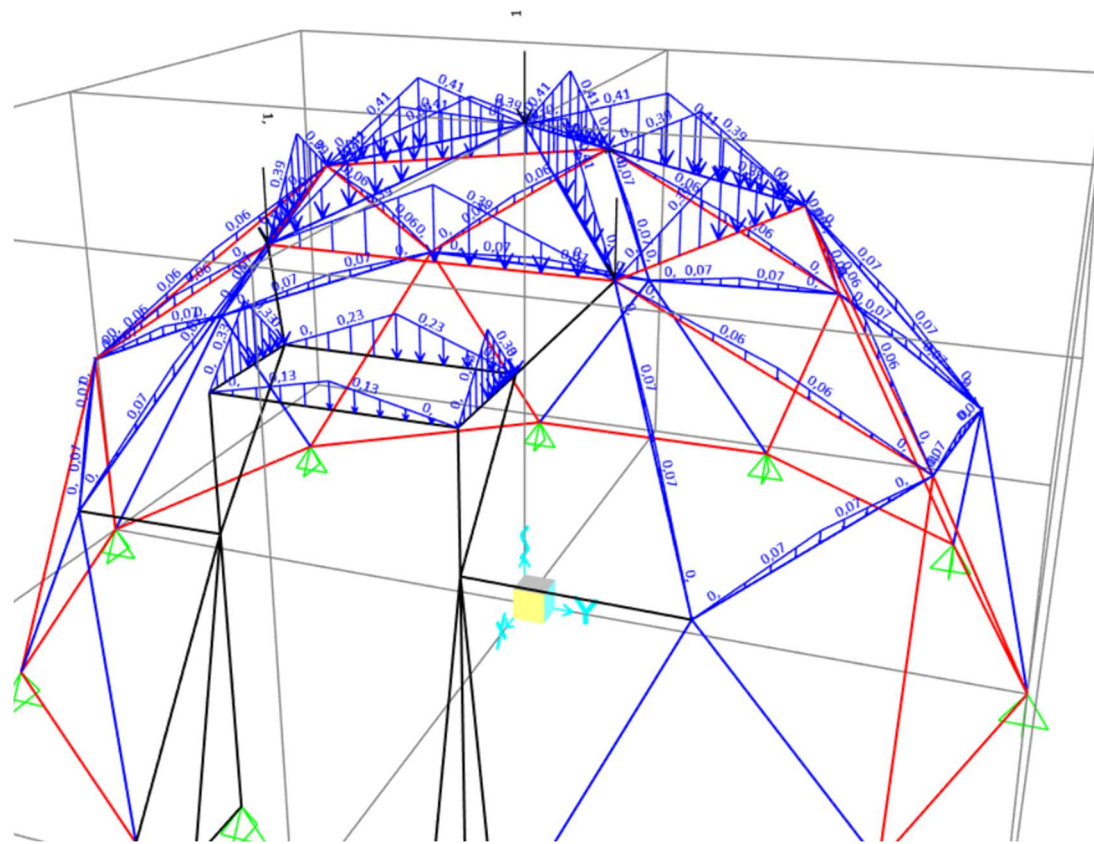


Ilustración 35. Aplicación de la sobrecarga de uso 1 - domo 2.

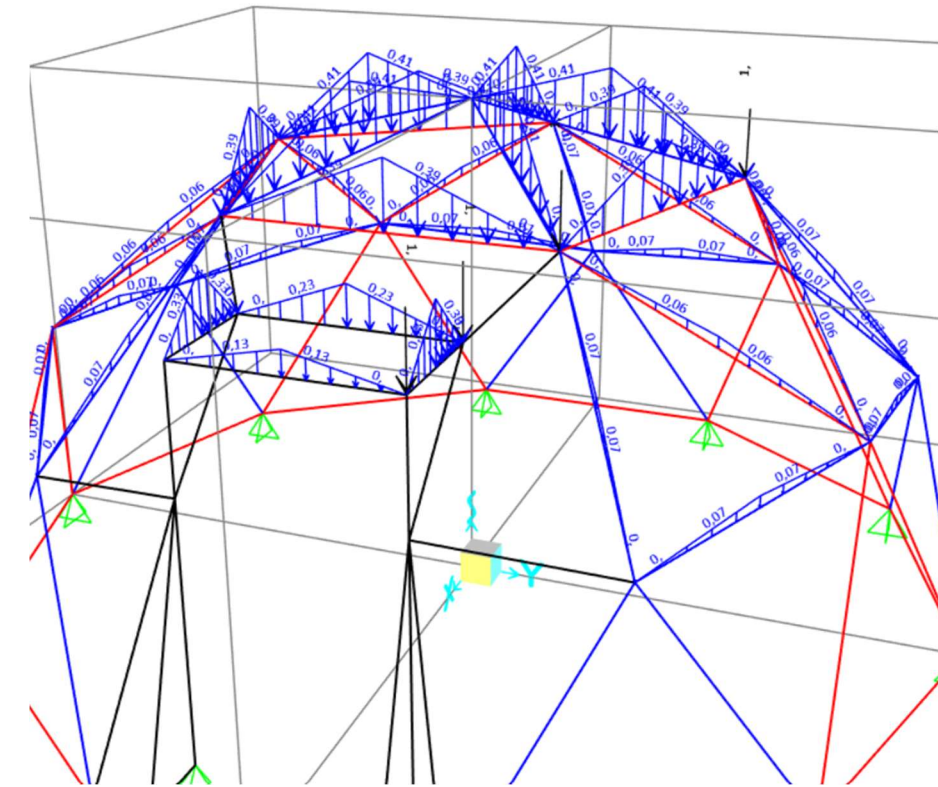


Ilustración 36. Aplicación de la carga de sobrecarga de uso 2 en domo 2.

3.1.3.2. Sobrecarga de nieve

De igual modo que para la estructura 1, se exponen los coeficientes de forma por inclinación del cerramiento y las cargas distribuidas triangulares aplicadas a cada una de las barras.

Fila	Inclinación (grados)	Coef. Inclinación
1	16,00	1,00
2	37,00	0,23
3	79,00	0,00
Puerta 1	0,00	1,00
Puerta 2	90,00	0,00

Tabla 31. Coeficiente de forma por sobrecarga de nieve en domo 2.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Coef. Inclinación	Carga Triangular por barra
A-FILA 1	0,914	0,21	1,854	1	0,232
A-FILA 2	0,914	0,05	1,854	0,23	0,053
A-FILA 3	0,914	0,00	1,854	0,00	0,000
A-BASE	0,496	0,00	1,854	0,00	0,000
B-FILA 1	0,836	0,20	1,640	1,00	0,240
B-FILA 2	0,836	0,05	1,640	0,23	0,055
B-FILA 3	0,836	0,00	1,640	0,00	0,000
P1	0,202	0,05	1,200	1,00	0,079

P2	0,344	0,08	1,200	1,00	0,135
P3	0,288	0,07	0,690	1,00	0,196
P4	0,425	0,00	0,666	0,00	0,000
P5	0,321	0,00	0,983	0,00	0,000
P6	0,522	0,00	1,023	0,00	0,000
P7	0,346	0,00	1,593	0,00	0,000
P8	0,192	0,00	1,559	0,00	0,000
P9	0,192	0,00	2,200	0,00	0,000
P10	0,107	0,00	0,426	0,00	0,000
P11	0,085	0,00	0,327	0,00	0,000

Tabla 32. Cargas distribuidas triangulares por sobrecarga de nieve en domo 2.

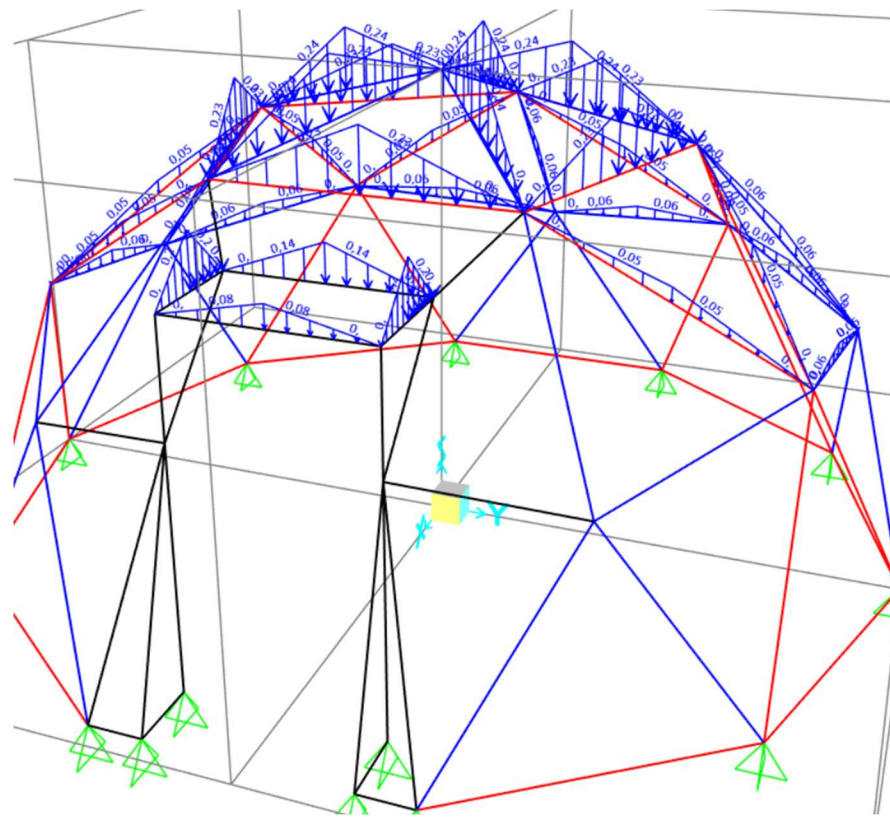


Ilustración 37. Aplicación de la sobrecarga de nieve en la estructura 2.

3.1.3.3. Acción del viento

De igual forma que para la estructura 1. se le aplica a la estructura 8 casos de carga de viento, diferenciando dos direcciones principales de viento y dos sentidos por cada dirección, teniendo en cuenta separadamente caso de carga por presión y por succión. Arbitrariamente se denomina barlovento al sentido del viento que produce presiones sobre la puerta (dirección 1) o presiones sobre la parte derecha del domo cuando se mira desde fuera hacia la puerta (dirección 2). Se enumeran cada uno de estos casos de carga y su codificación:

- Dirección principal 1. Sentido de la carga: Barlovento. Esta acción actúa en perpendicular al plano de la puerta en sentido hacia el interior del domo. Con ello se obtienen los siguientes casos de carga:
 - VP1-B. Viento de presión en dirección principal 1 – Barlovento.
 - VS1-B. Viento de succión en dirección principal 1 – Barlovento.
- Dirección principal 1. Sentido de la carga: Sotavento. Esta acción actúa en perpendicular al plano de la puerta empujando desde la parte opuesta de la puerta. Con ello se obtienen los siguientes casos de carga:
 - VP1-S. Viento de presión en dirección principal 1 – Sotavento.
 - VS1-S. Viento de succión en dirección principal 1 – Sotavento.
- Dirección principal 2. Sentido de la carga: Barlovento. Esta acción actúa en paralelo al plano de la puerta empujando desde el lateral derecho del domo. Con ello se obtienen los siguientes casos de carga:
 - VP2-B. Viento de presión en dirección principal 2 – Barlovento.
 - VS2-B. Viento de succión en dirección principal 2 – Barlovento.
- Dirección principal 2. Sentido de la carga: Sotavento. Esta acción actúa en paralelo al plano de la puerta empujando desde el lateral izquierdo del domo. Con ello se obtienen los siguientes casos de carga:
 - VP2-S. Viento de presión en dirección principal 2 – Sotavento.
 - VS2-S. Viento de succión en dirección principal 2 – Sotavento.

Dado que la ubicación de la estructura 2 se ubica en la misma parcela, se utilizarán las mismas cargas por superficie calculadas anteriormente.

Según la acción del viento en las diferentes direcciones y sentidos las áreas tributarias que aplican a cada barra se verán modificadas para cada caso. Aplicando los criterios antes mencionados se expone en la siguiente tabla las áreas tributarias utilizadas para cada caso de carga para cada una de las barras.

Grupo barras	AT VP1-B	AT VS1-B	AT VP1-S	AT VS1-S	AT VP2-B	AT VS2-B	AT VP2-S	AT VS2-S
A	0,914	0,914	0,914	0,914	0,914	0,914	0,914	0,914
B	0,836	0,836	0,836	0,836	0,836	0,836	0,836	0,836
P1	0,672	0,000	0,000	0,672	0,000	0,000	0,000	0,000
P2	0,137	0,000	0,000	0,137	0,000	0,000	0,000	0,000
P3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,081	0,000	0,000	0,081
P4	0,425	0,000	0,000	0,425	0,000	0,000	0,000	0,000
P5	0,240	0,000	0,000	0,240	0,081	0,000	0,000	0,081
P6	0,522	0,000	0,000	0,522	0,000	0,000	0,000	0,000
P7	0,346	0,000	0,000	0,346	0,000	0,000	0,000	0,000
P8	0,107	0,000	0,000	0,107	0,000	0,000	0,000	0,000
P9	0,660	0,000	0,000	0,660	0,081	0,000	0,000	0,081
P10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
P11	0,085	0,000	0,000	0,085	0,000	0,000	0,000	0,000

Tabla 33. Área tributaria de cada barra en cada caso de carga de viento en domo 2.

Se exponen los datos de las cargas aplicadas en cada caso de carga de viento:

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular por barra
A	0,914	0,77	1,854	0,828
B	0,836	0,70	1,640	0,856
A-BASE	0,496	0,42	1,854	0,450
P1	0,672	0,56	1,200	0,941
P2	0,137	0,11	1,200	0,191
P3	0,000	0,00	0,690	0,000
P4	0,425	0,36	0,666	1,073
P5	0,240	0,20	0,983	0,410
P6	0,522	0,44	1,023	0,858
P7	0,346	0,29	1,593	0,365
P8	0,107	0,09	1,559	0,115
P9	0,660	0,55	2,200	0,504
P10	0,000	0,00	0,426	0,000
P11	0,085	0,07	0,327	0,437

Tabla 34. Viento de presión 1 – Barlovento.

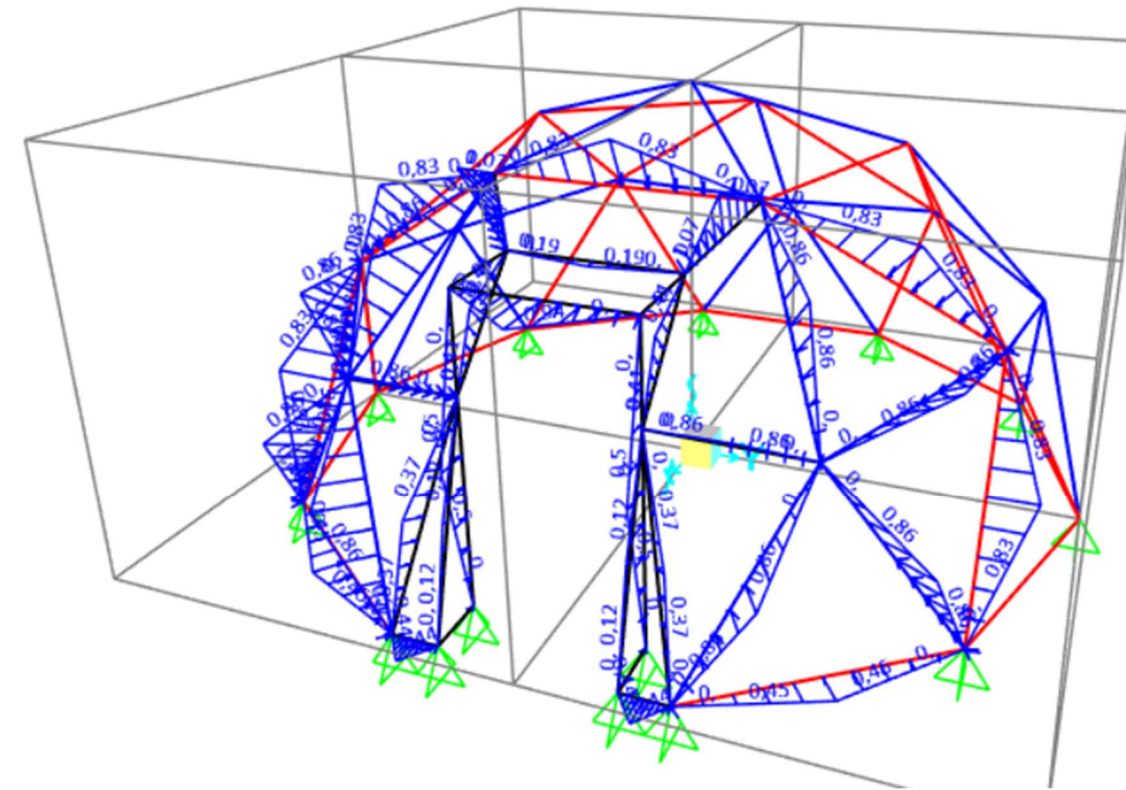


Ilustración 38. Viento de presión 1 - Barlovento.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular por barra
A	0,914	-1,15	1,854	-1,242
B	0,836	-1,05	1,640	-1,285
A-BASE	0,496	-0,63	1,854	-0,674

Tabla 35. Viento de succión 1 - Barlovento.

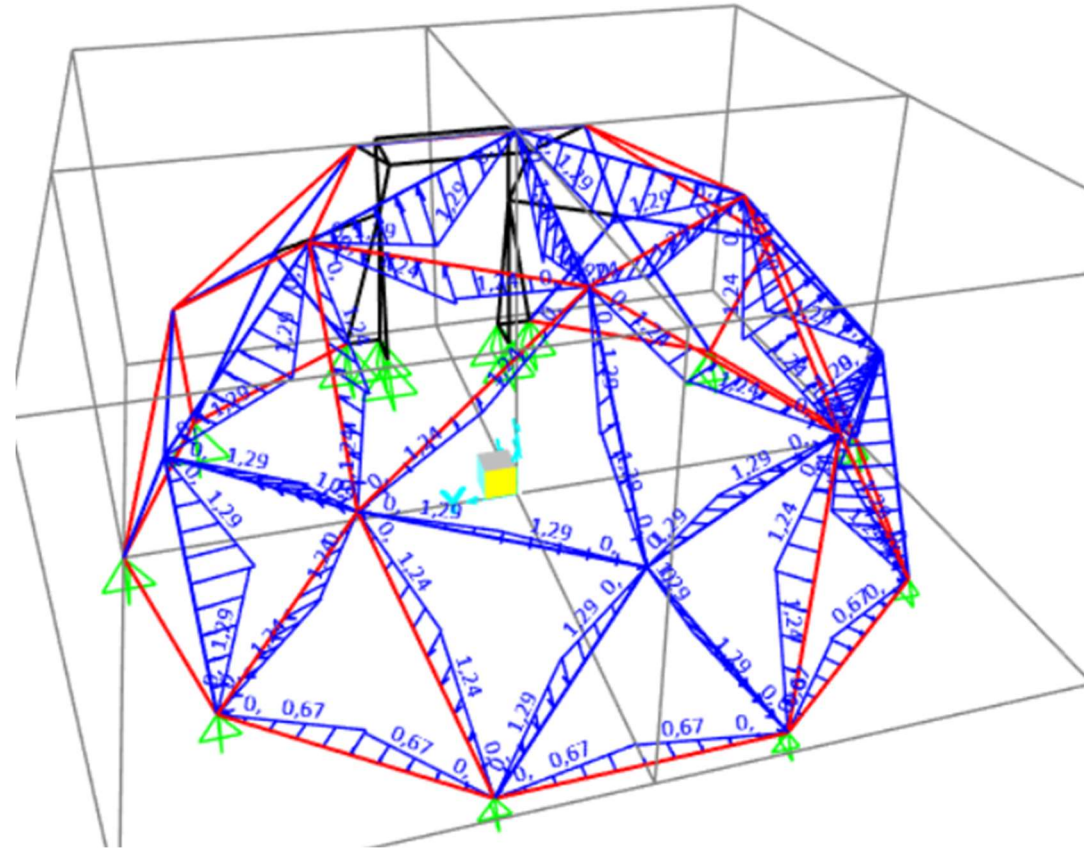


Ilustración 39. Viento de succión 1 - Barlovento.

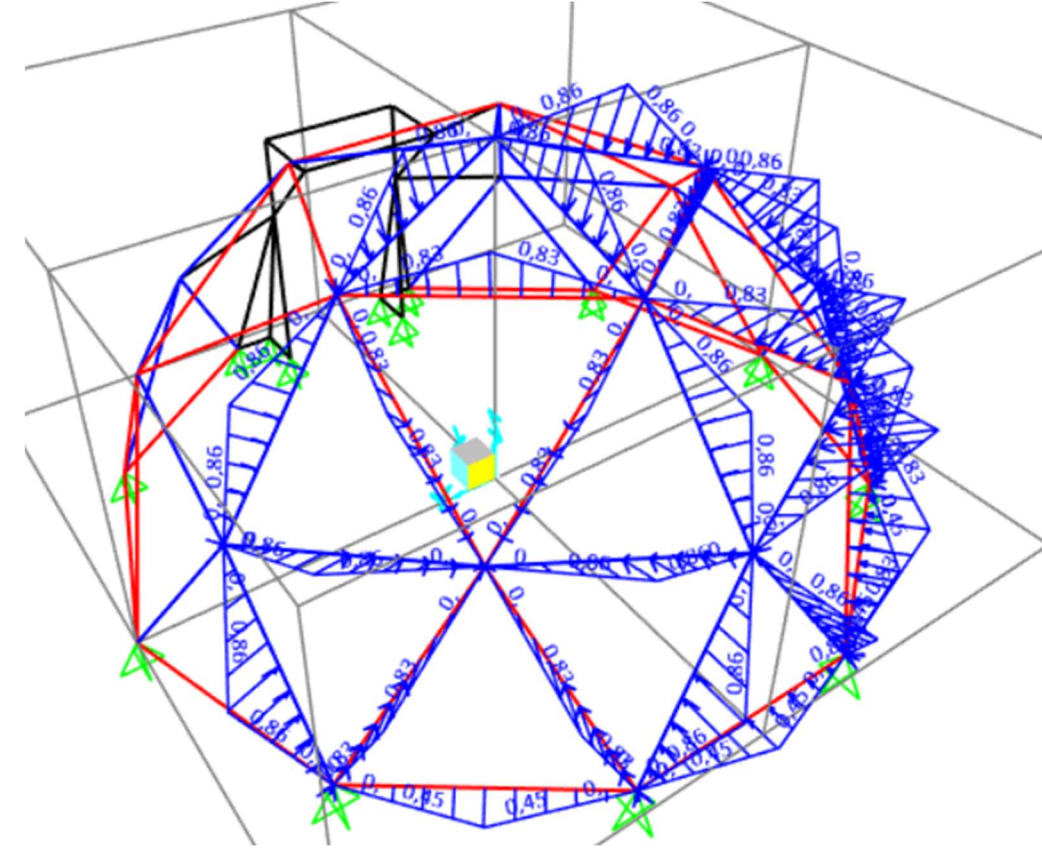


Ilustración 40. Viento de presión 1 - Sotavento.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular por barra
A	0,914	0,77	1,854	0,828
B	0,836	0,70	1,640	0,856
A-BASE	0,496	0,42	1,854	0,450

Tabla 36. Viento de presión 1 - Sotavento.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular por barra
A	0,914	-1,15	1,854	-1,242
B	0,836	-1,05	1,640	-1,285
A-BASE	0,496	-0,63	1,854	-0,674
P1	0,672	-0,85	1,200	-1,412
P2	0,137	-0,17	1,200	-0,287
P3	0,000	0,00	0,690	0,000
P4	0,425	-0,54	0,666	-1,610
P5	0,240	-0,30	0,983	-0,616
P6	0,522	-0,66	1,023	-1,287
P7	0,346	-0,44	1,593	-0,547
P8	0,107	-0,13	1,559	-0,172
P9	0,660	-0,83	2,200	-0,756
P10	0,000	0,00	0,426	0,000
P11	0,085	-0,11	0,327	-0,655

Tabla 37. Viento de succión 1 - Sotavento.

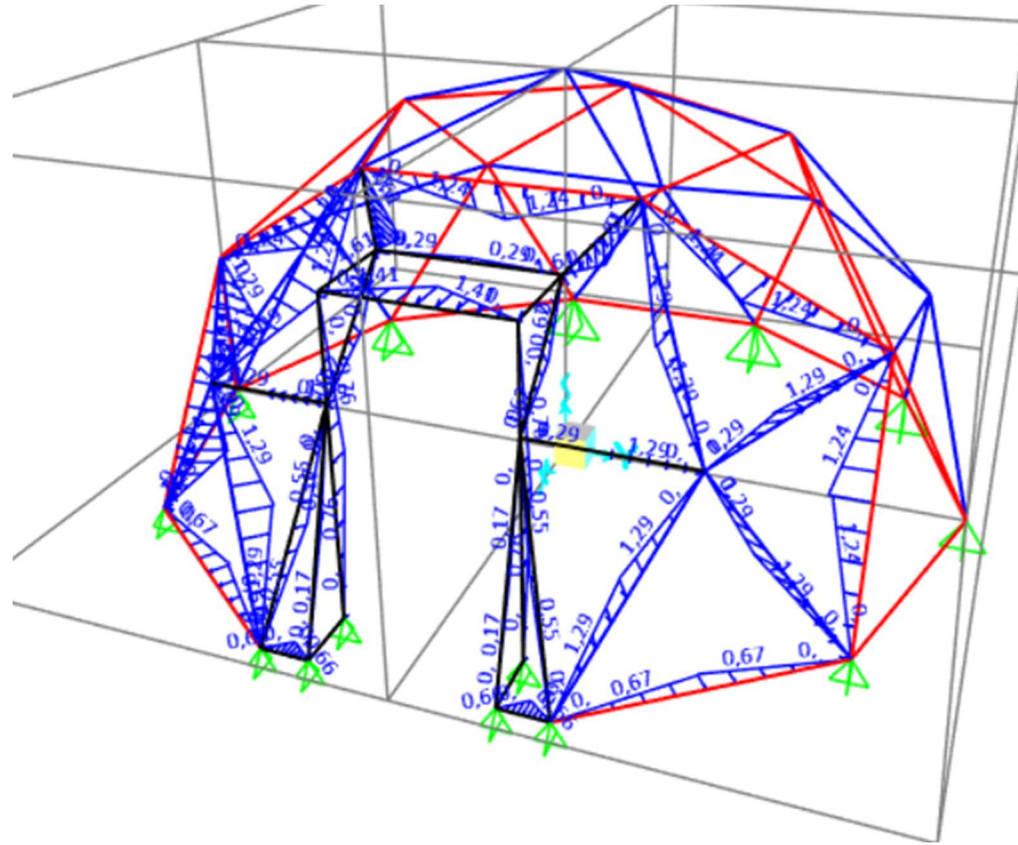


Ilustración 41. Viento de succión 1 - Sotavento.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular por barra
A	0,914	0,77	1,854	0,828
B	0,836	0,70	1,640	0,856
A-BASE	0,496	0,42	1,854	0,450
P1	0,000	0,00	1,200	0,000
P2	0,000	0,00	1,200	0,000
P3	0,081	0,07	0,690	0,196
P4	0,000	0,00	0,666	0,000
P5	0,081	0,07	0,983	0,138
P6	0,000	0,00	1,023	0,000
P7	0,000	0,00	1,593	0,000
P8	0,000	0,00	1,559	0,000
P9	0,081	0,07	2,200	0,061
P10	0,000	0,00	0,426	0,000
P11	0,000	0,00	0,327	0,000

Tabla 38. Viento de presión 2 - Barlovento.

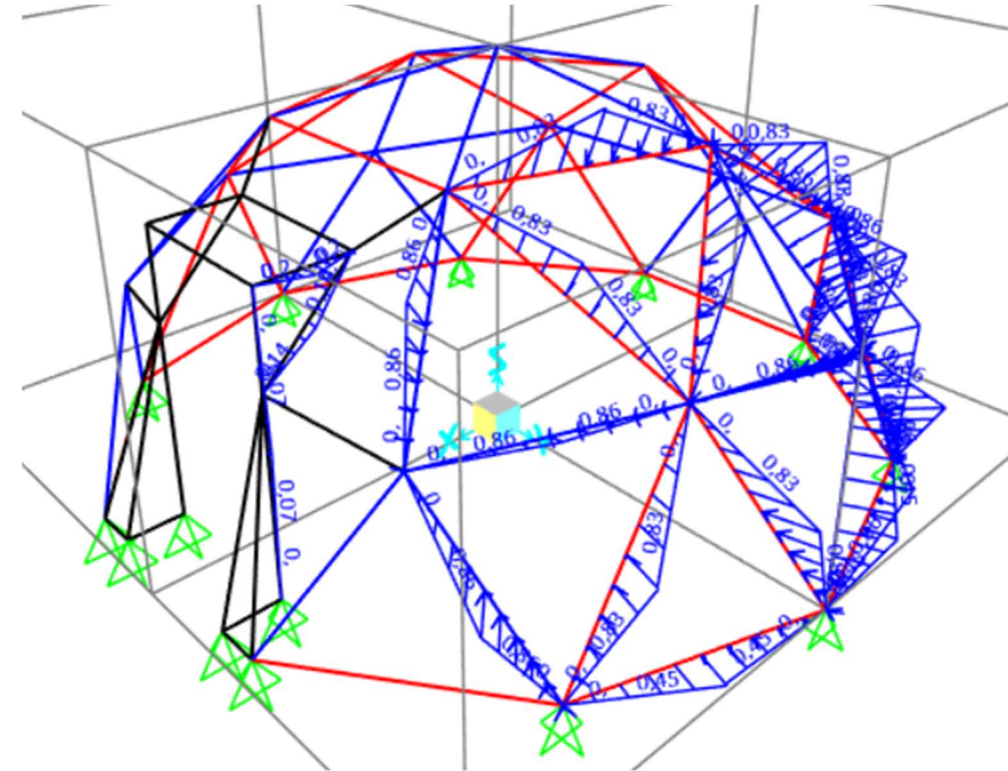


Ilustración 42. Viento de presión 2 - Barlovento.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular por barra
A	0,914	-1,15	1,854	-1,242
B	0,836	-1,05	1,640	-1,285
A-BASE	0,496	-0,63	1,854	-0,674

Tabla 39. Viento de succión 2 - Barlovento.

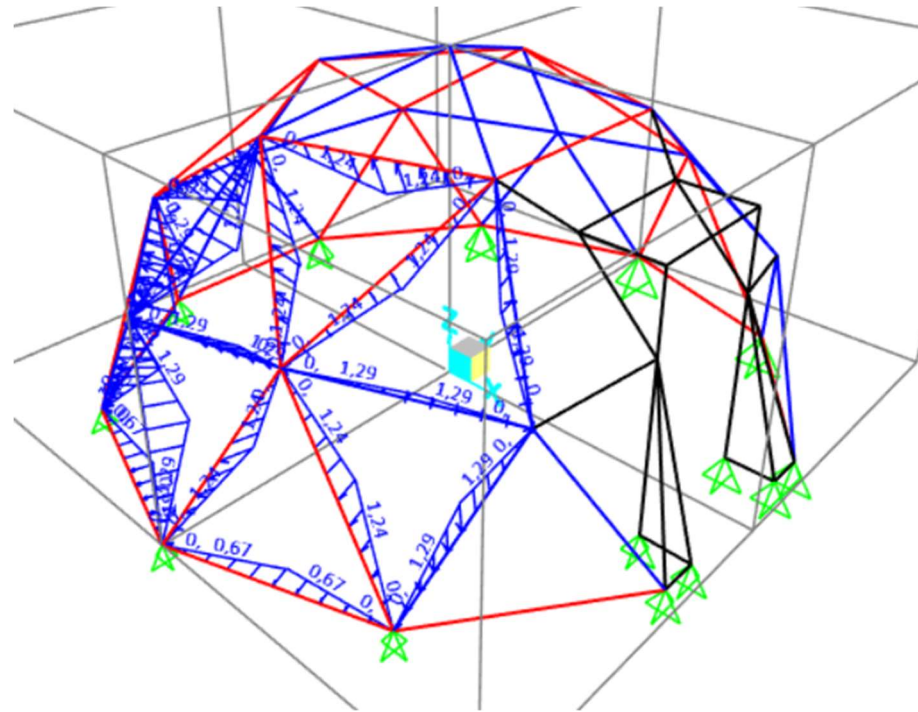


Ilustración 43. Viento de succión 2 - Barlovento.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular por barra
A	0,914	0,77	1,854	0,828
B	0,836	0,70	1,640	0,856
A-BASE	0,496	0,42	1,854	0,450

Tabla 40. Viento de presión 2 - Sotavento.

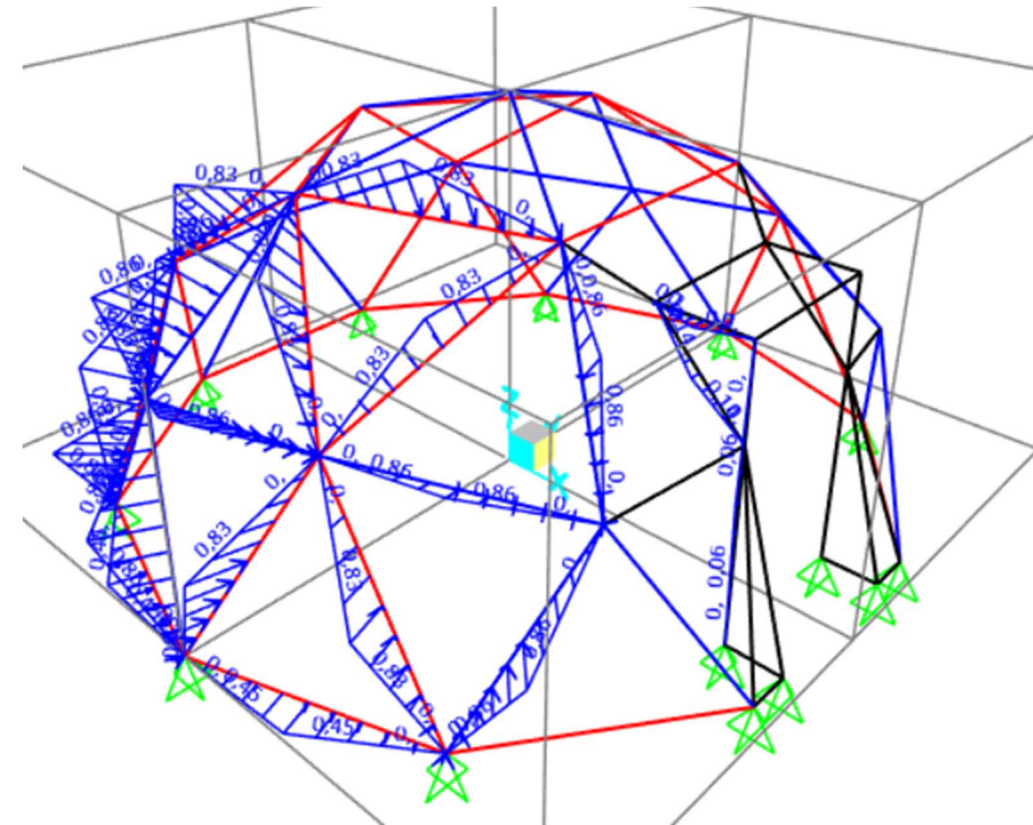


Ilustración 44. Viento de presión 2 - Sotavento.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular por barra
A	0,914	-1,15	1,854	-1,242
B	0,836	-1,05	1,640	-1,285
A-BASE	0,496	-0,63	1,854	-0,674
P1	0,000	0,00	1,200	0,000
P2	0,000	0,00	1,200	0,000
P3	0,081	-0,10	0,690	-0,294
P4	0,000	0,00	0,666	0,000
P5	0,081	-0,10	0,983	-0,206
P6	0,000	0,00	1,023	0,000
P7	0,000	0,00	1,593	0,000
P8	0,000	0,00	1,559	0,000
P9	0,081	-0,10	2,200	-0,092
P10	0,000	0,00	0,426	0,000
P11	0,000	0,00	0,327	0,000

Tabla 41. Viento de succión 2 - Sotavento.

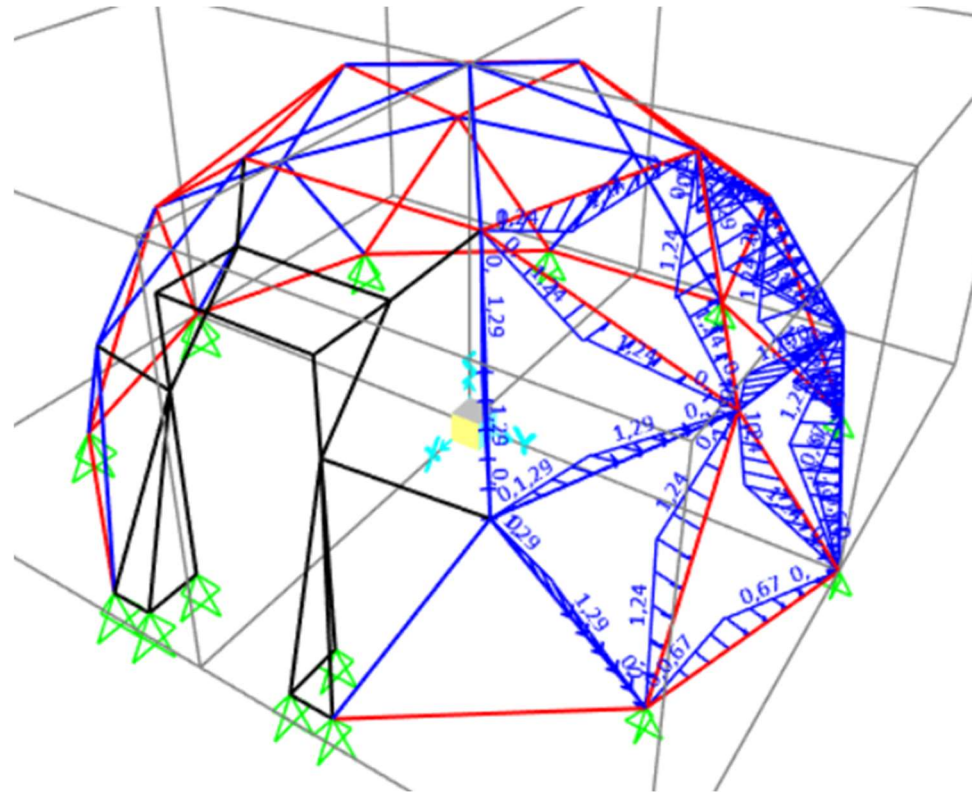


Ilustración 45. Viento de succión 2 - Sotavento.

3.1.3.4. Acciones térmicas.

Las acciones térmicas aplicadas son las mismas que para la estructura geodésica 1.

3.2. ESFUERZOS DE CÁLCULO

Aplicando las mismas combinaciones de acciones para ELU y ELS que en la estructura geodésica 1, se obtienen los siguientes datos de esfuerzos de cálculo para el domo 2.

El valor máximo del axil de tracción es de 9,51 kN. Mientras que el valor máximo del axil de compresión es de -11,13 kN.

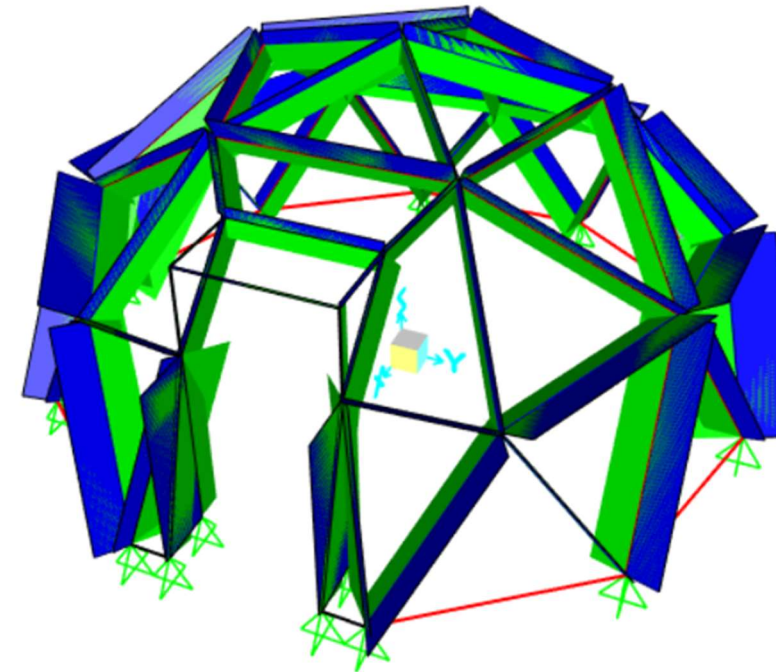


Ilustración 46. Axil máximo y mínimo en ELU - Domo 2.

El cortante 2-2 de valor máximo es de 0,90 kN, mientras que el de valor mínimo es de -1,01 kN.

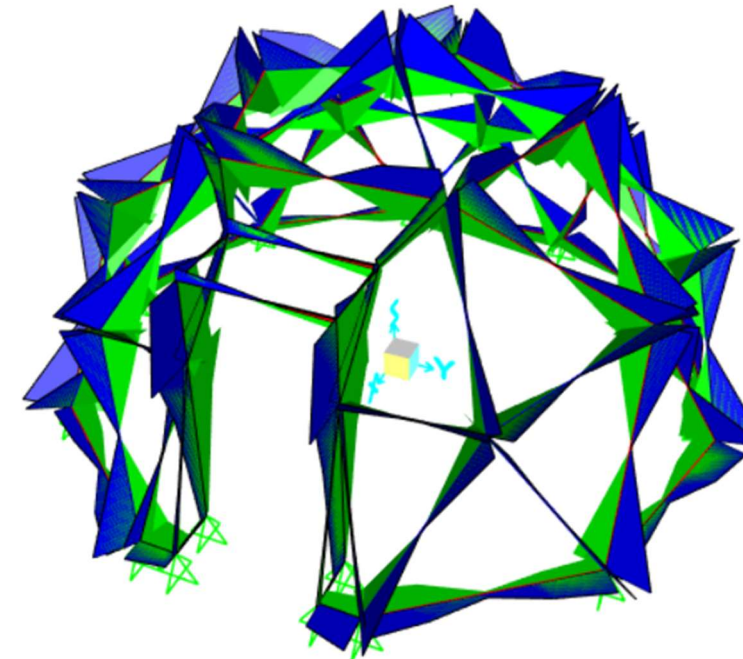


Ilustración 47. Cortante máximo y mínimo en la dirección paralela al canto de la pieza en ELU - Domo 2. (Cortante 2-2)

El cortante 3-3 de valor máximo es de 0,86 kN y el de valor mínimo es de -0,64 kN.

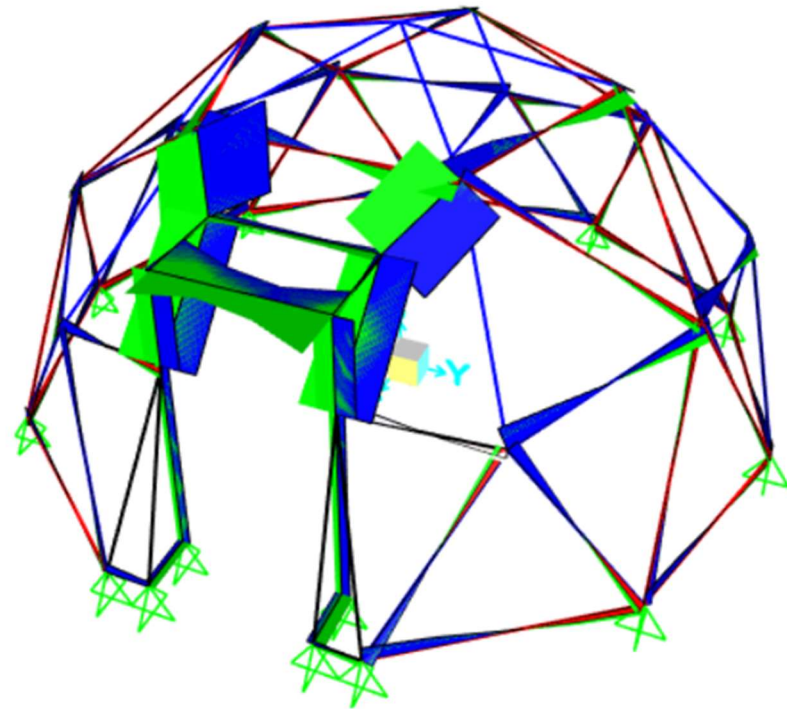


Ilustración 48. Cortante máximo y mínimo en la dirección perpendicular al canto de la pieza en ELU - Domo 2. (Cortante 3-3).

El valor máximo de los esfuerzos flectores 2-2 es de 0,54 kN.m, mientras que el valor mínimo es de -0,39 kN.m.

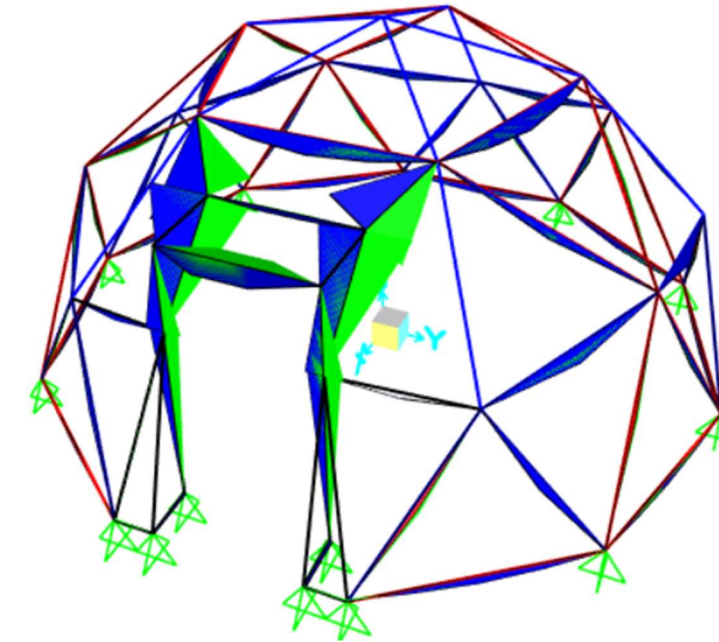


Ilustración 50. Flectores máximos y mínimos sobre el eje paralelo al canto de la pieza en ELU - Domo 2. (Momento 2-2).

El valor máximo de los esfuerzos de torsión es de 0,08 kN y su valor mínimo de -0,13 kN.

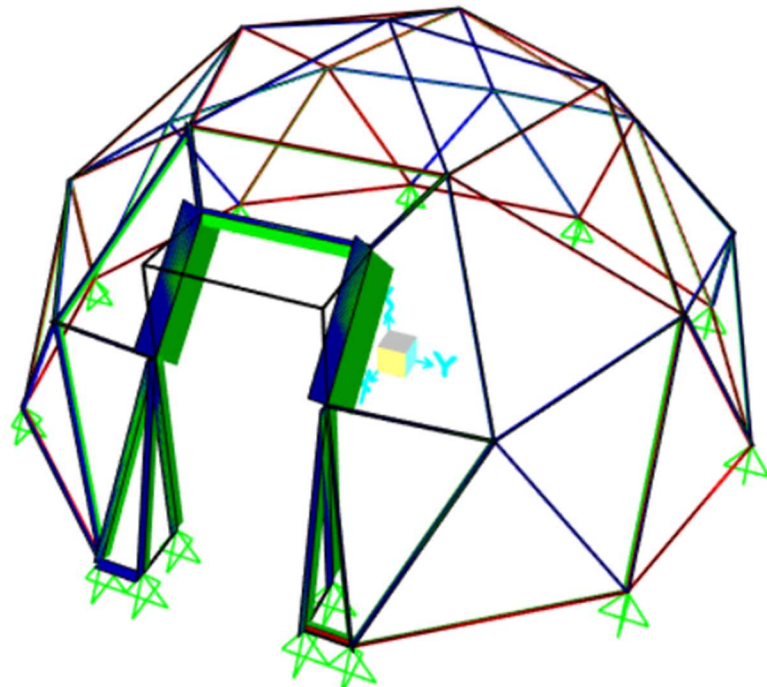


Ilustración 49. Torsión máxima y mínima en ELU - Domo 2.

El valor máximo del esfuerzo flector 3-3 es de 0,55 kN.m y su valor mínimo es de -0,66 kN.m.

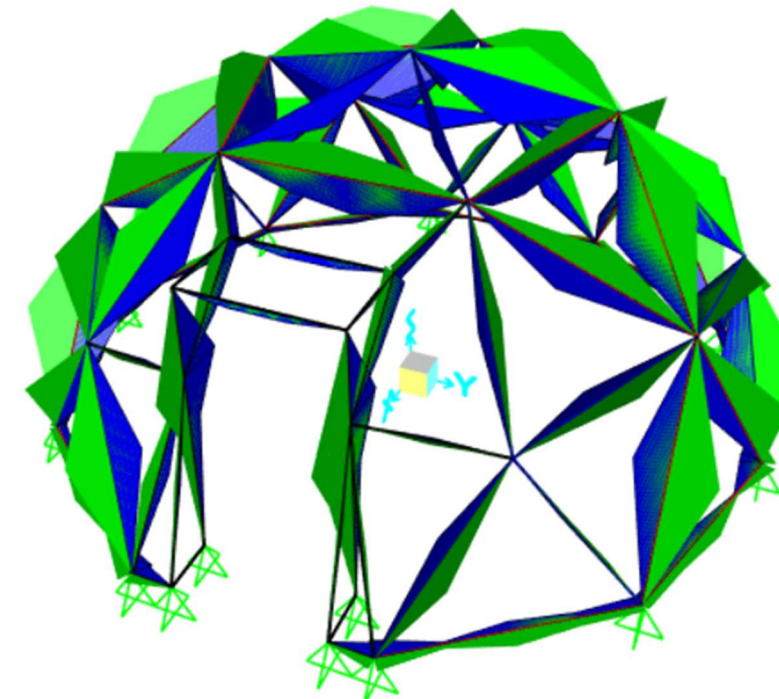


Ilustración 51. Flectores máximos y mínimos sobre el eje perpendicular al canto de la pieza en ELU - Domo 2. (Momento 3-3).

Esfuerzos de cálculo			
Descripción	Parámetro	Valor (kN o kN.m)	Combinación
Axil máximo a tracción	P max	9,51	COMB049
Axil máximo a compresión	P min	-11,13	COMB049
Cortante positivo paralelo al canto	V2 max	0,90	COMB050
Cortante negativo paralelo al canto	V2 min	-1,01	COMB044
Cortante positivo perpendicular al canto	V3 max	0,86	COMB056
Cortante negativo perpendicular al canto	V3 min	-0,64	COMB086
Torsor máximo positivo	Tmax	0,08	COMB087
Torsor máximo negativo	Tmin	-0,13	COMB044
Flexión sobre el plano paralelo al canto	M2 max	0,54	COMB056
Flexión sobre el plano paralelo al canto	M2 min	-0,39	COMB097
Flexión el plano perpendicular al canto	M3 max	0,55	COMB022
Flexión el plano perpendicular al canto	M3 min	-0,66	COMB044

Tabla 42. Esfuerzos de cálculo - Domo 2.

3.3. REACCIONES DE CÁLCULO

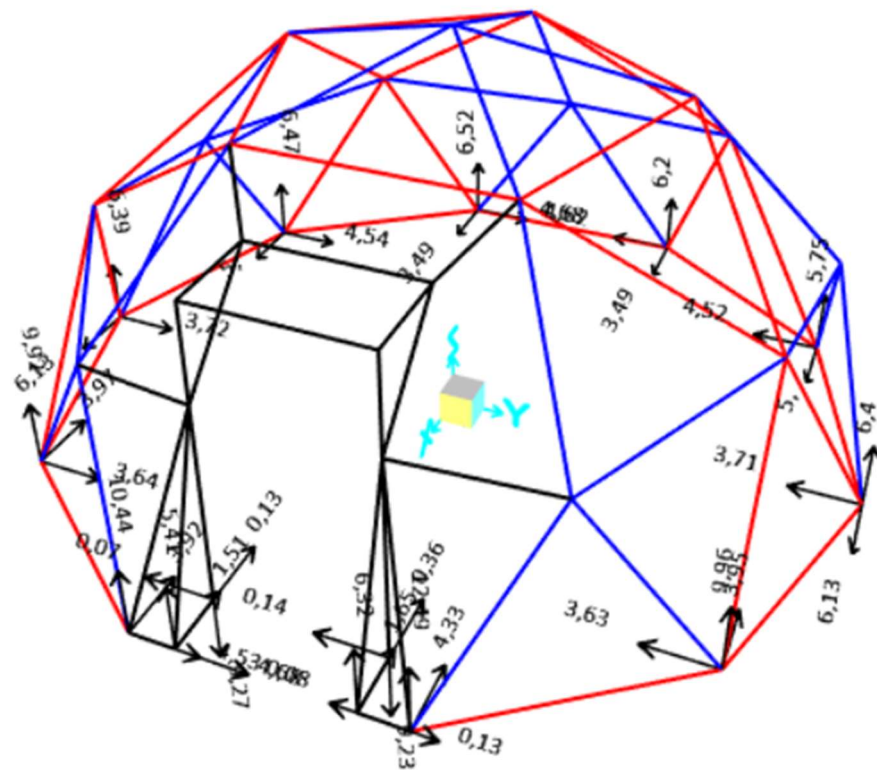


Ilustración 52. Reacciones máximas en los apoyos de la estructura en ELS – Domo 2.

Reacciones de cálculo			
Dirección de la reacción	Valor máximo de la reacción	Nº Nudo	Combinación
F1	6,13	5	COMB082
F2	4,68	8	COMB093
F3	-12,49	3	COMB055

Tabla 43. Valor máximo de las reacciones ELU - Domo 2.

3.4. DESPLAZAMIENTOS DE CÁLCULO

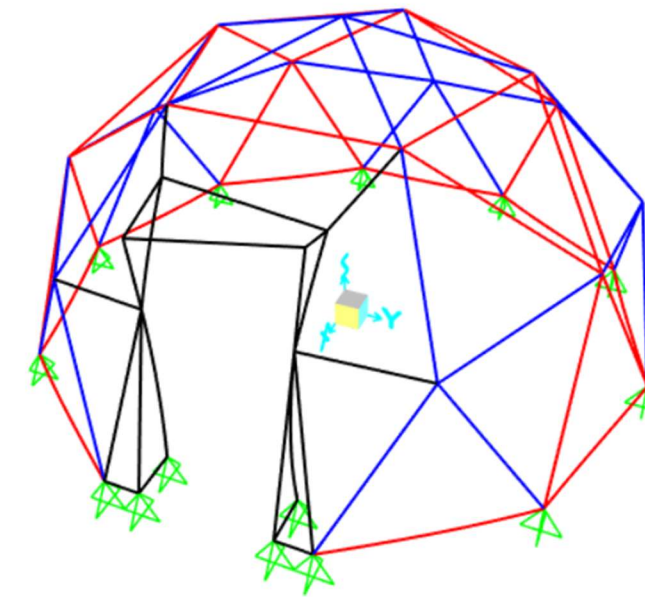


Ilustración 53. Máximos desplazamientos en ELS – Domo 2.

Se resume el resultado de los desplazamientos máximos del análisis estructural del domo 2 en la siguiente tabla:

Desplazamientos y giros de cálculo			
Dirección del desplazamiento ejes locales	Desplazamiento máximo en valor absoluto (mm)	Nº Nudo	Combinación
U1	2,2	26	ELS-COMB044
U2	1,2	28	ELS-COMB055
U3	2,3	27	ELS-COMB044
Giros	Giro máximo en valor absoluto	Nº Nudo	Combinación
R1	0,0088	26	ELS-COMB044
R2	0,0076	30	ELS-COMB044
R3	0,0091	30	ELS-COMB044

Tabla 44. Desplazamientos y giros máximos en ELS - Domo 2.

4. ANÁLISIS DE ESTRUCTURA 3

4.1. CÁLCULO Y APLICACIÓN DE CARGAS

Para el análisis estructural de los esfuerzos de la estructura geodésica 3 del presente proyecto se seguirán los mismos criterios que para la estructura 1, desarrollados en el epígrafe 2.1 del presente anejo.

La estructura geodésica 3 se trata de un domo en frecuencia V2 de 8 metros de diámetro calculado mediante el método de clase 2 Triacon, tal y como se muestra en la siguiente imagen:

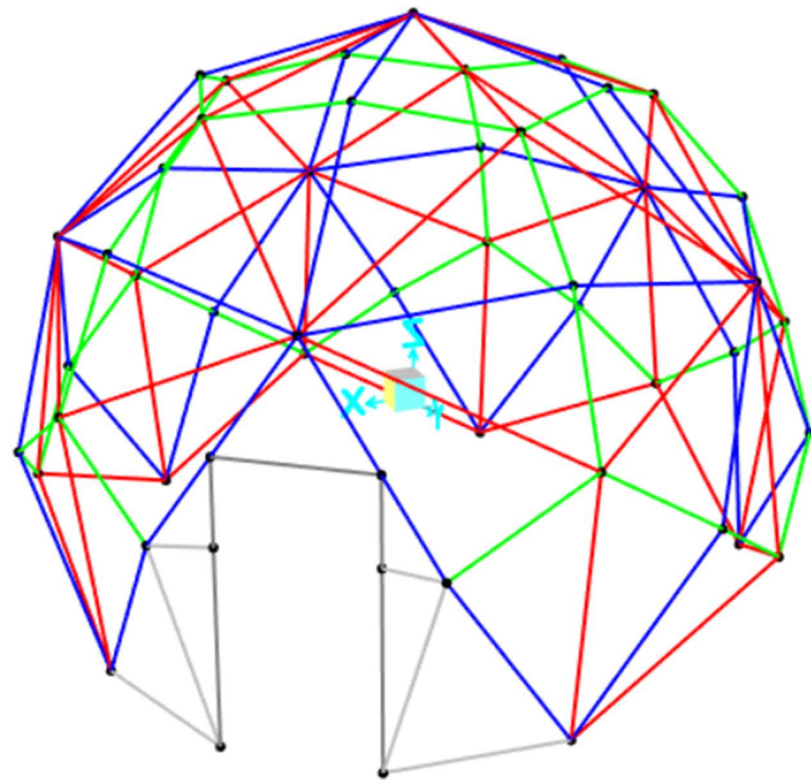


Ilustración 54. Imagen del modelo de SAP2000 de la estructura 3.

4.1.1. CÁLCULO DE ÁREAS TRIBUTARIAS

El domo geodésico 3 se compone de 145 barras distribuidas en tres tipos. La barra tipo A marcada en rojo, la barra tipo B en azul y la barra tipo C en verde, según la ilustración anterior. A esto se le añaden 5 piezas especiales para la configuración de la puerta.

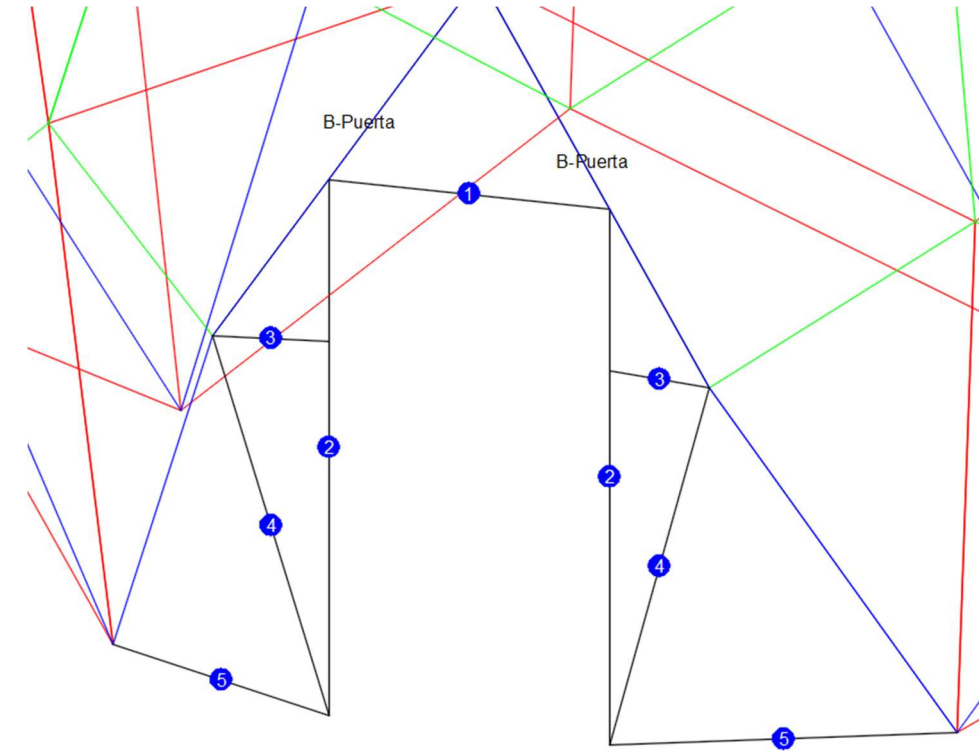


Ilustración 55. Denominación de las piezas de la puerta del domo geodésico 3.

A continuación, se exponen las áreas tributarias para cada una de las barras

Grupo barras	Área tributaria GRAVITATORIAS	LONGITUD
A	1,0564	2,5635
B	1,0564	2,1862
C	1,0564	1,4514
A-BASE	0,5282	2,5635
B-PUERTA	0,3085	2,1862
P1	1,1352	1,3990
P2	1,1305	2,5655
P3	0,2332	0,5455
P4	0,6553	1,8702
P5	0,4927	1,6212

Tabla 45. Áreas tributarias de domo geodésico 3.

4.1.2. ACCIONES PERMANENTES

Del mismo modo que el caso anterior, el peso propio de la estructura estará automáticamente introducido por el programa SAP2000.

Las cargas muertas que proporcionará el cerramiento de la estructura tendrán un valor de 0,35 kN/m² tal y como se han calculado para la estructura 1.

Teniendo en cuenta las áreas tributarias y las longitudes de las barras, se le aplicará al modelo los siguientes datos de cargas distribuidas triangulares, siendo el valor mostrado el valor pico de la carga triangular ubicado en el centro de la barra y desciende hasta el valor 0 en sus extremos.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular (kN/m)
A	1,056	0,37	2,564	0,288
B	1,056	0,37	2,186	0,338
C	1,056	0,37	1,451	0,509
A-BASE	0,528	0,18	2,564	0,144
B-PUERTA	0,309	0,11	2,186	0,099
P1	1,135	0,40	1,399	0,568
P2	1,131	0,40	2,566	0,308
P3	0,233	0,08	0,546	0,299
P4	0,655	0,23	1,870	0,245
P5	0,493	0,17	1,621	0,213

Tabla 46. Carga muerta aplicada en domo geodésico 3.

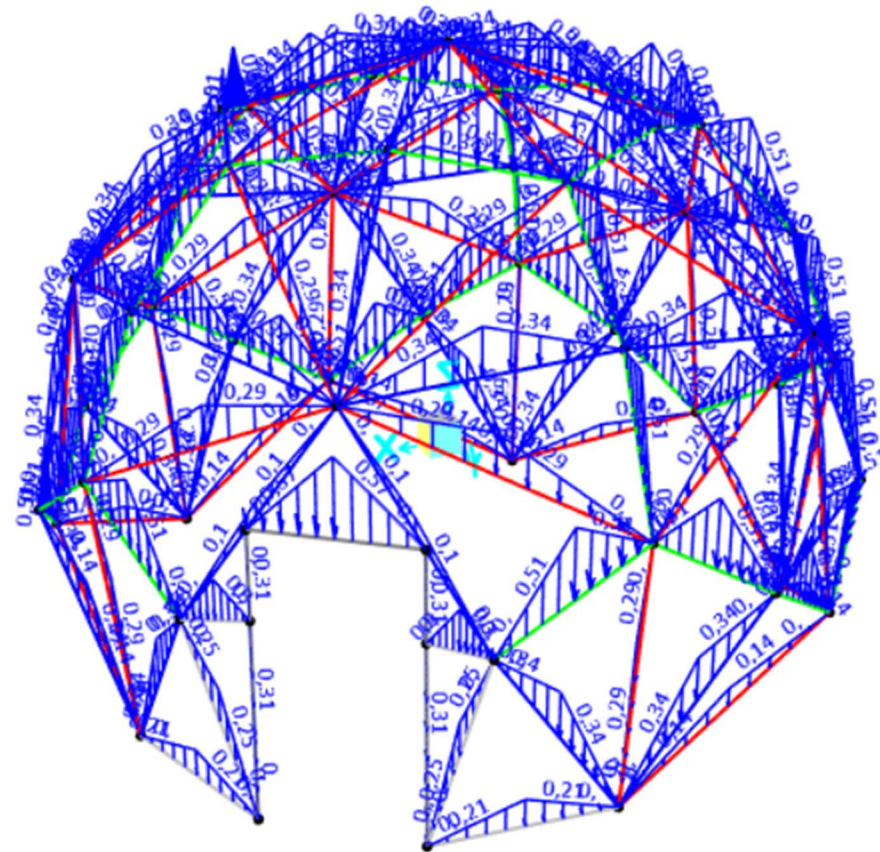


Ilustración 56. Aplicación de la carga muerta a la estructura 3.

4.1.3. ACCIONES VARIABLES

4.1.3.1. Sobrecarga de uso

Del mismo modo que para la estructura 1, se exponen a continuación los valores de los coeficientes de inclinación según las filas de la estructura para ponderar la sobrecarga de uso debida a labores de mantenimiento en función de la zona. Y posteriormente las cargas aplicadas.

Se han creado dos casos de sobrecarga de uso, en los cuales representan dos situaciones desfavorables que pueden producirse durante el mantenimiento, para ello se han variado la aplicación de cargas puntuales simulando posibles posiciones de operarios de mantenimiento.

Fila	Inclinación (grados)	Coef. Inclinación
1	16,00	1,00
2	47,00	0,00
3	68,00	0,00
4	95,00	0,00

Tabla 47. Coeficientes de inclinación según la fila en domo 3..

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Coef. Inclinación	Carga Triangular por barra
A-FILA 1	1,056	0,42	2,564	1,00	0,330
B-FILA 1	1,056	0,42	2,186	1,00	0,387
C-FILA 1	1,056	0,42	1,451	1,00	0,582
P1	0,000	0,00	1,135	0,00	0,000
P2	0,000	0,00	1,131	0,00	0,000
P3	0,000	0,00	0,233	0,00	0,000
P4	0,000	0,00	0,655	0,00	0,000
P5	0,000	0,00	0,493	0,00	0,000

Tabla 48. Valores de la sobrecarga de uso en domo geodésico 2.

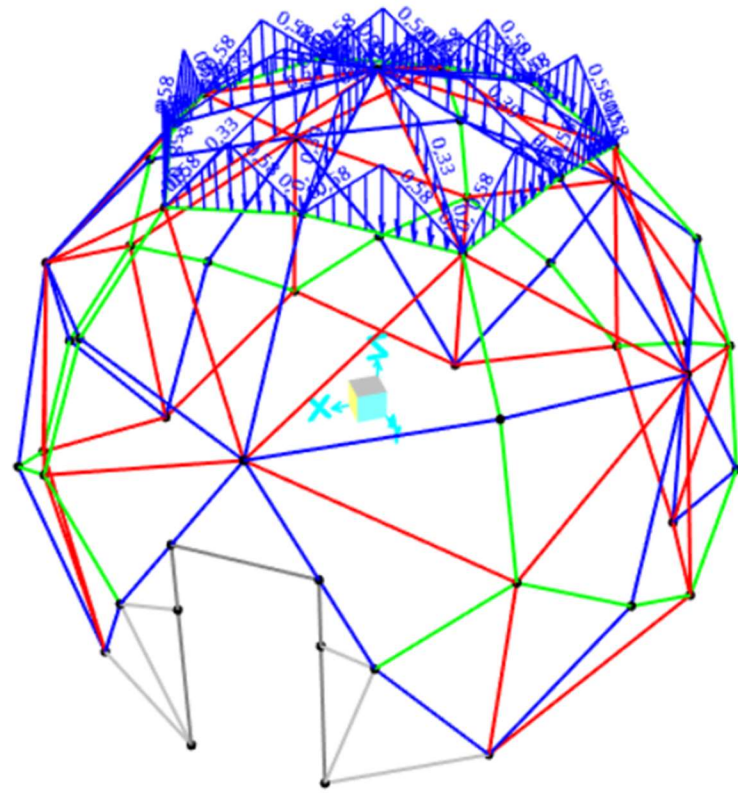


Ilustración 57. Aplicación de la sobrecarga de uso - domo 3.

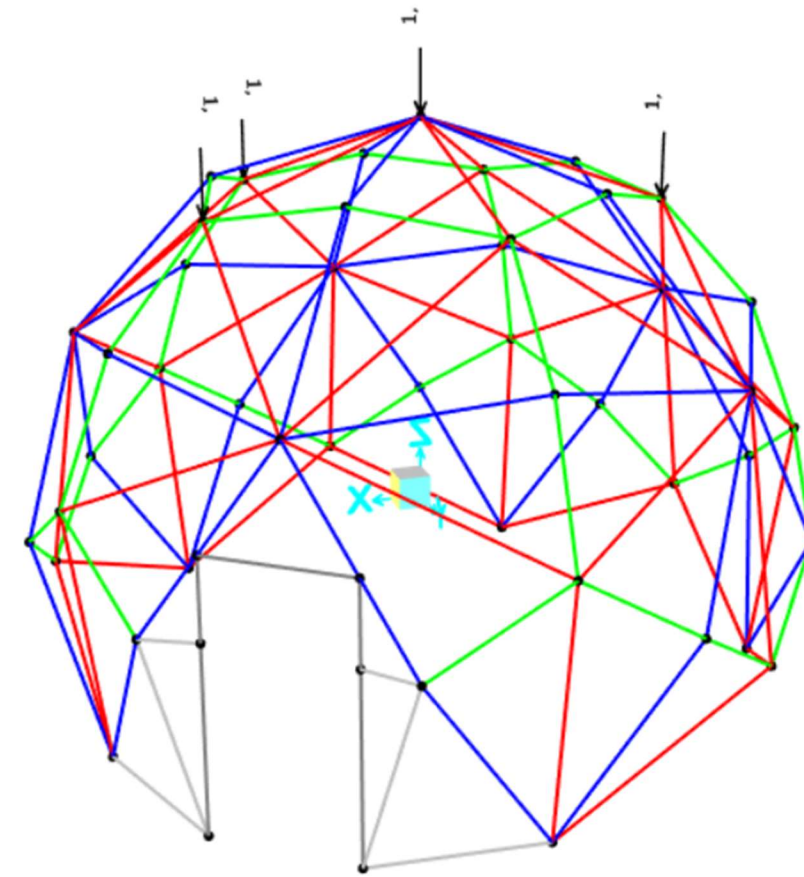


Ilustración 59. Aplicación de la carga puntual de la sobrecarga de uso 2 en domo 3.

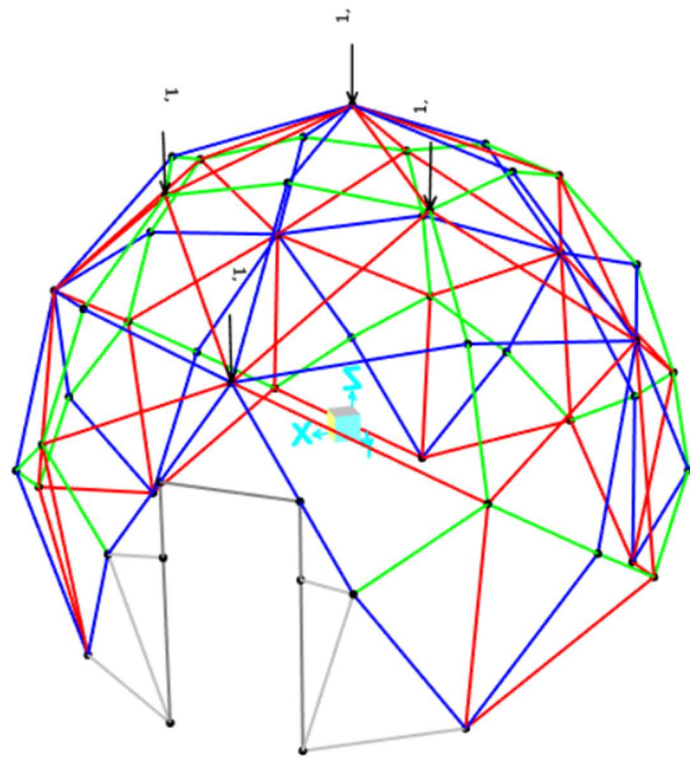


Ilustración 58. Aplicación de la carga puntual de sobrecarga de uso 1 en domo 3.

4.1.3.2. Sobrecarga de nieve

De igual modo que para la estructura 1, se exponen los coeficientes de forma por inclinación del cerramiento y las cargas distribuidas triangulares aplicadas a cada una de las barras.

Fila	Inclinación (grados)	Coef. Inclinación
1	16,00	1,00
2	47,00	0,43
3	68,00	0,00
4	95,00	0,00

Tabla 49. Coeficiente de forma por sobrecarga de nieve en domo 3.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Coef. Inclinación	Carga Triangular por barra
A-FILA 1	1,056	0,25	2,564	1	0,194
A-FILA 2	1,056	0,11	2,564	0,433	0,084
B-FILA 1	1,056	0,25	2,186	1	0,227
B-FILA 2	1,056	0,11	2,186	0,433	0,098
C-FILA 1	1,056	0,25	1,451	1	0,342
C-FILA 2	1,056	0,11	1,451	0,433	0,148

P1	1,135	0,00	1,399	0,00	0,000
P2	1,131	0,00	2,566	0,00	0,000
P3	0,233	0,00	0,546	0,00	0,000
P4	0,655	0,00	1,870	0,00	0,000
P5	0,493	0,00	1,621	0,00	0,000

Tabla 50. Cargas distribuidas triangulares por sobrecarga de nieve en domo 3.

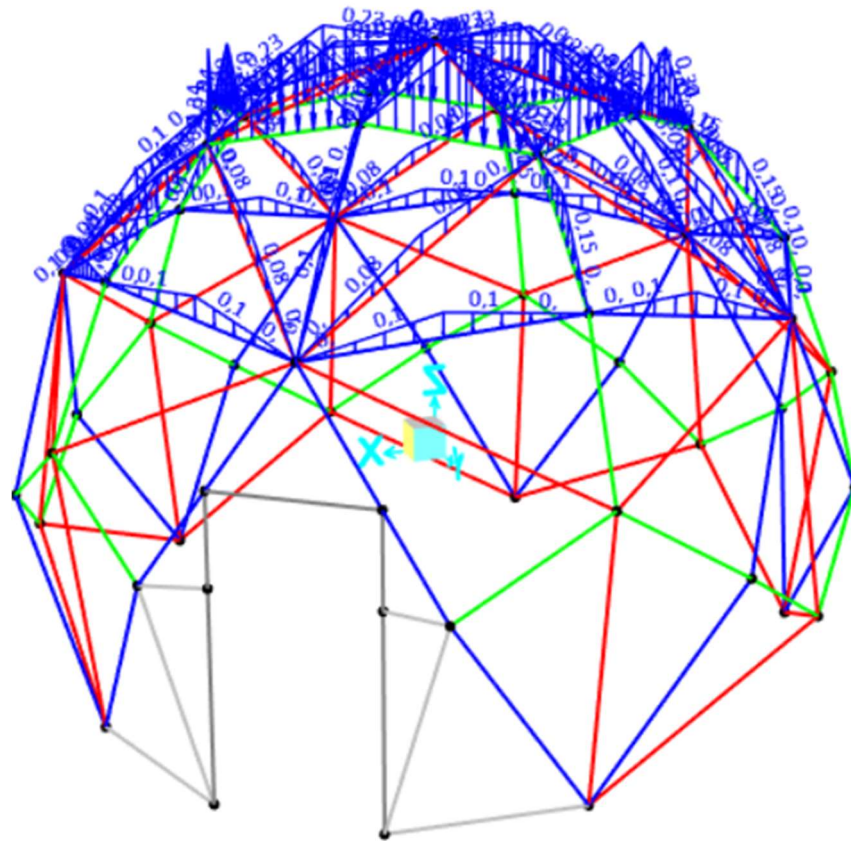


Ilustración 60. Aplicación de la sobrecarga de nieve en la estructura 3.

4.1.3.3. Acción del viento

De igual forma que para la estructura 1. se le aplica a la estructura 8 casos de carga de viento, diferenciando dos direcciones principales de viento y dos sentidos por cada dirección, teniendo en cuenta separadamente caso de carga por presión y por succión. Arbitrariamente se denomina barlovento al sentido del viento que produce presiones sobre la puerta (dirección 1) o presiones sobre la parte derecha del domo cuando se mira desde fuera hacia la puerta (dirección 2). Se enumeran cada uno de estos casos de carga y su codificación:

- Dirección principal 1. Sentido de la carga: Barlovento. Esta acción actúa en perpendicular al plano de la puerta en sentido hacia el interior del domo. Con ello se obtienen los siguientes casos de carga:
 - VP1-B. Viento de presión en dirección principal 1 – Barlovento.
 - VS1-B. Viento de succión en dirección principal 1 – Barlovento.
- Dirección principal 1. Sentido de la carga: Sotavento. Esta acción actúa en perpendicular al plano de la puerta empujando desde la parte opuesta de la puerta. Con ello se obtienen los siguientes casos de carga:
 - VP1-S. Viento de presión en dirección principal 1 – Sotavento.
 - VS1-S. Viento de succión en dirección principal 1 – Sotavento.
- Dirección principal 2. Sentido de la carga: Barlovento. Esta acción actúa en paralelo al plano de la puerta empujando desde el lateral derecho del domo. Con ello se obtienen los siguientes casos de carga:
 - VP2-B. Viento de presión en dirección principal 2 – Barlovento.
 - VS2-B. Viento de succión en dirección principal 2 – Barlovento.
- Dirección principal 2. Sentido de la carga: Sotavento. Esta acción actúa en paralelo al plano de la puerta empujando desde el lateral izquierdo del domo. Con ello se obtienen los siguientes casos de carga:
 - VP2-S. Viento de presión en dirección principal 2 – Sotavento.
 - VS2-S. Viento de succión en dirección principal 2 – Sotavento.

Dado que la ubicación de la estructura 3 se ubica en la misma parcela, se utilizarán las mismas cargas por superficie calculadas anteriormente.

Según la acción del viento en las diferentes direcciones y sentidos las áreas tributarias que aplican a cada barra se verán modificadas para cada caso. Aplicando los criterios antes mencionados se expone en la siguiente tabla las áreas tributarias utilizadas para cada caso de carga para cada una de las barras.

Grupo barras	AT VP1-B	AT VS1-B	AT VP1-S	AT VS1-S	AT VP2-B	AT VS2-B	AT VP2-S	AT VS2-S
A	1,0564	1,0564	1,0564	1,0564	1,0564	1,0564	1,0564	1,0564
B	1,0564	1,0564	1,0564	1,0564	1,0564	1,0564	1,0564	1,0564
C	1,0564	1,0564	1,0564	1,0564	1,0564	1,0564	1,0564	1,0564
A-BASE	0,5282	0,5282	0,5282	0,5282	0,5282	0,5282	0,5282	0,5282
B-PUERTA	0,3085	0,0000	0,0000	0,3085	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P1	1,1352	0,0000	0,0000	1,1352	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P2	1,1305	0,0000	0,0000	1,1305	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P3	0,2332	0,0000	0,0000	0,2332	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P4	0,6553	0,0000	0,0000	0,6553	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
P5	0,4927	0,0000	0,0000	0,4927	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Tabla 51. Área tributaria de cada barra en cada caso de carga de viento en domo 3.

Se exponen los datos de las cargas aplicadas en cada caso de carga de viento:

Grupo barras	Área tributaria (m2)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular por barra
A	1,056	0,89	2,564	0,692
B	1,056	0,89	2,186	0,812
C	1,056	0,89	1,451	1,223
A-BASE	0,528	0,44	2,564	0,346
B-PUERTA	0,309	0,26	2,186	0,237
P1	1,135	0,95	1,399	1,363
P2	1,131	0,95	2,566	0,740
P3	0,233	0,20	0,546	0,718
P4	0,655	0,55	1,870	0,589
P5	0,493	0,41	1,621	0,511

Tabla 52. Viento de presión 1 – Barlovento – Domo 3.

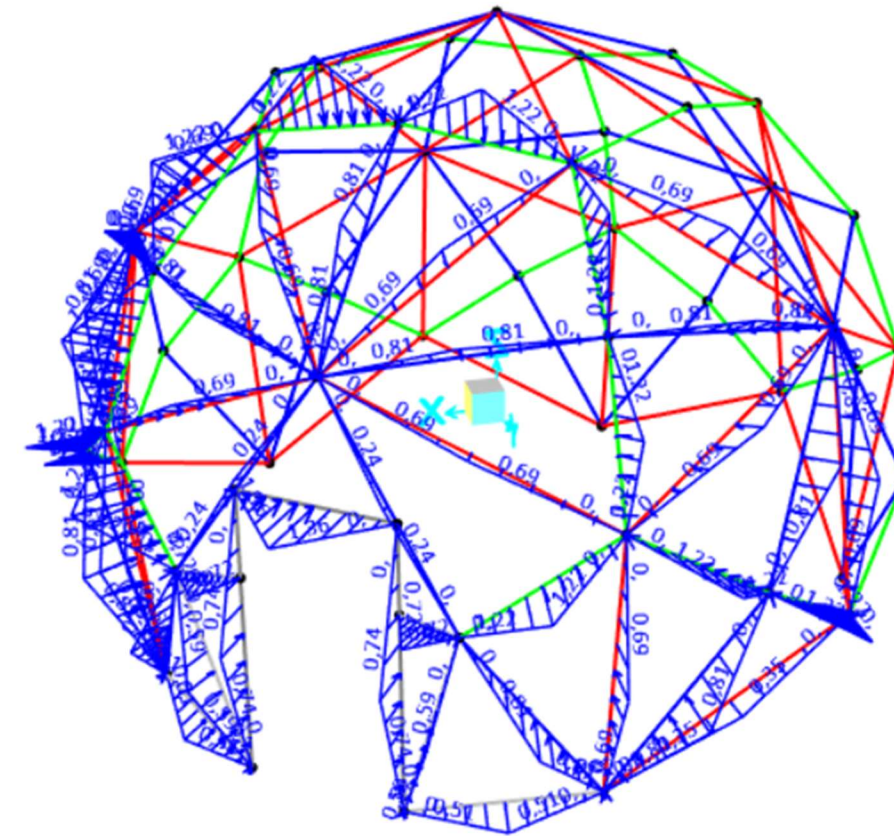


Ilustración 61. Viento de presión 1 – Barlovento – Domo 3.

Grupo barras	Área tributaria (m2)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular por barra
A	1,056	-1,33	2,564	-1,038
B	1,056	-1,33	2,186	-1,218
C	1,056	-1,33	1,451	-1,834
A-BASE	0,528	-0,67	2,564	-0,519

Tabla 53. Viento de succión 1 – Barlovento – Domo 3.

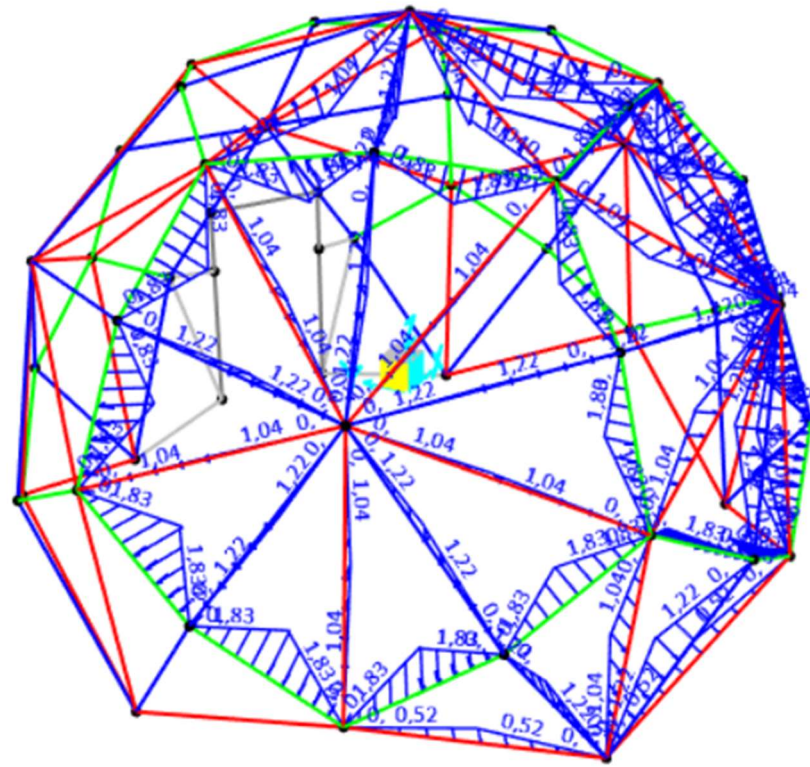


Ilustración 62. Viento de succión 1 – Barlovento – Domo 3.

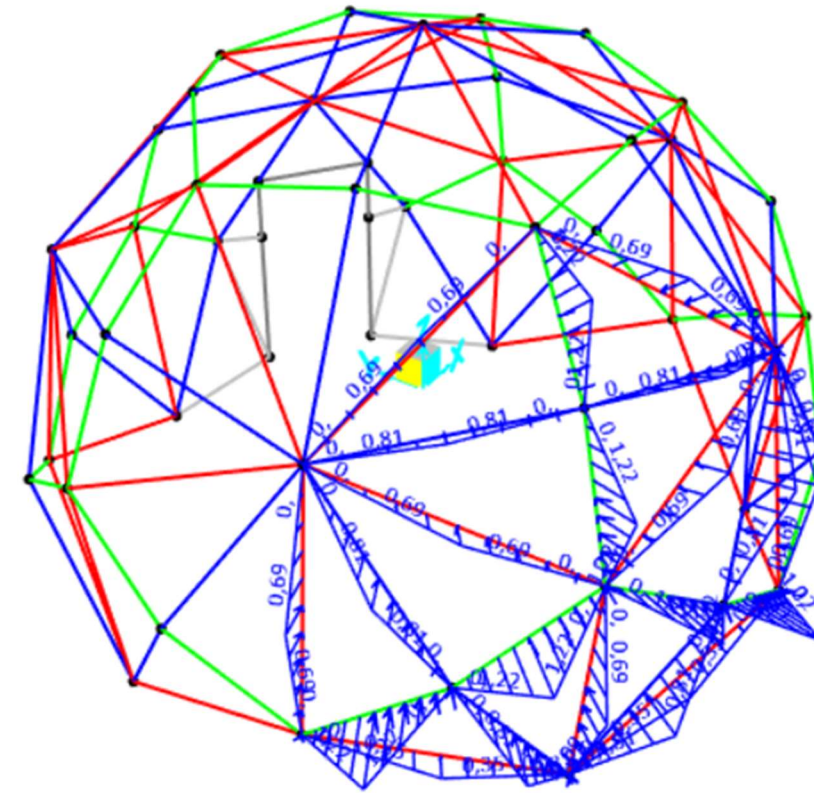


Ilustración 63. Viento de presión 1 – Sotavento – Domo 3.

Grupo barras	Área tributaria (m2)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular por barra
A	1,056	0,89	2,564	0,692
B	1,056	0,89	2,186	0,812
C	1,056	0,89	1,451	1,223
A-BASE	0,528	0,44	2,564	0,346

Tabla 54. Viento de presión 1 – Sotavento – Domo 3.

Grupo barras	Área tributaria (m2)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular por barra
A	1,056	-1,33	2,564	-1,038
B	1,056	-1,33	2,186	-1,218
C	1,056	-1,33	1,451	-1,834
A-BASE	0,528	-0,67	2,564	-0,519
B-PUERTA	0,309	-0,39	2,186	-0,356
P1	1,135	-1,43	1,399	-2,045
P2	1,131	-1,42	2,566	-1,110
P3	0,233	-0,29	0,546	-1,077
P4	0,655	-0,83	1,870	-0,883
P5	0,493	-0,62	1,621	-0,766

Tabla 55. Viento de succión 1 – Sotavento – Domo 3.

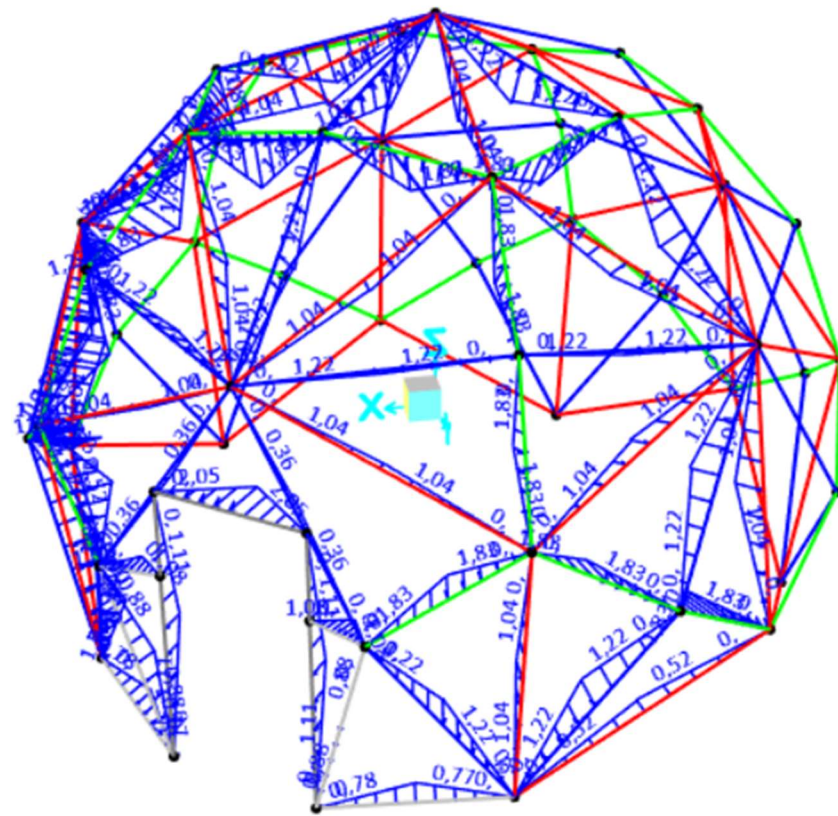


Ilustración 64. Viento de succión 1 – Sotavento – Domo 3.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular por barra
A	1,056	0,89	2,564	0,692
B	1,056	0,89	2,186	0,812
C	1,056	0,89	1,451	1,223
A-BASE	0,528	0,44	2,564	0,346

Tabla 56. Viento de presión 2 – Barlovento – Domo 3.

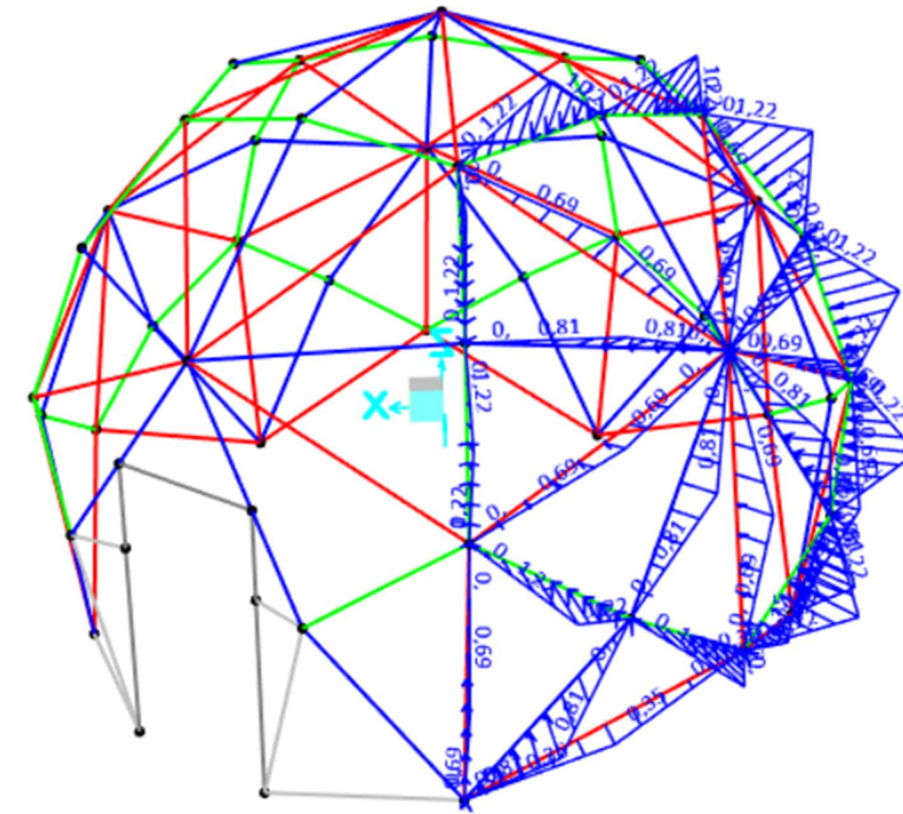


Ilustración 65. Viento de presión 2 – Barlovento – Domo 3.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular por barra
A	1,056	-1,33	2,564	-1,038
B	1,056	-1,33	2,186	-1,218
C	1,056	-1,33	1,451	-1,834
A-BASE	0,528	-0,67	2,564	-0,519

Tabla 57. Viento de succión 2 – Barlovento – Domo 3.

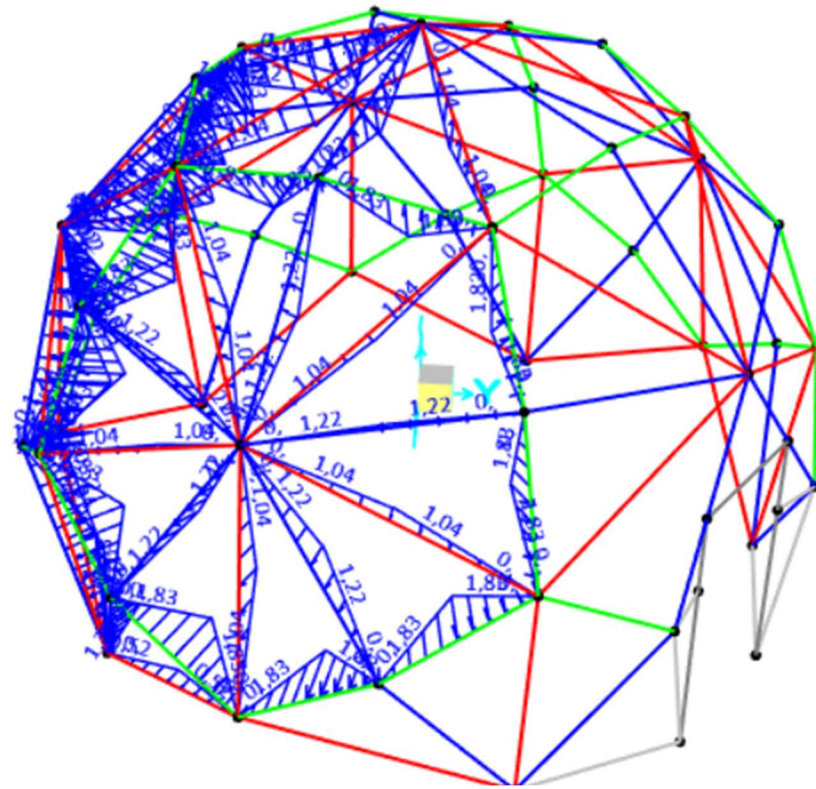


Ilustración 66. Viento de succión 2 – Barlovento – Domo 3.

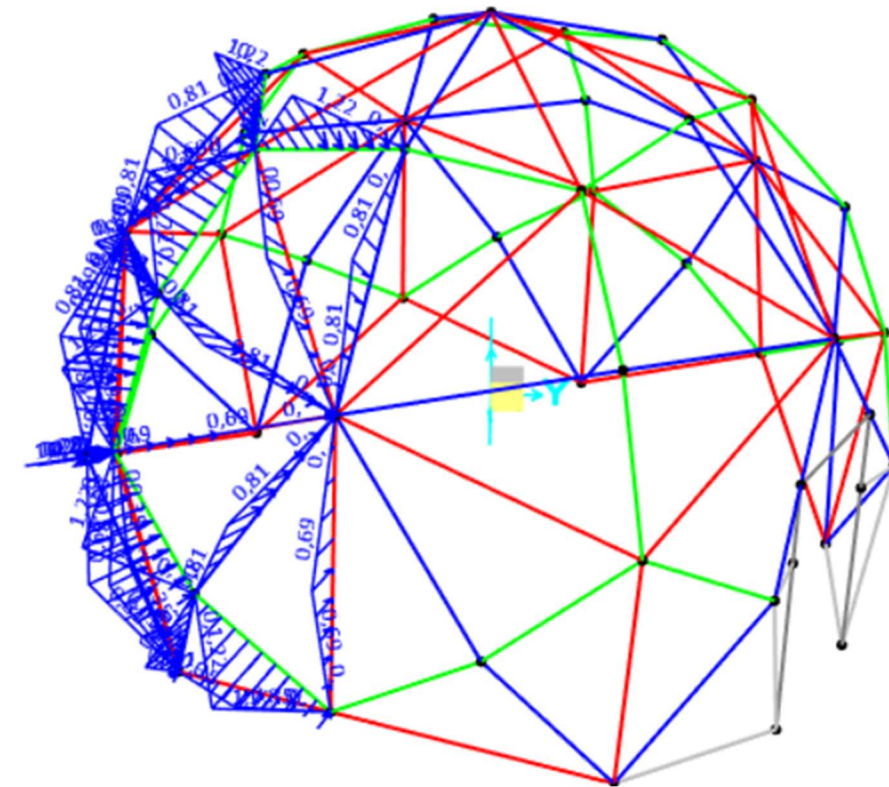


Ilustración 67. Viento de presión 2 – Sotavento – Domo 3.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular por barra
A	1,056	0,89	2,564	0,692
B	1,056	0,89	2,186	0,812
C	1,056	0,89	1,451	1,223
A-BASE	0,528	0,44	2,564	0,346

Tabla 58. Viento de presión 2 – Sotavento – Domo 3.

Grupo barras	Área tributaria (m ²)	Carga total por barra (kN)	Longitud (m)	Carga Triangular por barra
A	1,056	-1,33	2,564	-1,038
B	1,056	-1,33	2,186	-1,218
C	1,056	-1,33	1,451	-1,834
A-BASE	0,528	-0,67	2,564	-0,519

Tabla 59. Viento de succión 2 - Sotavento.

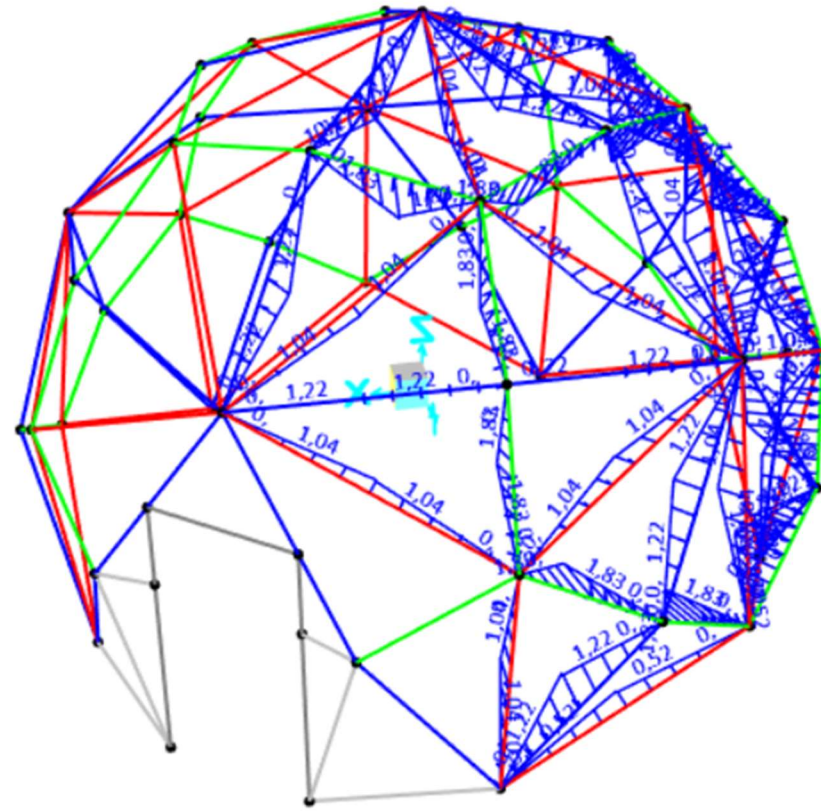


Ilustración 68. Viento de succión 2 – Sotavento – Domo 3.

4.1.3.4. Acciones térmicas

Las acciones térmicas aplicadas a la estructura de domo 3 son exactamente iguales a las aplicadas en el domo 2 y domo 3.

4.2. ESFUERZOS DE CÁLCULO

Aplicando las mismas combinaciones de acciones para ELU y ELS que en la estructura geodésica 1, se obtienen los siguientes datos de esfuerzos de cálculo para el domo 3.

El valor máximo del axil de tracción es de 9,51 kN. Mientras que el valor máximo del axil de compresión es de -11,13 kN.

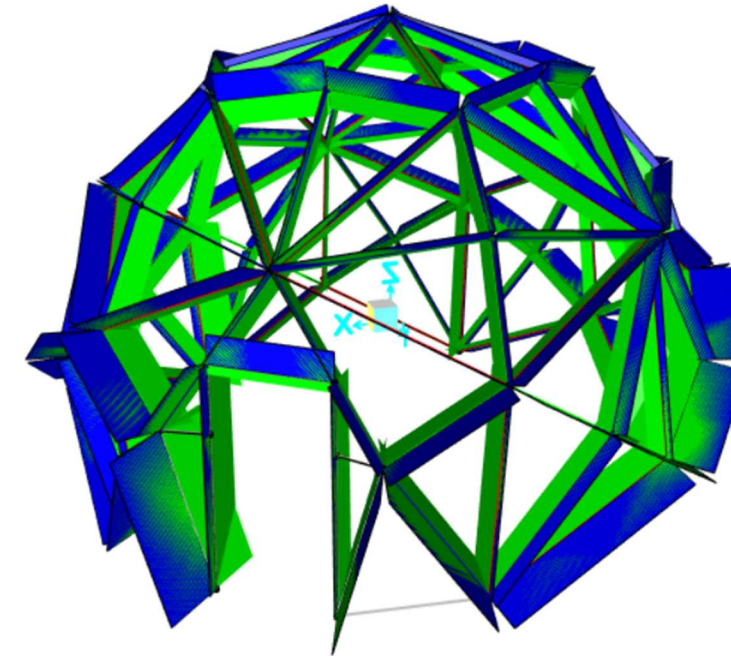


Ilustración 69. Axil máximo y mínimo en ELU - Domo 3.

El cortante 2-2 de valor máximo es de 0,90 kN, mientras que el de valor mínimo es de -1,01 kN.

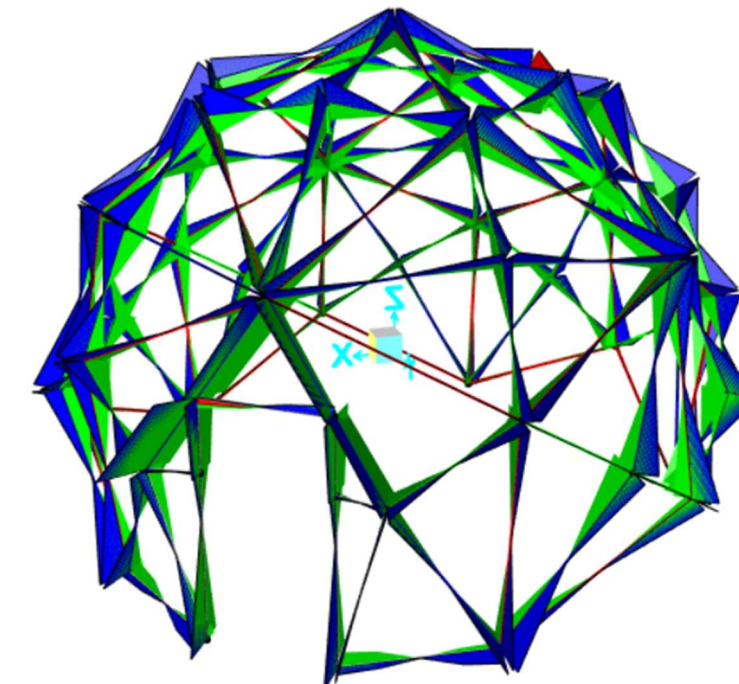


Ilustración 70. Cortante máximo y mínimo en la dirección paralela al canto de la pieza en ELU - Domo 3. (Cortante 2-2)

El cortante 3-3 de valor máximo es de 0,86 kN y el de valor mínimo es de -0,64 kN.

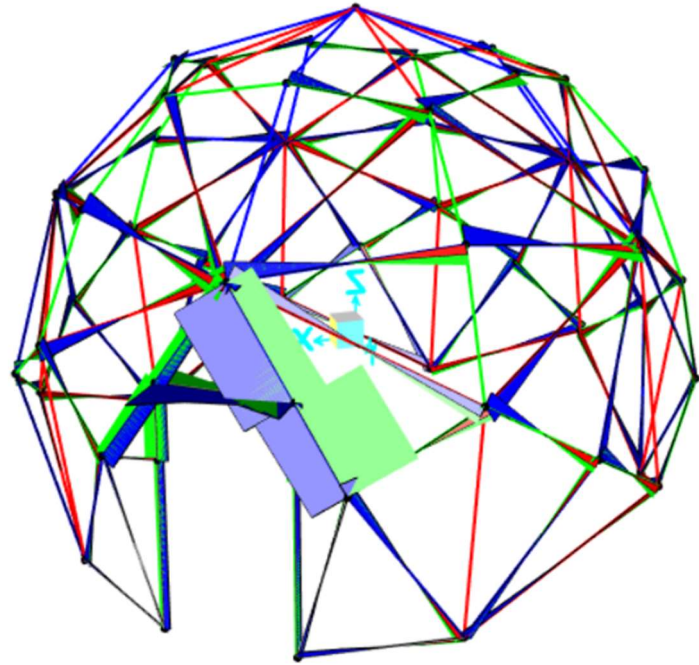


Ilustración 71. Cortante máximo y mínimo en la dirección perpendicular al canto de la pieza en ELU - Domo 3. (Cortante 3-3).

El valor máximo de los esfuerzos de torsión es de 0,08 kN y su valor mínimo de -0,13 kN.

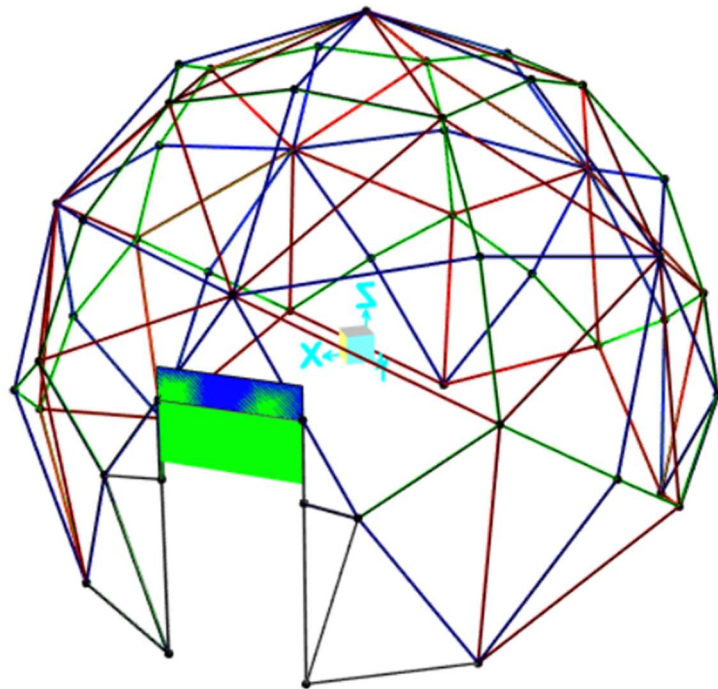


Ilustración 72. Torsión máxima y mínima en ELU - Domo 3.

El valor máximo de los esfuerzos flectores 2-2 es de 0,54 kN.m, mientras que el valor mínimo es de -0,39 kN.m.

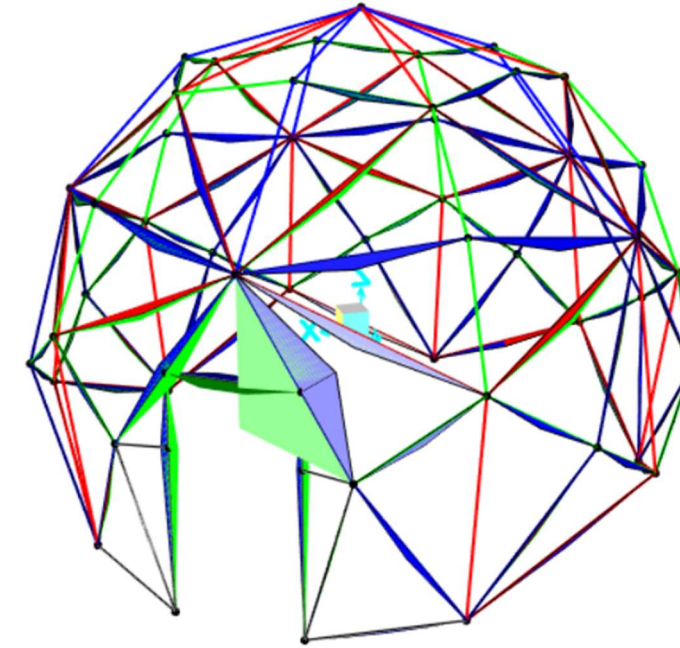


Ilustración 73. Flectores máximos y mínimos sobre el eje paralelo al canto de la pieza en ELU - Domo 3. (Momento 2-2).

El valor máximo del esfuerzo flector 3-3 es de 0,55 kN.m y su valor mínimo es de -0,66 kN.m.

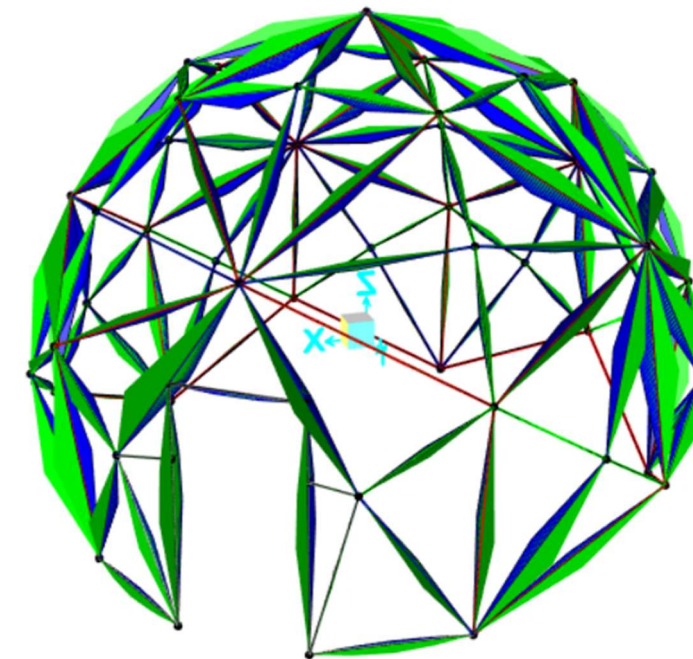


Ilustración 74. Flectores máximos y mínimos sobre el eje perpendicular al canto de la pieza en ELU - Domo 3. (Momento 3-3).

Esfuerzos de cálculo			
Descripción	Parámetro	Valor (kN o kN.m)	Combinación
Axil máximo a tracción	P max	16,46	COMB093
Axil máximo a compresión	P min	-18,23	COMB056
Cortante positivo paralelo al canto	V2 max	2,17	COMB088
Cortante negativo paralelo al canto	V2 min	-2,07	COMB088
Cortante positivo perpendicular al canto	V3 max	1,07	COMB007
Cortante negativo perpendicular al canto	V3 min	-1,07	COMB085
Torsor máximo positivo	Tmax	0,00	COMB065
Torsor máximo negativo	Tmin	0,00	COMB088
Flexión sobre el plano paralelo al canto	M2 max	0,44	COMB065
Flexión sobre el plano paralelo al canto	M2 min	-0,76	COMB088
Flexión el plano perpendicular al canto	M3 max	1,04	COMB065
Flexión el plano perpendicular al canto	M3 min	-2,00	COMB088

Tabla 60. Esfuerzos de cálculo - Domo 3.

4.3. REACCIONES DE CÁLCULO

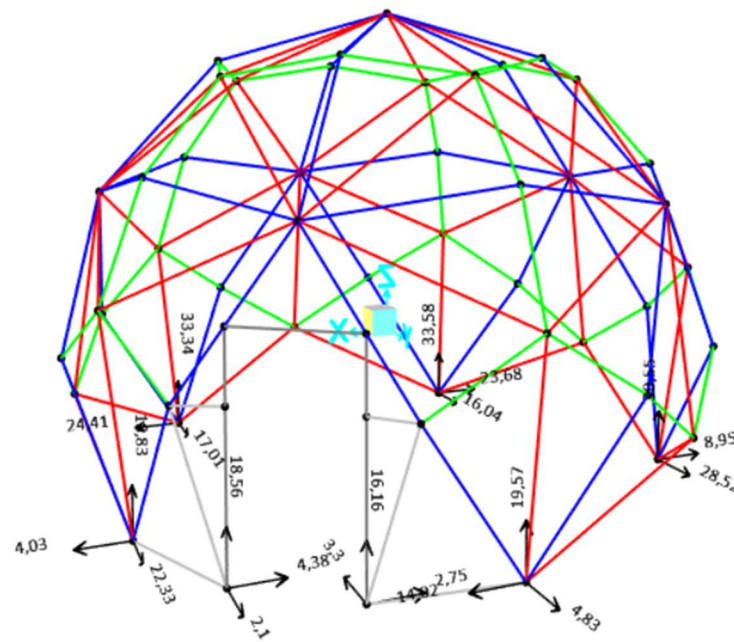


Ilustración 75. Reacciones máximas en los apoyos de la estructura en ELS – Domo 3.

Reacciones de cálculo			
Dirección de la reacción	Valor máximo de la reacción	Nº Nudo	Combinación
F1	24,41	8	COMB082
F2	28,52	4	COMB082
F3	33,58	6	COMB066

Tabla 61. Valor máximo de las reacciones ELU - Domo 3.

4.4. DESPLAZAMIENTOS DE CÁLCULO

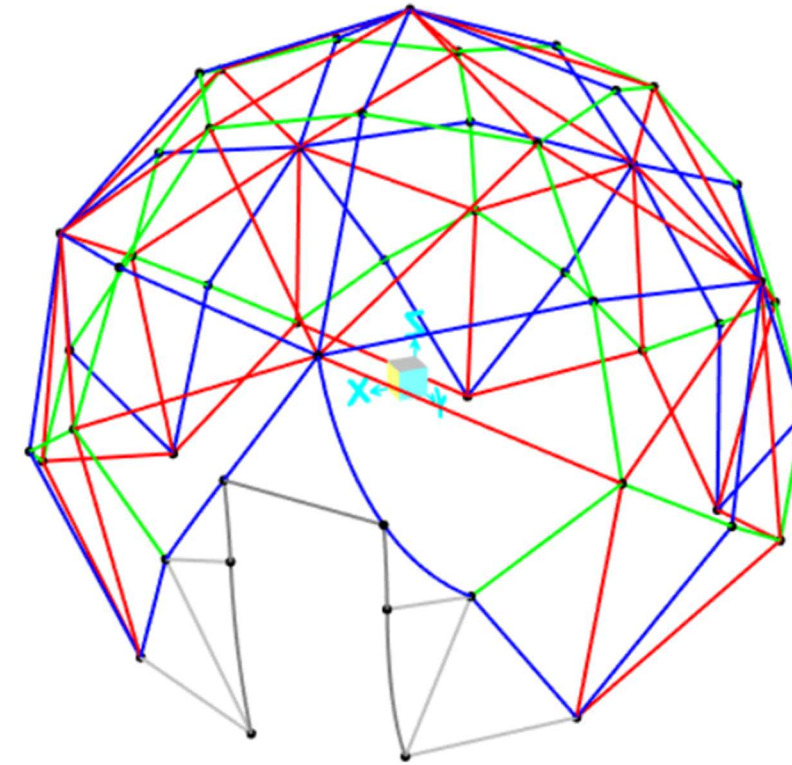


Ilustración 76. Máximos desplazamientos en ELS – Domo 3.

Se resume el resultado de los esfuerzos de cálculo, reacciones y desplazamientos máximos del análisis estructural del domo 2 en las siguientes tablas:

Desplazamientos y giros de cálculo			
Dirección del desplazamiento ejes locales	Desplazamiento máximo en valor absoluto (mm)	Nº Nudo	Combinación
U1	2,0	12	ELS-COMB087
U2	2,8	17	ELS-COMB087
U3	1,4	129	ELS-COMB141
Giros	Giro máximo en valor absoluto	Nº Nudo	Combinación
R1	0,0095	10	ELS-COMB087
R2	0,0083	8	ELS-COMB087
R3	0,0086	23	ELS-COMB044

Tabla 62. Desplazamientos y giros máximos en ELS - Domo 3.

ANEXO 1: COMBINACIÓN DE ACCIONES ELU

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
COMB001	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VP2-B	0
	VS1-B	0
	VS2-B	0
	SNOW	0
	T Max	0
	T Min	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-S	0
VS2-S	0	
COMB002	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-B	0
	VS2-B	0
	VP2-S	0
	VS2-S	0
	SNOW	0
	T Max	0
T Min	0	
COMB003	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	0
	SCU 2	1,5
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-B	0
	VS2-B	0
	VP2-S	0
	VS2-S	0
	SNOW	0

Combinación	Caso de carga	Coeficiente	
	T Max	0	
	T Min	0	
COMB004	CM	1,35	
	Peso propio	1,35	
	SCU 1	0	
	SCU 2	0	
	VP1-B	1,5	
	VS1-B	0	
	VP1-S	0	
	VS1-S	0	
	VP2-B	0	
	VS2-B	0	
	VP2-S	0	
	VS2-S	0	
	SNOW	0	
	T Max	0	
T Min	0		
COMB005	CM	0,9	
	Peso propio	0,9	
	SCU 1	0	
	SCU 2	0	
	VP1-B	0	
	VS1-B	1,5	
	VP1-S	0	
	VS1-S	0	
	VP2-B	0	
	VS2-B	0	
	VP2-S	0	
	VS2-S	0	
	SNOW	0	
	T Max	0	
T Min	0		
COMB006	CM	1,35	
	Peso propio	1,35	
	SCU 1	0	
	SCU 2	0	
	VP1-B	0	
	VS1-B	0	
	VP1-S	1,5	
	VS1-S	0	
	VP2-B	0	
	VS2-B	0	
	VP2-S	0	

Combinación	Caso de carga	Coeficiente	
	VS2-S	0	
	SNOW	0	
	T Max	0	
	T Min	0	
COMB007	CM	0,9	
	Peso propio	0,9	
	SCU 1	0	
	SCU 2	0	
	VP1-B	0	
	VS1-B	0	
	VP1-S	0	
	VS1-S	1,5	
	VP2-B	0	
	VS2-B	0	
	VP2-S	0	
	VS2-S	0	
	SNOW	0	
	T Max	0	
T Min	0		
COMB008	CM	1,35	
	Peso propio	1,35	
	SCU 1	0	
	SCU 2	0	
	VP1-B	0	
	VS1-B	0	
	VP1-S	0	
	VS1-S	0	
	VP2-B	1,5	
	VS2-B	0	
	VP2-S	0	
	VS2-S	0	
	SNOW	0	
	T Max	0	
T Min	0		
COMB009	CM	0,9	
	Peso propio	0,9	
	SCU 1	0	
	SCU 2	0	
	VP1-B	0	
	VS1-B	0	
	VP1-S	0	
	VS1-S	0	
	VP2-B	0	

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	VS2-B	1,5
	VP2-S	0
	VS2-S	0
	SNOW	0
	T Max	0
	T Min	0
COMB010	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-B	0
	VS2-B	0
	VP2-S	1,5
	VS2-S	0
	SNOW	0
	T Max	0
T Min	0	
COMB011	CM	0,9
	Peso propio	0,9
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-B	0
	VS2-B	0
	VP2-S	0
	VS2-S	1,5
	SNOW	0
	T Max	0
T Min	0	
COMB012	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	0
VP1-S	0	

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	VS1-S	0
	VP2-B	0
	VS2-B	0
	VP2-S	0
	VS2-S	0
	SNOW	1,5
	T Max	0
	T Min	0
COMB013	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-B	0
	VS2-B	0
	VP2-S	0
	VS2-S	0
SNOW	0	
T Max	1,5	
T Min	0	
COMB014	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-B	0
	VS2-B	0
	VP2-S	0
	VS2-S	0
SNOW	0	
T Max	0	
T Min	1,5	
COMB015	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5
	VP1-B	0,9
COMB016	T Max	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
SCU 1	1,5	

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	VP1-B	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
	CM	1,35
COMB017	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5
	VS1-B	0,9
	T Max	0,9
	CM	1,35
COMB018	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5
	VS1-B	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
COMB019	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5
	VP1-B	0,9
	VS1-B	0,9
COMB020	T Max	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5
	VP1-B	0,9
COMB021	VS1-B	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
COMB022	SCU 1	1,5
	VP1-S	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
	CM	1,35
COMB023	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5
	VS1-S	0,9
	T Max	0,9
COMB024	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	VS1-S	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
COMB025	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5
	VP1-S	0,9
	VS1-S	0,9
	T Max	0,9
COMB026	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5
	VP1-S	0,9
	VS1-S	0,9
	SNOW	0,75
COMB027	T Min	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5
COMB028	VP2-B	0,9
	T Max	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
COMB029	SCU 1	1,5
	VS2-B	0,9
	T Max	0,9
	CM	1,35
COMB030	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5
	VS2-B	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
	CM	1,35
COMB031	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5
	VP2-B	0,9
	VS2-B	0,9
COMB032	T Max	0,9
	CM	1,35
Peso propio	1,35	

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	SCU 1	1,5
	VP2-B	0,9
	VS2-B	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
COMB33	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5
	VP2-S	0,9
COMB34	T Max	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5
COMB35	VP2-S	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
	CM	1,35
COMB36	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5
	VS2-S	0,9
	SNOW	0,75
COMB37	T Min	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 1	1,5
COMB38	VP2-S	0,9
	VS2-S	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
	CM	1,35
COMB039	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
	VP1-B	0,9
COMB040	T Max	0,9
	CM	1,35

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
	VP1-B	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
COMB041	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
	VS1-B	0,9
COMB042	T Max	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
	VS1-B	0,9
COMB043	SNOW	0,75
	T Min	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
COMB044	VP1-B	0,9
	VS1-B	0,9
	T Max	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
COMB045	SCU 2	1,5
	VP1-S	0,9
	T Max	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
COMB046	SCU 2	1,5
	VP1-S	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
	CM	1,35
COMB047	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
	VS1-S	0,9
	T Max	0,9
COMB048	CM	1,35

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
	VS1-S	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
COMB049	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
	VP1-S	0,9
COMB050	VS1-S	0,9
	T Max	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
COMB051	VP1-S	0,9
	VS1-S	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
	CM	1,35
COMB052	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
	VP2-B	0,9
	T Max	0,9
COMB053	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
	VS2-B	0,9
	T Max	0,9
COMB054	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
	VS2-B	0,9
	SNOW	0,75
COMB055	T Min	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
	VP2-B	0,9
	VS2-B	0,9
	T Max	0,9

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
COMB056	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
	VP2-B	0,9
	VS2-B	0,9
	SNOW	0,75
COMB057	T Min	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
COMB058	VP2-S	0,9
	T Max	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
COMB059	VP2-S	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
COMB060	SCU 2	1,5
	VS2-S	0,9
	T Max	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
COMB061	SCU 2	1,5
	VP2-S	0,9
	VS2-S	0,9
	T Max	0,9
	CM	1,35
COMB062	Peso propio	1,35
	SCU 2	1,5
	VP2-S	0,9
	VS2-S	0,9
	SNOW	0,75
COMB063	T Min	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	VP1-B	1,5
	T Max	0,9

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
COMB064	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	VP1-B	1,5
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
COMB065	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	VP1-B	1,5
	VS1-B	0,9
COMB066	T Max	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	VP1-B	1,5
	VS1-B	0,9
COMB067	SNOW	0,75
	T Min	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
COMB068	VP1-S	1,5
	T Max	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
COMB069	VP1-S	1,5
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
COMB070	VP1-S	1,5
	VS1-S	0,9
	T Max	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
COMB071	VP1-S	1,5
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
	CM	1,35
COMB072	Peso propio	1,35
	VP2-B	1,5
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
COMB073	CM	1,35

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	Peso propio	1,35
	VP2-B	1,5
	VS2-B	0,9
	T Max	0,9
COMB074	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	VP2-B	1,5
	VS2-B	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
COMB075	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	VP2-S	1,5
	T Max	0,9
COMB076	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	VP2-S	1,5
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
COMB077	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	VP2-S	1,5
	VS2-S	0,9
	T Max	0,9
COMB078	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	VP2-S	1,5
	VS2-S	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
COMB079	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	VS1-B	1,5
	T Max	0,9
COMB080	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	VS1-B	1,5
	T Min	0,9
COMB081	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	VS1-B	1,5
	SNOW	0,75
COMB082	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	VS1-B	1,5

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
COMB083	VP1-B	0,9
	T Max	0,9
	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	VS1-B	1,5
	VP1-B	0,9
COMB084	SNOW	0,75
	T Min	0,9
	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	VS1-S	1,5
COMB085	T Max	0,9
	CM	0,8
	Peso propio	0,8
COMB086	VS1-S	1,5
	T Min	0,9
	CM	0,8
	Peso propio	0,8
COMB087	VS1-S	1,5
	VP1-S	0,9
	T Max	0,9
	CM	0,8
COMB088	Peso propio	0,8
	VS1-S	1,5
	VP1-S	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
	CM	0,8
COMB089	Peso propio	0,8
	VS2-B	1,5
	T Max	0,9
COMB090	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	VS2-B	1,5
	T Min	0,9
COMB091	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	VS2-B	1,5
	SNOW	0,75
COMB092	T Min	0,9
	CM	0,8

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	Peso propio	0,8
	VS2-B	1,5
	VP2-B	0,9
	T Max	0,9
COMB093	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	VS2-B	1,5
	VP2-B	0,9
	SNOW	0,75
	T Min	0,9
COMB094	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	VS2-S	1,5
COMB095	T Max	0,9
	CM	0,8
	Peso propio	0,8
COMB096	VS2-S	1,5
	T Min	0,9
	CM	0,8
	Peso propio	0,8
COMB097	VS2-S	1,5
	T Min	0,9
	CM	0,8
	Peso propio	0,8
COMB098	VP2-S	0,9
	T Max	0,9
	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	VS2-S	1,5
	VP2-S	0,9
COMB099	SNOW	0,75
	T Min	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
COMB100	SNOW	1,5
	VP1-B	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
COMB101	SNOW	1,5
	Peso propio	1,35
	CM	1,35

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	VP1-B	0,9
	VS1-B	0,9
	T Min	0,9
COMB102	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SNOW	1,5
	VP1-S	0,9
COMB103	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SNOW	1,5
	VS1-S	0,9
COMB104	T Min	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SNOW	1,5
COMB105	VP1-S	0,9
	VS1-S	0,9
	T Min	0,9
	CM	1,35
COMB106	Peso propio	1,35
	SNOW	1,5
	VP2-B	0,9
	CM	1,35
COMB107	Peso propio	1,35
	SNOW	1,5
	VP2-B	0,9
	VS2-B	0,9
COMB108	T Min	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SNOW	1,5
COMB109	VP2-S	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SNOW	1,5
COMB110	VS2-S	0,9
	T Min	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	VS2-S	0,9
	T Min	0,9
COMB111	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	SNOW	1,5
	T Min	0,9
COMB112	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	T Min	1,5
COMB113	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	T Min	1,5
COMB114	VP1-B	0,9
	CM	0,8
	Peso propio	0,8
COMB115	T Min	1,5
	VS1-B	0,9
	CM	0,8
COMB116	Peso propio	0,8
	T Min	1,5
	VP1-B	0,9
	SNOW	0,75
COMB117	VS1-B	0,9
	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	T Min	1,5
	VP1-S	0,9
COMB118	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	T Min	1,5
	VS1-S	0,9

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
COMB119	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	T Min	1,5
	VP1-S	0,9
	SNOW	0,75
COMB120	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	T Min	1,5
	VP1-S	0,9
COMB121	SNOW	0,75
	VS1-S	0,9
	CM	0,8
	Peso propio	0,8
COMB122	T Min	1,5
	VP2-B	0,9
	CM	0,8
COMB123	Peso propio	0,8
	T Min	1,5
	VS2-B	0,9
	CM	0,8
COMB124	Peso propio	0,8
	T Min	1,5
	VP2-B	0,9
	SNOW	0,75
	VS2-B	0,9
COMB125	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	T Min	1,5
COMB126	VP2-S	0,9
	CM	0,8
	Peso propio	0,8

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	T Min	1,5
	VS2-S	0,9
COMB127	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	T Min	1,5
	VP2-S	0,9
	SNOW	0,75
COMB128	CM	0,8
	Peso propio	0,8
	T Min	1,5
	VP2-S	0,9
COMB129	SNOW	0,75
	VS2-S	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
COMB130	T Max	1,5
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
COMB131	T Max	1,5
	VP1-B	0,9
	CM	1,35
COMB132	Peso propio	1,35
	T Max	1,5
	VP1-B	0,9
	VS1-B	0,9
	CM	1,35
COMB133	Peso propio	1,35
	T Max	1,5
	VP1-S	0,9
COMB134	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	T Max	1,5

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	VS1-S	0,9
COMB135	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	T Max	1,5
	VP1-S	0,9
	VS1-S	0,9
COMB136	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	T Max	1,5
COMB137	VP2-B	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
COMB138	T Max	1,5
	VP2-B	0,9
	VS2-B	0,9
	CM	1,35
COMB139	Peso propio	1,35
	T Max	1,5
	VP2-S	0,9
COMB140	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	T Max	1,5
COMB141	VS2-S	0,9
	CM	1,35
	Peso propio	1,35
	T Max	1,5
	VP2-S	0,9
	VS2-S	0,9

ANEXO 2. COMBINACIÓN DE ACCIONES ELS

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
ELS-COMB001	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VP2-B	0
	VS1-B	0
	VS2-B	0
	SNOW	0
	T Max	0
	T Min	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-S	0
	VS2-S	0
ELS-COMB002	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-B	0
	VS2-B	0
	VP2-S	0
	VS2-S	0
	SNOW	0
	T Max	0
	T Min	0
ELS-COMB003	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	0
	SCU 2	1
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-B	0
	VS2-B	0
	VP2-S	0
	VS2-S	0
	SNOW	0

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
ELS-COMB004	T Max	0
	T Min	0
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	1
	VS1-B	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-B	0
	VS2-B	0
	VP2-S	0
	VS2-S	0
	SNOW	0
ELS-COMB005	T Max	0
	T Min	0
	CM	0,6
	Peso propio	0,6
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	1
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-B	0
	VS2-B	0
	VP2-S	0
	VS2-S	0
	SNOW	0
ELS-COMB006	T Max	0
	T Min	0
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	1
	VS1-S	0
	VP2-B	0
	VS2-B	0
	VP2-S	0

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
ELS-COMB007	VS2-S	0
	SNOW	0
	T Max	0
	T Min	0
	CM	0,6
	Peso propio	0,6
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	0
	VS1-S	1
	VP2-B	0
	VS2-B	0
	VP2-S	0
ELS-COMB008	VS2-S	0
	SNOW	0
	T Max	0
	T Min	0
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-B	1
	VS2-B	0
	VP2-S	0
ELS-COMB009	VS2-S	0
	SNOW	0
	T Max	0
	T Min	0
	CM	0,6
	Peso propio	0,6
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-B	0

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
ELS-COMB010	VS2-B	1
	VP2-S	0
	VS2-S	0
	SNOW	0
	T Max	0
	T Min	0
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-B	0
ELS-COMB011	VS2-B	0
	VP2-S	1
	VS2-S	0
	SNOW	0
	T Max	0
	T Min	0
	CM	0,6
	Peso propio	0,6
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-B	0
ELS-COMB012	VS2-B	0
	VP2-S	0
	VS2-S	1
	SNOW	0
	T Max	0
	T Min	0
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	0

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	VS1-S	0
	VP2-B	0
	VS2-B	0
	VP2-S	0
	VS2-S	0
	SNOW	1
	T Max	0
	T Min	0
ELS-COMB013	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-B	0
	VS2-B	0
	VP2-S	0
	VS2-S	0
SNOW	0	
T Max	1	
T Min	0	
ELS-COMB014	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	0
	SCU 2	0
	VP1-B	0
	VS1-B	0
	VP1-S	0
	VS1-S	0
	VP2-B	0
	VS2-B	0
	VP2-S	0
	VS2-S	0
SNOW	0	
T Max	0	
T Min	1	
ELS-COMB015	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
	VP1-B	0,6
ELS-COMB016	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
SCU 1	1	

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	VP1-B	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
ELS-COMB017	VS1-B	0,6
	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
ELS-COMB018	VS1-B	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
ELS-COMB019	Peso propio	1
	SCU 1	1
	VP1-B	0,6
	VS1-B	0,6
	T Max	0,6
ELS-COMB020	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
	VP1-B	0,6
	VS1-B	0,6
	SNOW	0,5
ELS-COMB021	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
	VP1-S	0,6
ELS-COMB022	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
	VP1-S	0,6
	SNOW	0,5
ELS-COMB023	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
	VS1-S	0,6
ELS-COMB024	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	VS1-S	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
ELS-COMB025	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
	VP1-S	0,6
	VS1-S	0,6
	T Max	0,6
ELS-COMB026	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
	VP1-S	0,6
	VS1-S	0,6
	SNOW	0,5
ELS-COMB027	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
	VP2-B	0,6
ELS-COMB028	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
	VP2-B	0,6
ELS-COMB029	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
ELS-COMB030	VS2-B	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
ELS-COMB031	VP2-B	0,6
	VS2-B	0,6
	T Max	0,6
	CM	1
ELS-COMB032	Peso propio	1
	CM	1

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	SCU 1	1
	VP2-B	0,6
	VS2-B	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
ELS-COMB33	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
	VP2-S	0,6
ELS-COMB34	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
ELS-COMB35	VP2-S	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB36	SCU 1	1
	VS2-S	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
ELS-COMB37	Peso propio	1
	SCU 1	1
	VP2-S	0,6
	VS2-S	0,6
	T Max	0,6
ELS-COMB38	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 1	1
	VP2-S	0,6
	VS2-S	0,6
	SNOW	0,5
ELS-COMB39	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 2	1
	VP1-B	0,6
	T Max	0,6
	CM	1

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
ELS-COMB040	Peso propio	1
	SCU 2	1
	VP1-B	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
ELS-COMB041	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 2	1
	VS1-B	0,6
ELS-COMB042	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 2	1
	VS1-B	0,6
ELS-COMB043	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 2	1
ELS-COMB044	VP1-B	0,6
	VS1-B	0,6
	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB045	SCU 2	1
	VP1-S	0,6
	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB046	SCU 2	1
	VP1-S	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
ELS-COMB047	Peso propio	1
	SCU 2	1
	VS1-S	0,6
	T Max	0,6
CM	1	

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
ELS-COMB048	Peso propio	1
	SCU 2	1
	VS1-S	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
ELS-COMB049	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 2	1
	VP1-S	0,6
ELS-COMB050	VS1-S	0,6
	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 2	1
ELS-COMB051	VP1-S	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB052	SCU 2	1
	VP2-B	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
ELS-COMB053	Peso propio	1
	SCU 2	1
	VS2-B	0,6
	T Max	0,6
ELS-COMB054	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 2	1
	VS2-B	0,6
	SNOW	0,5
ELS-COMB055	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 2	1
	VP2-B	0,6
ELS-COMB056	VS2-B	0,6
	T Max	0,6
	CM	1

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
ELS-COMB056	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 2	1
	VP2-B	0,6
	VS2-B	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
ELS-COMB057	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 2	1
	VP2-S	0,6
ELS-COMB058	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 2	1
	VP2-S	0,6
ELS-COMB059	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SCU 2	1
ELS-COMB060	VS2-S	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB061	SCU 2	1
	VP2-S	0,6
	VS2-S	0,6
	T Max	0,6
	CM	1
ELS-COMB062	Peso propio	1
	SCU 2	1
	VP2-S	0,6
	VS2-S	0,6
	SNOW	0,5
ELS-COMB063	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	VP1-B	1
T Max	0,6	

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
ELS-COMB064	CM	1
	Peso propio	1
	VP1-B	1
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
ELS-COMB065	CM	1
	Peso propio	1
	VP1-B	1
	VS1-B	0,6
ELS-COMB066	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	VP1-B	1
	VS1-B	0,6
ELS-COMB067	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB068	VP1-S	1
	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB069	VP1-S	1
	VS1-S	0,6
	T Max	0,6
	CM	1
ELS-COMB070	Peso propio	1
	VP1-S	1
	VS1-S	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
ELS-COMB071	CM	1
	Peso propio	1
	VP2-B	1
	T Max	0,6
ELS-COMB072	CM	1
	Peso propio	1
	VP2-B	1
	SNOW	0,5
T Min	0,6	
CM	1	

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
ELS-COMB073	Peso propio	1
	VP2-B	1
	VS2-B	0,6
	T Max	0,6
ELS-COMB074	CM	1
	Peso propio	1
	VP2-B	1
	VS2-B	0,6
	SNOW	0,5
ELS-COMB075	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	VP2-S	1
ELS-COMB076	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	VP2-S	1
	SNOW	0,5
ELS-COMB077	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	VP2-S	1
ELS-COMB078	VS2-S	0,6
	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	VP2-S	1
ELS-COMB079	VS2-S	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
ELS-COMB080	CM	1
	Peso propio	1
	VS1-B	1
	T Min	0,6
ELS-COMB081	CM	1
	Peso propio	1
	VS1-B	1
	SNOW	0,5
ELS-COMB082	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	VS1-B	1

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
ELS-COMB083	VP1-B	0,6
	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	VS1-B	1
ELS-COMB084	VP1-B	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
ELS-COMB085	Peso propio	1
	VS1-S	1
	T Max	0,6
ELS-COMB086	CM	1
	Peso propio	1
	VS1-S	1
	T Min	0,6
ELS-COMB087	CM	1
	Peso propio	1
	VS1-S	1
ELS-COMB088	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB089	VS1-S	1
	VP1-S	0,6
	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB090	VS2-B	1
	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB091	VS2-B	1
	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
ELS-COMB092	Peso propio	1
	VS2-B	1
	VP2-B	0,6
	T Max	0,6
ELS-COMB093	CM	1
	Peso propio	1
	VS2-B	1
	VP2-B	0,6
	SNOW	0,5
ELS-COMB094	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	VS2-S	1
ELS-COMB095	T Max	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	VS2-S	1
ELS-COMB096	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	VS2-S	1
ELS-COMB097	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB098	VS2-S	1
	VP2-S	0,6
	SNOW	0,5
	T Min	0,6
	CM	1
ELS-COMB099	CM	1
	Peso propio	1
	SNOW	1
	VP1-B	0,6
ELS-COMB100	CM	1
	Peso propio	1
	SNOW	1
	VS1-B	0,6
ELS-COMB101	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SNOW	1

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	VP1-B	0,6
	VS1-B	0,6
	T Min	0,6
ELS-COMB102	CM	1
	Peso propio	1
	SNOW	1
ELS-COMB103	VP1-S	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SNOW	1
ELS-COMB104	VS1-S	0,6
	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB105	SNOW	1
	VP1-S	0,6
	VS1-S	0,6
	T Min	0,6
ELS-COMB106	CM	1
	Peso propio	1
	SNOW	1
	VP2-B	0,6
ELS-COMB107	CM	1
	Peso propio	1
	SNOW	1
	VP2-B	0,6
ELS-COMB108	VS2-B	0,6
	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB109	SNOW	1
	VP2-S	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB110	VS2-S	0,6
	T Min	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	SNOW	1
	VP2-S	0,6

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	VS2-S	0,6
	T Min	0,6
ELS-COMB111	CM	1
	Peso propio	1
	SNOW	1
	T Min	0,6
ELS-COMB112	CM	1
	Peso propio	1
	T Min	1
ELS-COMB113	CM	1
	Peso propio	1
	T Min	1
	VP1-B	0,6
ELS-COMB114	CM	1
	Peso propio	1
	T Min	1
ELS-COMB115	VS1-B	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB116	T Min	1
	VP1-B	0,6
	SNOW	0,5
	VS1-B	0,6
	CM	1
ELS-COMB117	CM	1
	Peso propio	1
	T Min	1
	VP1-S	0,6
ELS-COMB118	CM	1
	Peso propio	1
	T Min	1
ELS-COMB119	VS1-S	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB120	T Min	1
	VP1-S	0,6
	SNOW	0,5
	CM	1

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	VS1-S	0,6
ELS-COMB121	CM	1
	Peso propio	1
	T Min	1
	VP2-B	0,6
ELS-COMB122	CM	1
	Peso propio	1
	T Min	1
ELS-COMB123	VS2-B	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	T Min	1
ELS-COMB124	VP2-B	0,6
	SNOW	0,5
	VS2-B	0,6
	CM	1
ELS-COMB125	Peso propio	1
	T Min	1
	VP2-S	0,6
ELS-COMB126	CM	1
	Peso propio	1
	T Min	1
	VS2-S	0,6
ELS-COMB127	CM	1
	Peso propio	1
	T Min	1
	VP2-S	0,6
ELS-COMB128	SNOW	0,5
	VS2-S	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB129	T Max	1
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB130	T Max	1
	CM	1
	VP1-B	0,6

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
ELS-COMB131	CM	1
	Peso propio	1
	T Max	1
	VS1-B	0,6
ELS-COMB132	CM	1
	Peso propio	1
	T Max	1
	VP1-B	0,6
ELS-COMB133	VS1-B	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	T Max	1
ELS-COMB134	VP1-S	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	T Max	1
ELS-COMB135	VS1-S	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
	T Max	1
ELS-COMB136	VP2-B	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB137	VP2-B	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB138	T Max	1
	VP2-B	0,6
	VS2-B	0,6
	CM	1
ELS-COMB139	CM	1
	Peso propio	1
	T Max	1
ELS-COMB140	VP2-S	0,6
	CM	1
	Peso propio	1
ELS-COMB141	T Max	1
	CM	1
	Peso propio	1

Combinación	Caso de carga	Coeficiente
	VP2-S	0,6
	VS2-S	0,6

ANEJO 07. DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL

DENOMINACIÓN	TITULACIÓN	MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
	PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).	
	CENTRO EDUCATIVO	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.

ÍNDICE	
1. OBJETIVOS DEL ANEJO	5
2. ANATOMÍA DE LA MADERA	5
3. DIMENSIONAMIENTO DOMO 1	6
3.1. FACTORES DE CORRECCIÓN DE LA RESISTENCIA	6
3.2. FACTORES QUE AFECTAN AL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA MADERA	7
3.3. VALOR DE CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL Y DE LAS UNIONES	7
3.4. PROPIEDADES DE CÁLCULO DEL MATERIAL	8
3.5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL. PRINCIPIOS GENERALES.	9
3.6. ESTADO LÍMITE ÚLTIMOS	10
3.6.1. PRINCIPIOS GENERALES	10
3.6.2. COMPROBACIÓN A TRACCIÓN UNIFORME PARALELA A LA FIBRA	10
3.6.3. COMPROBACIÓN A TRACCIÓN UNIFORME PERPENDICULAR A LA FIBRA	11
3.6.4. COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN UNIFORME PARALELA A LA FIBRA	11
3.6.5. COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN UNIFORME PERPENDICULAR A LA FIBRA	11
3.6.6. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN SIMPLE	13
3.6.7. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN ESVIADA	14
3.6.8. COMPROBACIÓN A CORTANTE	15
3.6.9. COMPROBACIÓN A TORSIÓN	16
3.6.10. COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN INCLINADA RESPECTO A LA FIBRA	16
3.6.11. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN Y TRACCIÓN AXIAL COMBINADAS	17
3.6.12. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN AXIAL COMBINADAS	18
3.6.13. COMPROBACIÓN DE ESTABILIDAD LOCAL DE PIEZAS	18
3.6.14. COMPROBACIÓN DE ESTABILIDAD GLOBAL DE PIEZAS	25
3.7. ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO. DEFORMACIÓN DIFERIDA.	25
3.8. DIMENSIONAMIENTO CIMENTACIÓN – DOMO 1	27
4. DIMENSIONAMIENTO DOMO 2	28
4.1. PROPIEDADES DE CÁLCULO DEL MATERIAL	28
4.2. ESTADO LÍMITE ÚLTIMOS	29
4.2.1. PRINCIPIOS GENERALES	29
4.2.2. COMPROBACIÓN A TRACCIÓN UNIFORME PARALELA A LA FIBRA	30
4.2.3. COMPROBACIÓN A TRACCIÓN UNIFORME PERPENDICULAR A LA FIBRA	30
4.2.4. COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN UNIFORME PARALELA A LA FIBRA	30
4.2.5. COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN UNIFORME PERPENDICULAR A LA FIBRA	31
4.2.6. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN SIMPLE	32
4.2.7. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN ESVIADA	32
4.2.8. COMPROBACIÓN A CORTANTE	33
4.2.9. COMPROBACIÓN A TORSIÓN	34
4.2.10. COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN INCLINADA RESPECTO A LA FIBRA	34
4.2.11. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN Y TRACCIÓN AXIAL COMBINADAS	35
4.2.12. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN AXIAL COMBINADAS	35
4.2.13. COMPROBACIÓN DE ESTABILIDAD LOCAL DE PIEZAS	36
4.2.14. COMPROBACIÓN DE ESTABILIDAD GLOBAL DE PIEZAS	42
4.3. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO. DEFORMACIÓN DIFERIDA	42
4.4. DIMENSIONAMIENTO CIMENTACIÓN DOMO 2	44
5. DIMENSIONAMIENTO DOMO 3	45
5.1. PROPIEDADES DE CÁLCULO DEL MATERIAL	45
5.2. ESTADO LÍMITE ÚLTIMOS	46
5.2.1. PRINCIPIOS GENERALES	46
5.2.2. COMPROBACIÓN A TRACCIÓN UNIFORME PARALELA A LA FIBRA	47
5.2.3. COMPROBACIÓN A TRACCIÓN UNIFORME PERPENDICULAR A LA FIBRA	47
5.2.4. COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN UNIFORME PARALELA A LA FIBRA	47
5.2.5. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN SIMPLE	48
5.2.6. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN ESVIADA	48
5.2.7. COMPROBACIÓN A CORTANTE	49
5.2.8. COMPROBACIÓN A TORSIÓN	50
5.2.9. COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN INCLINADA RESPECTO A LA FIBRA	50
5.2.10. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN Y TRACCIÓN AXIAL COMBINADAS	51
5.2.11. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN AXIAL COMBINADAS	51
5.2.12. COMPROBACIÓN DE ESTABILIDAD LOCAL DE PIEZAS	52
5.2.13. COMPROBACIÓN DE ESTABILIDAD GLOBAL DE PIEZAS	55
5.3. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO. DEFORMACIÓN DIFERIDA	56
5.4. DIMENSIONAMIENTO CIMENTACIÓN DOMO 3	57
ANEXO 1: COMPROBACIONES DE DIMENSIONAMIENTO DE CIMENTACIÓN – DOMO 1	59
ANEXO 2: COMPROBACIONES DE DIMENSIONAMIENTO DE CIMENTACIÓN – DOMO 2	60
ANEXO 3: COMPROBACIONES DE DIMENSIONAMIENTO DE CIMENTACIÓN – DOMO 3	61

Listado de ilustraciones

Ilustración 1. Ejes y dirección de la fibra en la pieza.....	10
Ilustración 2. Elementos barra sometidos a compresión perpendicular a la fibra. Domo 1.....	12
Ilustración 3. Caso de compresión normal a la fibra.	12
Ilustración 4. Descomposición del axil, componente vertical y horizontal.	13
Ilustración 5. Esfuerzos de flexión esviada.	14
Ilustración 6. Fallo por cortante.	15
Ilustración 7. Tensiones de cortadura.....	15
Ilustración 8. Barra más solicitada a cortante (color amarillo).	16
Ilustración 9. Ejes principales de la pieza comprimida, solicitada a compresión.....	19
Ilustración 10. Barras con comprobación a pandeo local.....	20
Ilustración 11. Barra con comprobación a pandeo local.	20
Ilustración 12. Deformación común en terreno y cimiento – Hipótesis de cálculo empleada por el software Cypecad.	27
Ilustración 13. Ilustración del modelo de la cimentación en CYPECAD - Domo 1.	27
Ilustración 14. Ejes y dirección de la fibra en la pieza.	29
Ilustración 15. Descomposición del axil, componente vertical y horizontal – Domo 2.	31
Ilustración 16. Esfuerzos de flexión esviada.	32
Ilustración 17. Fallo por cortante.	33
Ilustración 18. Tensiones de cortadura.....	33
Ilustración 19. Ejes principales de la pieza comprimida, solicitada a compresión.....	37
Ilustración 20. Barras con comprobación a pandeo local – Domo 2.	38
Ilustración 21. Barra con comprobación a pandeo local – Domo 2.	38
Ilustración 22. Ilustración del modelo de la cimentación en CYPECAD - Domo 2.	44
Ilustración 23. Ejes y dirección de la fibra en la pieza.	46
Ilustración 24. Esfuerzos de flexión esviada.	48
Ilustración 25. Fallo por cortante.	49
Ilustración 26. Tensiones de cortadura.....	49
Ilustración 27. Ejes principales de la pieza comprimida, solicitada a compresión.....	53
Ilustración 28. Barras con comprobación a pandeo local – barra 12-020 – Domo 3.....	54
Ilustración 29. Ilustración del modelo de la cimentación en CYPECAD - Domo 3.	57

Listado de Tablas

Tabla 1. Clases de duración de carga.	7
Tabla 2. Coeficientes parciales de seguridad γ_M	8
Tabla 3. Factor de modificación k_{mod}	8
Tabla 4. Propiedades características del material – Domo 1.....	9
Tabla 5. Resumen de parámetros y datos geométricos – Domo 1.....	9
Tabla 6. Comprobación de resistencia tracción uniforme paralela – Domo 1.	11
Tabla 7. Comprobación compresión uniforme paralela - Domo 1.	11
Tabla 8. Comprobación de compresión perpendicular a la fibra en Domo 1.	12
Tabla 9. Comprobación de compresión perpendicular - Domo 1.	13
Tabla 10. Comprobación a flexión simple en las dos direcciones principales. Domo 1.....	14
Tabla 11. Comprobación a flexión esviada. Domo 1.	14
Tabla 12. Comprobación a cortante de los elementos del domo 1.	16
Tabla 13. Comprobación a cortante de los elementos de la puerta. Domo 1.	16
Tabla 14. Comprobación a compresión inclinada. Domo 1.....	17
Tabla 15. Comprobación a tracción y flexión esviada – Domo 1.	18
Tabla 16. Comprobaciones de axil de compresión y flexión esviada. Domo 1.	18
Tabla 17. Barras a comprobar su estabilidad local.	20
Tabla 18. Esbelteces mecánicas y relativas en barra 12-063- Domo 1.	21
Tabla 19. Comprobación de la estabilidad local en compresión simple Barra 12-063. Domo 1.	21
Tabla 20. Comprobación de la estabilidad local en flexocompresión Barra 12-063. Domo 1.....	21
Tabla 21. Esbelteces mecánicas y relativas en barra 12-027- Domo 1.	22
Tabla 22. Comprobación de la estabilidad local en compresión simple Barra 12-027. Domo 1.	22
Tabla 23. Comprobación de la estabilidad local en flexocompresión Barra 12-027. Domo 1.....	22
Tabla 24. Esbelteces mecánicas y relativas en barra 12-062 - Domo 1.	23
Tabla 25. Comprobación de la estabilidad local en compresión simple Barra 12-062. Domo 1.	23
Tabla 26. Comprobación de la estabilidad local en flexocompresión Barra 12-062. Domo 1.....	23
Tabla 27. Esbelteces mecánicas y relativas en barra 12-055 - Domo 1.	24
Tabla 28. Comprobación de la estabilidad local en compresión simple Barra 12-055. Domo 1.	24
Tabla 29. Comprobación de la estabilidad local en flexocompresión Barra 12-055. Domo 1.....	24
Tabla 30. Casos Buckling más desfavorables para la inestabilidad global – Domo 1.	25
Tabla 31. Comprobación de deformaciones en U1 - Domo 1.....	26
Tabla 32. Comprobación de deformaciones en U2 - Domo 1.....	26
Tabla 33. Comprobación de deformaciones en U3 - Domo 1.....	26
Tabla 34. Propiedades características del material – Domo 2.....	29
Tabla 35. Resumen de parámetros y datos geométricos – Domo 2.....	29
Tabla 36. Comprobación de resistencia tracción uniforme paralela – Domo 2.	30
Tabla 37. Comprobación compresión uniforme paralela - Domo 2.	31
Tabla 38. Comprobación de compresión perpendicular - Domo 2.....	32
Tabla 39. Comprobación a flexión simple en las dos direcciones principales. Domo 2.....	32
Tabla 40. Comprobación a flexión esviada. Domo 2.....	33
Tabla 41. Comprobación a cortante de los elementos del domo 2.....	34
Tabla 42. Comprobación a compresión inclinada. Domo 2.....	35
Tabla 43. Comprobación a tracción y flexión esviada – Domo 2.	35
Tabla 44. Comprobaciones de axil de compresión y flexión esviada. Domo 2.	36
Tabla 45. Barras a comprobar su estabilidad local – Domo 2.....	38
Tabla 46. Esbelteces mecánicas y relativas en barra 12-016- Domo 2.	39
Tabla 47. Comprobación de la estabilidad local en compresión simple Barra 12-016. Domo 2.	39
Tabla 48. Comprobación de la estabilidad local en flexocompresión Barra 12-016. Domo 2.....	39
Tabla 49. Esbelteces mecánicas y relativas en barra 12-030- Domo 2.	40
Tabla 50. Comprobación de la estabilidad local en compresión simple Barra 12-030. Domo 2.	40
Tabla 51. Comprobación de la estabilidad local en flexocompresión Barra 12-030. Domo 2.....	40
Tabla 52. Esbelteces mecánicas y relativas en barra 12-032- Domo 2.	41
Tabla 53. Comprobación de la estabilidad local en compresión simple Barra 12-032. Domo 2.	41

Tabla 54. Comprobación de la estabilidad local en flexocompresión Barra 12-032. Domo 2.	41
Tabla 55. Casos Buckling más desfavorables para la inestabilidad global – Domo 2.	42
Tabla 56. Comprobación de deformaciones en U1 - Domo 2.	43
Tabla 57. Comprobación de deformaciones en U2 - Domo 2.	43
Tabla 58. Comprobación de deformaciones en U3 - Domo 2.	43
Tabla 59. Propiedades características del material – Domo 3.	46
Tabla 60. Resumen de parámetros y datos geométricos – Domo 3.	46
Tabla 61. Comprobación de resistencia tracción uniforme paralela – Domo 3.	47
Tabla 62. Comprobación compresión uniforme paralela - Domo 3.	48
Tabla 63. Comprobación a flexión simple en las dos direcciones principales. Domo 3.	48
Tabla 64. Comprobación a flexión esviada. Domo 3.	49
Tabla 65. Comprobación a cortante de los elementos del Domo 3.	50
Tabla 66. Comprobación a compresión inclinada. Domo 3.	51
Tabla 67. Comprobación a tracción y flexión esviada – Domo 3.	51
Tabla 68. Comprobaciones de axil de compresión y flexión esviada. Domo 3.	52
Tabla 69. Barras a comprobar su estabilidad local – Domo 3.	54
Tabla 70. Esbelteces mecánicas y relativas en barra 12-020- Domo 3.	54
Tabla 71. Comprobación de la estabilidad local en compresión simple Barra 12-020. Domo 3.	54
Tabla 72. Comprobación de la estabilidad local en flexocompresión Barra 12-020. Domo 3.	55
Tabla 73. Casos Buckling más desfavorables para la inestabilidad global – Domo 3.	56
Tabla 74. Comprobación de deformaciones en U1 - Domo 3.	57
Tabla 75. Comprobación de deformaciones en U2 - Domo 3.	57
Tabla 76. Comprobación de deformaciones en U3 - Domo 3.	57

1. OBJETIVOS DEL ANEJO

El presente anejo tiene como objeto la verificación de seguridad de los elementos estructurales de madera del presente proyecto en concordancia con las bases de cálculo aplicadas.

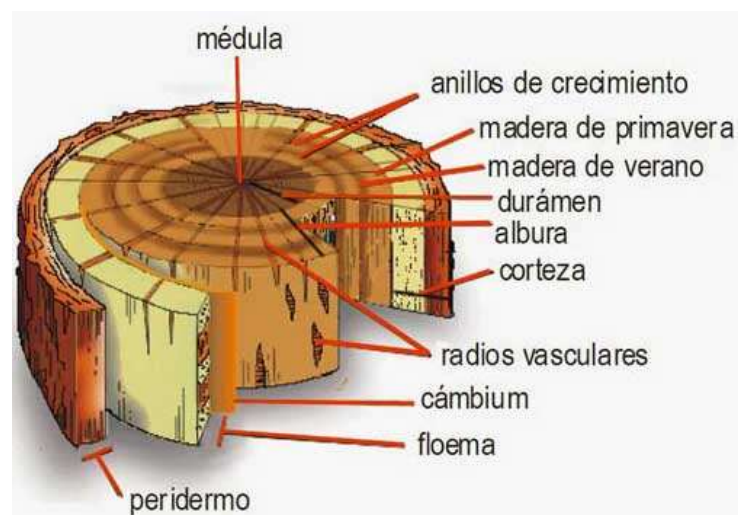
El dimensionamiento de la estructura se hará siguiendo los criterios del Código Técnico de la Edificación – Seguridad Estructural Madera.

2. ANATOMÍA DE LA MADERA

Con el objeto poner en conocimiento el comportamiento de la madera como material estructural, se pretende exponer a continuación una serie de parámetros, los cuales, son determinantes en cuanto a su resistencia. El conocimiento sobre la naturaleza de la madera, características y comportamiento es necesario para establecer los parámetros que regirán las bases de cálculo.

El hecho fundamental que caracteriza el comportamiento de la madera es que es un material natural de estructura compleja y de carácter anisótropo, que forma parte del tejido leñoso de los árboles, a diferencia de materiales como el hormigón o el acero.

Para entender su comportamiento se ha de entender las partes que conforman la madera como material natural.



- **Corteza o peridermo:** Constituye la parte más externa, formada por materia muerta de textura resquebrajada, debido a que el tronco sigue aumentando de espesor, mientras que la corteza no.

- **Floema:** su función es la conducción de la savia elaborada, es una capa delgada de apariencia similar a la corteza, pero más blanda.
- **Cámbium:** a simple vista no se puede apreciar, pero esta capa constituye la posición de las células reproductoras vegetales, formando xilema hacia el interior y floema hacia el exterior.
- **Xilema o leño:** es la capa más interna, normalmente gruesa, en relación con las demás capas, cuyas funciones son la resistencia y soporte del propio árbol y la conducción de la savia sin elaborar. Por tanto, en la Xilema se albergan las funciones estructurales, en ella se encuentran los siguientes elementos:
 - **Anillos de crecimiento:** la heterogeneidad de la madera se manifiesta sobre todo en cómo se desarrollan los anillos de crecimiento. Pues según la estación del año la madera producida por el crecimiento tiene diferentes características. Esto se aprecia claramente por la alternancia de madera más clara y madera más oscura, producida respectivamente en los períodos más y menos propicios para el desarrollo de la planta.

Las células de madera formadas en primavera y verano constituyen la madera denominada temprana, son espaciosas, de paredes finas y color claro. Mientras que las células que nacen a finales de verano y en otoño constituyen la madera denominada tardía, que son de paredes reducidas, más densas y de color oscuro, ya que a medida que transcurre la estación van disminuyendo las necesidades vitales del árbol respecto de las estaciones más propicias para su crecimiento como en primavera o épocas de lluvias. Las zonas de madera tardía son más estrechas que las de madera temprana.

A medida que se produce el crecimiento del árbol, los anillos se comprimen hacia el interior formando nuevos anillos. Estas capas no serán iguales tampoco en todos los años, debido a las variaciones de las condiciones climáticas, siendo más anchos en años lluviosos y más estrechos en épocas más secas, esto es propio en zonas como España o países de alrededor.

Son características de cada especie la apariencia de los anillos, en anchura y regularidad. Estas especies se clasifican en dos grandes grupos: coníferas y latifoliadas o frondosas. En las primeras, los anillos de crecimiento se diferencian perfectamente por tener variaciones climáticas en cada época del año, mientras que las segundas no son tan apreciables.

La textura de la madera es la relación entre la anchura de la madera tardía respecto del total, este valor se relaciona con la resistencia de la madera. Las coníferas forman la madera tardía de manera más o menos constante.

- *Albura y duramen.* La albura son los anillos de crecimiento más jóvenes, encontrándose en a la porción más exterior del tronco, justo bajo la corteza. Es un tejido de almacenamiento y conducción de la savia desde las raíces hasta la copa del árbol, siendo más susceptible al ataque de insectos. No obstante, con el paso del tiempo, la albura se modifica químicamente y se transforma en duramen, con una coloración más oscura de mayor densidad, mayor resistencia mecánica y mayor durabilidad natural.

Una propiedad muy relacionada con el comportamiento estructural es la disposición de la fibra, la mayoría de especies presentan células fibrosas orientadas según el eje axial, pero en algunos casos la fibra presenta ligeras inclinaciones respecto del eje, o incluso existe la alternancia entre inclinación de izquierda y derecha. Esto es muy variable según la especie, pues esta diferencia solo se puede hacer de forma aproximada pues existen alrededor de 50.000 especies distintas y unas 5.000 especies comerciales.

A continuación, se exponen las principales características de los dos grandes grupos de especies: **coníferas y latifoliadas.**

- Coníferas.

La madera conífera es más ligera que la latifoliada, presenta un comportamiento flexible, resistente y estable dimensionalmente. Esta especie presentan troncos rectos, cónicos hasta su ápice y revestido de ramas. La estructura celular es relativamente simple, se compone de fibras largas, uniformes a lo largo de su eje axial, y esto le confiere un elevado índice resistencia-peso. Este tipo de células resistentes se denominan traqueidas, y constituyen el 90% de las células en las coníferas, sus funciones son las de sostenimiento del árbol y conducción de la savia. La porción restante de células se divide entre células parénquima, cuya función es la de almacenamiento y las células de los canales resiníferos, su función es la de defensa y protección contra agentes patógenos, como su sistema inmunológico.

- Latifoliadas.

Las especies latifoliadas o frondosas presentan una copa bien ramificada y un tronco que varía en dimensiones y forma. Su estructura celular es más compleja, ya que existe una mayor especialización de las células. Las funciones conductoras las realizan las células de tubo o vaso y las de sostenimiento las células de fibra. La variabilidad de la composición de las frondosas es muy amplia.

Composición de la pared celular

La sustancia elemental que constituye la pared celular en la madera es la celulosa, y entre las capas de esta hay capas intermedias de lignina, que constituyen la pared intercelular. La celulosa confiere la capacidad de resistencia y tenacidad. Por el contrario, la lignina es un material bastante inerte, existiendo escasos organismos que se alimenten de ello, lo que esto le proporciona una gran durabilidad a la madera.

En las paredes de las células se pueden distinguir distintas capas. Una primera capa, de espesor muy pequeño, una segunda capa predominante mucho más gruesa y una tercera capa de tamaño reducido. Las fibras tienen sección hueca lo que le permite además de la conducción de sustancias, la disminución del peso lo que le confiere una alta eficiencia estructural.

En la pared secundaria, la capa dominante, debido a su espesor y a que sus fibras están totalmente orientadas en dirección del eje longitudinal, tiene una gran capacidad de resistir esfuerzos de tracción. Si el esfuerzo es de compresión las microfibras de la segunda capa trabajan como columnas comprimidas que son ayudadas por las capas primera y tercera que actúan como zunchado evitando el pandeo de éstas.

3. DIMENSIONAMIENTO DOMO 1

3.1. FACTORES DE CORRECCIÓN DE LA RESISTENCIA

Dado que se prevé que las piezas sean inferiores en su canto en flexión a 150 mm se debe de aplicar un factor de la corrección de la altura k_h , que servirá para corregir los valores característicos de resistencia a flexión y a tracción paralela a la fibra principal. Y como sección de resistente se tomará la sección 90x90 mm, por tanto, el valor del factor de altura a utilizar será el siguiente:

$$k_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2} < 1,3$$

Sustituyendo el valor de h, el canto de la pieza en flexión (90 mm):

$$k_h = \left(\frac{150}{90}\right)^{0,2} = 1,108 < 1,3$$

Se podrá incrementar en un 10,8% los valores de resistencia característica a flexión y tracción paralela.

Este factor se aplica debido a que el tamaño de la pieza afecta a la resistencia de la madera pues cuanto mayor es la sección de la madera menor resulta la tensión de rotura. Esto se explica dado que la existencia de defecto en una pieza de madera es la que inicia el fallo o colapso, por tanto, en piezas de mayor tamaño se incrementa la probabilidad de la existencia de este defecto, en comparación piezas más pequeñas.

Existe un segundo factor de corrección de la resistencia, denominado factor de carga compartida K_{sys} , que considera que un conjunto de elementos transversalmente conectados a través de un sistema de distribución continuo de carga puede incrementar la rigidez de la estructura. Sin embargo, este coeficiente no se va a aplicar debido a que es para estructuras de madera que trabajan predominantemente a flexión, y la cúpula geodésica trabaja fundamentalmente a axil.

3.2. FACTORES QUE AFECTAN AL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE LA MADERA

EL CTE establece que las acciones que solicitan a la estructura deben asignarse según la clase de duración de la carga, tal y como se expresa en la siguiente tabla:

Clase de duración	Duración aproximada acumulada de la acción en valor característico	Acción
Permanente	Más de 10 años	Permanente, peso propio
Larga	De 6 meses a 10 años	Apeos o estructuras provisionales no itinerantes
Media	De una semana a 6 meses	Sobrecarga de uso; nieve
Corta	Menos de una semana	Viento; nieve
Instantánea	Algunos segundos	Sismo

Tabla 1. Clases de duración de carga.

Por otro lado, el CTE establece clase de servicio de la estructura, en función de la temperatura y la humedad a la que va a estar expuesta durante su vida útil, esto se debe a que la humedad de la madera afecta de manera significativa al comportamiento mecánico del material.

En función de las condiciones ambientales previstas, se establecen las siguientes clases de servicio:

- Clase de servicio 1: Se caracteriza por un contenido de humedad en la madera correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 65% en unas pocas semanas al año.
 - La humedad de equilibrio higroscópico media en la mayoría de las coníferas no excede el 12%. En esta clase se encuentra, en general, las estructuras de madera expuestas a un ambiente interior.
- Clase de servicio 2: Se caracteriza por un contenido de humedad en la madera correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 85% unas pocas semanas al año.
 - La humedad de equilibrio higroscópico media en la mayoría de las coníferas no excede el 20%. En esta clase se encuentran, en general, las estructuras de madera a cubierto, pero abiertas y expuestas al ambiente exterior, como es el caso de cobertizos y viseras. Las piscinas cubiertas, debido a su ambiente húmedo, encajan también en esta clase de servicio.
- Clase de servicio 3: Condiciones ambientales que conduzcan a contenido de humedad superior al de la clase de servicio 2.
 - La humedad de equilibrio higroscópico media en la mayoría de las coníferas excede el 20%. En esta clase se encuentran, en general, las estructuras de madera expuestas a un ambiente exterior sin cubrir.

En nuestro caso se determina que la clase que se adapta a las obras proyectadas es la **clase de servicio 2**, ya que la estructura tiene cobertura, según se indica en el Anejo N°4 "Diseño Arquitectónico".

3.3. VALOR DE CÁLCULO DE LAS PROPIEDADES DEL MATERIAL Y DE LAS UNIONES

El valor de cálculo de las propiedades del material del material se define como:

$$X_d = K_{mod} \cdot \left(\frac{X_k}{\gamma_M} \right)$$

Siendo:

X_k valor característico de la propiedad del material

γ_M coeficiente parcial de seguridad para la propiedad del material

K_{mod} factor de modificación, teniendo en cuenta la clase de duración de la combinación de carga y la clase de servicio

En la siguiente tabla se definen los coeficientes parciales de seguridad para el material, γ_M . Siendo en nuestro caso aplicable un coeficiente de seguridad de valor 1,30 correspondiente a la madera maciza.

Situaciones persistentes y transitorias

Madera maciza	1,30
Madera laminada encolada	1,25
Madera micro laminada, tablero contrachapado, tablero de virutas orientadas	1,20
Tablero de partículas y tableros de fibras	1,30
Uniones	1,30
Placas clavo	1,25
Situaciones extraordinarias	1,0

Tabla 2. Coeficientes parciales de seguridad γ_M

De manera análoga, se define el valor de la capacidad de carga de cálculo referida a una unión o un sistema estructural, R_d , según la expresión:

$$R_d = K_{mod} \cdot \left(\frac{R_k}{\gamma_M} \right)$$

Seguidamente, los valores del factor de modificación K_{mod} se exponen en la siguiente tabla para la madera maciza:

Material	Norma	Clase de servicio	Clase de duración de la carga				
			Permanente	Larga	Media	Corta	Instantánea
Madera maciza	UNE-EN 14081-1:2016	1	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		2	0,60	0,70	0,80	0,90	1,10
		3	0,50	0,55	0,65	0,70	0,90

Tabla 3. Factor de modificación K_{mod}

En los casos de combinación de acciones donde se incluyan acciones pertenecientes a clase de duración diferentes, el factor k_{mod} que debe elegirse será al correspondiente a la acción de más corta duración.

3.4. PROPIEDADES DE CÁLCULO DEL MATERIAL

Como material se empleará madera conífera aserrada de clase resistente C24 con una sección de 9 x 9 cm, por su uso común como material de construcción y su facilidad de encontrarla en el mercado. Las propiedades características de este material se listan en la siguiente tabla. La resistencia característica a flexión y tracción paralela se le ha aplicado el factor de corrección de la altura.

Resistencia característica		(N/mm ²)
Flexión	$f_{m,k}$	26,58
Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	15,51
Tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,40
Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	22
Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,50
Cortante	$f_{v,k}$	4

Rigidez			kN/mm²
Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	11	
Módulo de elasticidad paralelo percentil 5%	$E_{0,k}$	7,40	
Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,medio}$	0,37	
Módulo transversal medio	G_{medio}	0,69	
Densidad			Kg/m³
Densidad característica	ρ_k	350	
Densidad media	ρ_{medio}	420	

Tabla 4. Propiedades características del material – Domo 1.

A continuación, se incluye una tabla resumen con los valores geométricos de la sección y el resumen de sus factores de corrección:

Descripción	Dato
Tipo de madera	C24
Clase de servicio	2
Canto (mm)	90
Ancho (mm)	90

Descripción	Dato
Área (mm ²)	8100
Factor de corrección de la altura K_h	1,108
K_{mod} Permanente (PP+CM)	0,60
K_{mod} Media (SCU)	0,80
K_{mod} Corta (VP, VS, T _{max} , T _{min} , Nieve)	0,90
γ_M	1,30

Tabla 5. Resumen de parámetros y datos geométricos – Domo 1.

3.5. ANÁLISIS ESTRUCTURAL. PRINCIPIOS GENERALES.

En las comprobaciones de estado límite de servicio y estado límite último en régimen lineal (sin analizar la estabilidad global o local) relativo al dimensionado de situaciones transitorias o permanentes se consideran los siguientes valores de cálculo de elasticidad longitudinal E_d y elasticidad transversal G_d :

- $E_d = E_{medio} = 11 \text{ kN/mm}^2$
- $G_d = G_{medio} = 0,69 \text{ kN/m}^2$

Para las comprobaciones de estado límite último relativas a estabilidad o en general a comprobaciones realizadas en segundo orden se tomarán los siguientes valores de elasticidad:

- $E_d = E_k = 7,40 \text{ kN/m}^2$

Por otro lado, la sección eficaz de la barra se considera la deducida de las dimensiones nominales de la sección, puesto que no se considerará reducciones del área transversal las originadas por: clavos con diámetro inferior a 6mm introducidos sin pretaladro, agujeros simétricamente dispuestos para pernos, pasadores, tirafondos, que son los casos en los que nos encontramos en este dimensionamiento. En los casos donde se empleen tirafondos con diámetros mayores a 6 mm el área eficaz será la deducida del área nominal menos el área que ocupa el elemento de fijación mecánico.

La estructura del domo está formada por un sistema de barras articuladas, que según el CTE DB SEM se considera los siguientes modelos:

- Comportamiento de las barras:
 - o Análisis en primer orden, considerando que la madera es un material homogéneo e isotrópico, tomando como parámetro básico del material el módulo de deformación, $E_{0,k}$, longitudinal, según la dirección de la fibra. La verificación de la estabilidad se realiza a través del método de la longitud de pandeo equivalente.
 - o Análisis en primer orden similar al anterior salvo en la verificación de la estabilidad, que se realiza mediante un análisis en segundo orden.
- Uniones de apoyo y empalme
 - o En el caso de uniones articuladas se considerará que en la unión no hay deslizamiento alguno:
 - En el caso de uniones en las que se pretenda conseguir un empotramiento se considerará la rigidez eficaz de la unión en función del deslizamiento de las uniones. La mayoría de las uniones rígidas con clavijas son a lo sumo semiempotramientos, y en muchos casos llegan a comportarse casi como articulaciones.

3.6. ESTADO LÍMITE ÚLTIMOS

3.6.1. PRINCIPIOS GENERALES

Se supone que las tensiones se orientan solamente según sus tres ejes principales según la siguiente figura:

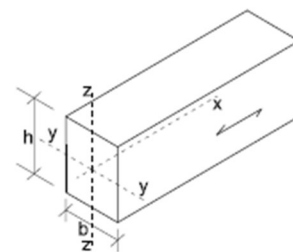


Ilustración 1. Ejes y dirección de la fibra en la pieza.

Para el análisis estructural se han debido de orientar todos los ejes locales de las barras de la estructura con respecto al centro del domo. Por hacer la equivalencia con el modelo de SAP2000, el eje local de la barra "x" se corresponde con el eje 1 local del programa, el eje "z" se corresponde con el eje 2, y el eje "y" con el eje local 3. La orientación de los ejes locales ha consistido en girar los ejes de tal forma que el eje z sea perpendicular a una línea recta que pase por el centro de gravedad de la pieza y el centro del domo geodésico en su origen de coordenadas (0, 0, 0). De esta manera, conseguimos orientar el canto de la pieza hacia el centro de la esfera, quedando orientado el eje 2 de SAP2000 hacia el centro de la esfera.

3.6.2. COMPROBACIÓN A TRACCIÓN UNIFORME PARALELA A LA FIBRA

Debe de cumplirse la siguiente condición:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d}$$

siendo:

$\sigma_{t,0,d}$ tensión de cálculo a tracción paralela a la fibra;

$f_{t,0,d}$ resistencia de cálculo a tracción paralela a la fibra.

La máxima tensión de cálculo a tracción paralela se da bajo la combinación de acciones donde actúa el viento de succión como carga dominante. Esta carga se considera de corta duración y por tanto se aplica un valor de K_{mod} de 0,90 para minorar la resistencia.

La tensión de tracción máxima se halla mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{t,0,d} = \left(\frac{N_d}{A_n} \right)$$

Suponiendo que las tensiones se reparten uniformemente en la superficie neta de la sección transversal de la pieza.

La resistencia de cálculo a tracción paralela a la fibra se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$f_{t,0,d} = K_{mod} \cdot \left(\frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} \right)$$

A continuación, se exponen los datos de la comprobación:

Comprobación Tracción Uniforme paralela a la fibra			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a tracción de cálculo			
Resistencia característica a Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	15,51	MPa

Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,90	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo a tracción paralela	$f_{t,0,d}$	10,73	MPa
Tensión a tracción de cálculo			
Axil a tracción máximo	N_d	10,13	kN
Área neta	A_n	8100,00	mm ²
Tensión de cálculo tracción paralela	$\sigma_{t,0,d}$	1,25	MPa
Comprobación de resistencia			
Comprobación			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			12%

Tabla 6. Comprobación de resistencia tracción uniforme paralela – Domo 1.

La sección cumple con los esfuerzos de tracción actuantes.

3.6.3. COMPROBACIÓN A TRACCIÓN UNIFORME PERPENDICULAR A LA FIBRA

Este esfuerzo generalmente suele presentarse en zonas puntuales normalmente en las uniones, donde existe una componente normal de tracción perpendicular a la fibra, que suele desencadenar en la aparición de grietas o separación entre haces de fibras.

La resistencia a tracción uniforme perpendicular a la fibra en la madera es muy pequeña, del orden de 0,40 MPa de resistencia característica, por lo que debe de evitarse que se presente en todo momento.

Dado que la estructura se trata de una estructura triangulada con configuración esférica donde los esfuerzos axiales son mucho más significativos que el resto de esfuerzos, no aparece en ningún caso en ninguna de las uniones esfuerzos de tracción relevantes con componente normal a la fibra. Por lo que esta comprobación se da por cumplida al no existir tales tensiones.

3.6.4. COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN UNIFORME PARALELA A LA FIBRA

La comprobación de compresión paralela a la fibra debe de cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d}$$

siendo:

$\sigma_{c,0,d}$ tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra;

$f_{c,0,d}$ resistencia de cálculo a compresión paralela a la fibra.

Al igual que en el caso de tracción, se supone que la compresión se reparte uniformemente en la superficie neta de la sección transversal de la pieza. Aunque en piezas comprimidas existe la posibilidad de inestabilidad o pandeo, pero esto se estudiará más adelante.

Por lo que, la tensión máxima a compresión se halla mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{c,0,d} = \left(\frac{N_d}{A_n} \right)$$

La resistencia de cálculo a compresión paralela a la fibra se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$f_{c,0,d} = K_{mod} \cdot \left(\frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} \right)$$

A continuación, se muestran los resultados de la comprobación:

Comprobación Compresión Uniforme paralela a la fibra			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a compresión de cálculo			
Resistencia característica a compresión paralela	$f_{c,0,k}$	22,00	MPa
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,90	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Tensión a compresión de cálculo			
Axil a compresión máximo	$C_{0,d}$	12,38	kN
Área neta	A_n	8100	mm ²
Tensión de cálculo a compresión paralela al a fibra	$\sigma_{c,0,d}$	1,53	MPa
Comprobación de resistencia			
Comprobación			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			10%

Tabla 7. Comprobación compresión uniforme paralela - Domo 1.

3.6.5. COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN UNIFORME PERPENDICULAR A LA FIBRA

Este tipo de esfuerzos suele producirse en el apoyo de vigas, durmientes o uniones, o cuando un área se encuentra aplastada por tensiones de compresión normales a la fibra transmitidas por otra viga o apoyo.

Este tipo de esfuerzos solo se dan en la estructura en dos situaciones diferentes; la primera que se analiza es en los elementos barra que tienen un apoyo continuo con la cimentación y se ven afectados

por el peso del cerramiento. Estos elementos son los que se encuentran en las aristas inferiores de los triángulos de la primera fila en contacto con el hormigón. Según se muestra en la siguiente ilustración, este apartado tratará de comprobar el aplastamiento sufrido por los elementos horizontales inferiores mostrados en color cian:

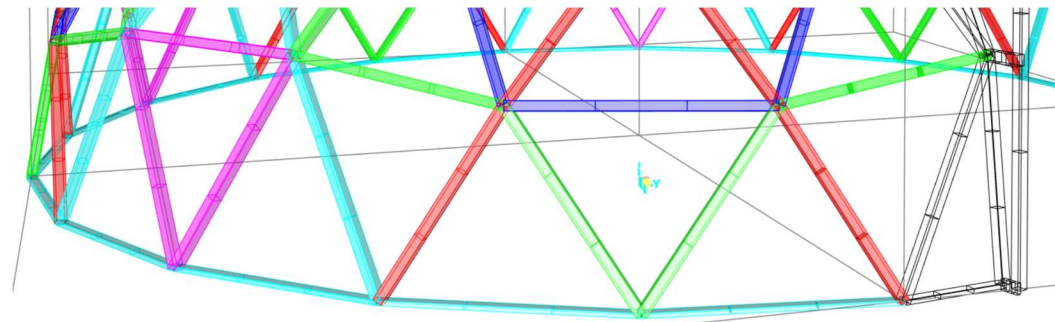


Ilustración 2. Elementos barra sometidos a compresión perpendicular a la fibra. Domo 1.

La carga a compresión normal en estos casos es reducida, puesto que solo se ve afectado por el peso propio y la carga muerta transmitida a este elemento, ya que las acciones variables gravitatorias como la sobrecarga de uso y la nieve no afectan a este elemento puesto que la pendiente de la cubierta en esta zona es elevada.

El caso de estudio podría asimilarse al de una viga durmiente según el CTE-SE-M, tal como se expresa en la siguiente ilustración. Pero en nuestro caso la viga tendría una carga distribuida triangular en toda su longitud.

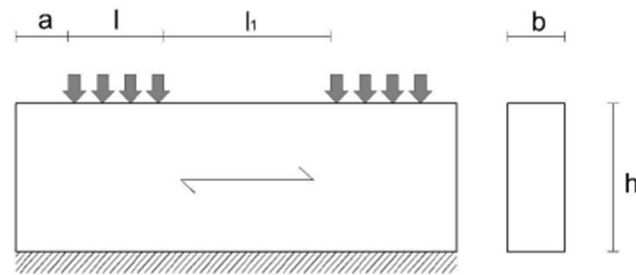


Ilustración 3. Caso de compresión normal a la fibra.

La comprobación de compresión perpendicular debe de cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$$

siendo

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}}$$

Donde; $F_{c,90,d}$ es el valor de cálculo de la carga a compresión perpendicular a la fibra, y A_{ef} el área de contacto eficaz de dicha carga, $f_{c,90,d}$ es la resistencia de cálculo a compresión perpendicular y $k_{c,90}$ un factor que tiene en cuenta la distribución de la carga, la posibilidad de hienda y la deformación máxima por compresión perpendicular. El resultado de la comprobación se resume en la siguiente tabla:

Comprobación Compresión Uniforme perpendicular a la fibra			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a compresión perpendicular de cálculo			
Resistencia característica compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,5	MPa
Factor de modificación (Permanente)	K_{mod}	0,60	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,90,d}$	1,15	MPa
Tensión a compresión perpendicular de cálculo			
Valor de cálculo de la carga a compresión perpendicular	$C_{90,d}$	0,34	kN
Longitud de la pieza	L	1,564	m
Canto	h	90	mm
Área eficaz de contacto	A_n	140796	mm ²
Factor de distribución de carga	$K_{c,90}$	1	-
Tensión de cálculo a compresión perpendicular	$\sigma_{c,90,d}$	0,0024	MPa
Comprobación de resistencia			
Comprobación			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			0,21%

Tabla 8. Comprobación de compresión perpendicular a la fibra en Domo 1.

Aunque el valor de la resistencia a compresión perpendicular a la fibra sea muy reducido, la carga transmitida en este caso es mucho menor, por lo tanto, cumple la condición.

No obstante, podemos analizar otro caso de compresión perpendicular a la fibra que a priori es más desfavorable puesto que las cargas son mucho mayores. La forma de la unión hace que algunas de las piezas estén aplastando con su esfuerzo axial la cara superior del elemento inferior, es decir, el axial de una barra es una fuerza inclinada con una componente perpendicular a la fibra que afecta a la barra adyacente.

Se muestra un esquema de genérico del esfuerzo a compresión perpendicular descrito:

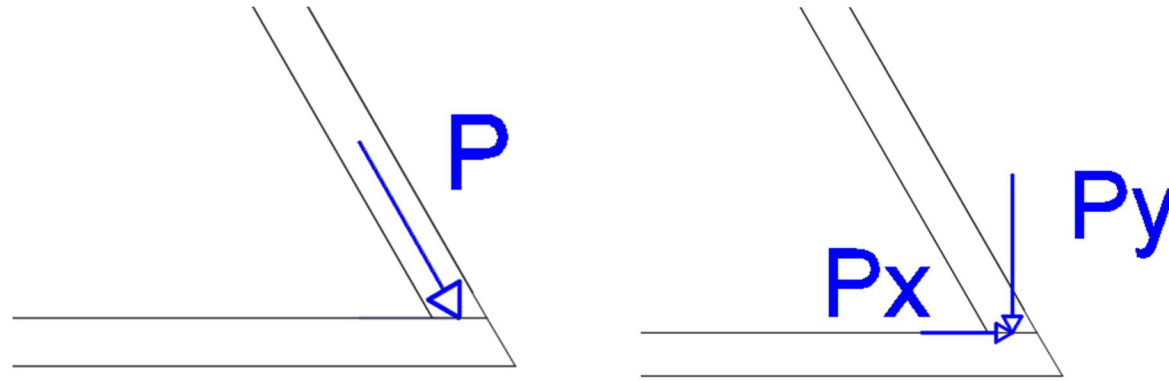


Ilustración 4. Descomposición del axil, componente vertical y horizontal.

Por tanto, para realizar dicha comprobación debemos de hallar la componente vertical Py según la ilustración. Dado el axil de cálculo Nd, que es compartido por dos barras, el valor de P será la mitad del valor del axil de compresión de cálculo, que habrá que multiplicar por el coseno del ángulo que forma con la vertical para obtener su componente vertical perpendicular a la pieza inferior.

Cabe destacar que la carga P no solo está inclinada en el plano del triángulo tal como se ve en la figura, sino que también tiene una componente de inclinación en el plano perpendicular debido a la curvatura del domo, que también se habrá de tener en cuenta.

Los resultados de la comprobación se muestran en la siguiente tabla:

Comprobación Compresión Uniforme perpendicular a la fibra aplastamiento en triángulos			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a compresión perpendicular de cálculo			
Resistencia característica compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,5	MPa
Factor de modificación (Permanente)	K_{mod}	0,6	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,90,d}$	1,44	MPa
Tensión a compresión perpendicular de cálculo			
Axil de compresión máximo en la barra	$C_{0,d}$	6,19	kN
Ángulo de P en el plano del triángulo	α	60	grados
Ángulo de P en el plano perpendicular	β	9	grados
Esfuerzo de compresión del elemento	$C_{\alpha,\beta,d}$	5,29	kN
Ancho	b	45	mm
Canto	h	90	mm
Área eficaz de contacto	A_n	4050	mm ²
Factor de distribución de carga	$K_{c,90}$	1,25	-

Tensión de cálculo a compresión perpendicular	$\sigma_{c,90,d}$	1,31	MPa
Comprobación de resistencia			
Comprobación			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			90,61%

Tabla 9. Comprobación de compresión perpendicular - Domo 1.

Cabe destacar que, debido a que en la unión llegan aproximadamente 10 barras por nudo, se puede tener en cuenta, según indica el CTE, un factor de distribución de carga que sí es aplicable en este caso, este factor incrementa la resistencia a compresión perpendicular en un 25%. Con ello, se verifica que cumple la comprobación a compresión perpendicular, pero alcanzando el 91% de su resistencia en la barra más desfavorable de la estructura.

3.6.6. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN SIMPLE

La comprobación a flexión simple debe de cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$$

siendo:

$\sigma_{m,d}$ tensión de cálculo a flexión;

$f_{m,d}$ resistencia de cálculo a flexión.

Dada la forma circular de la estructura, los momentos flectores son igual de significativos para los dos ejes de flexión de la pieza. Por tanto, se comprobará la flexión simple en ambos ejes por separado.

Así pues, para cualquier sección solicitada por un momento flector la tensión originada será:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_d}{I_y} \cdot Z_{max}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_d}{I_z} \cdot y_{max}$$

Se muestra a continuación los resultados de la comprobación de la flexión en las dos direcciones:

Comprobación Flexión Simple			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a flexión simple de cálculo			
Resistencia característica flexión	$f_{m,k}$	26,58	MPa
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,90	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo a flexión simple	$f_{m,d}$	18,40	MPa

Tensión a flexión simple de cálculo			
Flexión de cálculo sobre eje y	$F_{s,d,y}$	0,67	kN.m
Flexión de cálculo sobre eje z	$F_{s,d,z}$	1,18	kN.m
Inercia respecto eje y	I_y	5467500	mm ⁴
Inercia respecto eje z	I_z	5467500	mm ⁴
Z max y	$Z_{,y}$	45	mm
Z max z	$Z_{,z}$	45	mm
Tensión de cálculo flexión eje y	$\sigma_{m,d,y}$	5,52	MPa
Tensión de cálculo flexión eje z	$\sigma_{m,d,z}$	9,70	MPa

Comprobación de resistencia	
Comprobación flexión eje y	CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia	29,99%
Comprobación flexión eje z	CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia	52,73%

Tabla 10. Comprobación a flexión simple en las dos direcciones principales. Domo 1.

3.6.7. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN ESVIADA

Esta comprobación es similar a la de flexión simple, pero suponiendo que ambos flectores máximos están actuando a la vez sobre una sección. Es decir, actúan los flectores en ambos planos principales de manera que la fibra neutra no coincide con ningún plano principal de inercia.

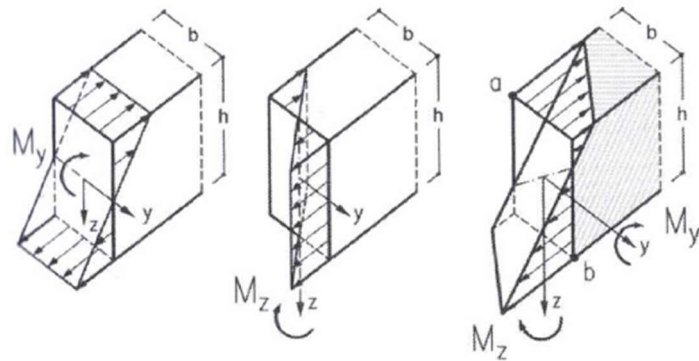


Ilustración 5. Esfuerzos de flexión esviada.

Para realizar esta comprobación deben de cumplirse a la vez las siguientes condiciones:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Siendo;

$\sigma_{m,y,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje principal y, figura 6.1;

$f_{m,y,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje principal y, figura 6.1;

$\sigma_{m,z,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje principal z, figura 6.1;

$f_{m,z,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje principal z, figura 6.1;

k_m factor que tiene en cuenta el efecto de redistribución de tensiones y la falta de homogeneidad del material en la sección transversal y adopta los valores siguientes:

$k_m = 0,7$ para secciones rectangulares de madera maciza, madera laminada encolada y madera microlaminada; (6.10)

$k_m = 1,0$ para otras secciones y otros productos derivados de la madera (6.11)

Tomando los mismos valores de tensión calculados en flexión simple se obtienen los siguientes resultados para la comprobación:

Comprobación Flexión Esviada			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a flexión esviada de cálculo			
Resistencia característica flexión	$f_{m,k}$	26,58	MPa
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,90	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,30	-
Resistencia de cálculo a flexión eje y	$f_{m,y,d}$	18,40	MPa
Resistencia de cálculo a flexión eje z	$f_{m,y,z}$	18,40	MPa
Tensión a flexión esviada de cálculo			
Flexión de cálculo sobre eje y	$F_{s,d,y}$	0,67	kN.m
Flexión de cálculo sobre eje z	$F_{s,d,z}$	1,18	kN.m
Inercia respecto eje y	I_y	5467500	mm ⁴
Inercia respecto eje z	I_z	5467500	mm ⁴
Z max y	$Z_{,y}$	45	mm
Z max z	$Z_{,z}$	45	mm
factor redistribución de tensiones	K_m	0,7	-
Tensión de cálculo a flexión eje y	$\sigma_{m,y,d}$	5,52	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje z	$\sigma_{m,z,d}$	9,70	MPa

Comprobación de resistencia	
Comprobación 1	CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia	73,72%
Comprobación 2	CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia	66,90%

Tabla 11. Comprobación a flexión esviada. Domo 1.

3.6.8. COMPROBACIÓN A CORTANTE

En una viga simplemente apoyada se produce el fallo por cortante por el deslizamiento de las fibras en la zona central de la sección, donde tienen lugar las máximas tensiones tangenciales, en la sección próxima a los apoyos, donde suelen estar los cortantes máximos. Esto da a lugar un plano de rotura horizontal por rasante. Tal como se muestra en la siguiente ilustración:

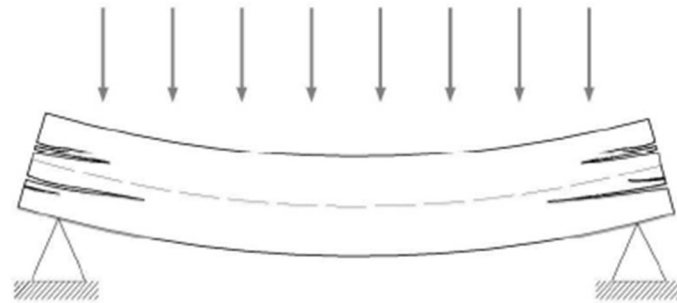


Ilustración 6. Fallo por cortante.

Para solicitaciones de cortante con una de las componentes paralela a la dirección de la fibra y para solicitaciones con ambas componentes perpendiculares a la dirección de la fibra debe de cumplirse la siguiente condición:

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

siendo:

τ_d tensión de cálculo a cortante;
 $f_{v,d}$ resistencia de cálculo a cortante (corte paralelo o rodadura). La resistencia a cortante por rodadura podrá considerarse igual al doble de la resistencia a tracción perpendicular a la fibra.

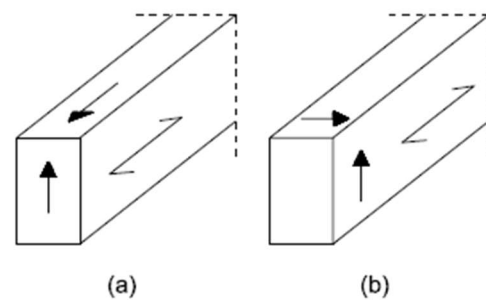


Figura 6.5 Tensiones de cortadura. a) corte paralelo. b) rodadura

Ilustración 7. Tensiones de cortadura.

Para una sección rectangular la ley de distribución de tensiones tangenciales es parabólica con su máximo en el centro que se calcula con la siguiente ecuación:

$$\tau_d = 1,5 \cdot \frac{V_d}{b \cdot h}$$

Podemos observar que la resistencia a cortante de la madera es algo baja con respecto al resto de esfuerzos, teniendo un valor característico de 0,80 MPa. Además de esto, se observan unos esfuerzos a cortante muy diferentes entre la zona de la puerta y la del resto del domo. Por lo que, para no sobredimensionar las 160 piezas de la cúpula, es necesario determinar unas dimensiones diferentes para algunos elementos de la puerta.

Es decir, el dimensionamiento de algunos elementos de la puerta viene condicionado por la comprobación a cortante, ya que los esfuerzos en esta zona son muy superiores. Mientras que la comprobación que condiciona el dimensionado en el resto de la estructura es la de pandeo que veremos más adelante.

Por tanto, realizaremos dos comprobaciones a cortante según las siguientes premisas:

- Comprobación a cortante en las barras que configuran la estructura esférica con el mayor esfuerzo cortante de todas ellas y una sección resistente de 90x90 mm.
- Comprobación a cortante en las barras que configuran la apertura de la puerta con el mayor esfuerzo cortante de todas ellas y una sección resistente de 100 x 90mm (canto x ancho)

Los resultados de las comprobaciones a cortante son los siguientes:

Comprobación a cortante en el domo			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a cortante de cálculo			
Resistencia característica tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	MPa
Resistencia característica cortante	$f_{v,k,rodadura}$	0,8	MPa
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,90	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,30	-
Resistencia de cálculo a cortante	$f_{m,d}$	0,55	MPa
Tensión a cortante de cálculo			
Cortante de cálculo en eje y	V2	0,66	kN
Cortante de cálculo en eje z	V3	0,50	kN
Ancho en y	B_y	90	mm
Ancho en z	B_z	90	mm
Coeficiente reductor	k_{cr}	0,67	-

Ancho eficaz en y	Bef,y	60,3	mm
Ancho eficaz en z	Bef,z	60,3	mm
Tensión de cálculo a cortante, y	T_{v,y,d}	0,18	MPa
Tensión de cálculo a cortante, z	T_{v,z,d}	0,14	MPa

Comprobación de resistencia		
Comprobación a cortante eje y		CUMPLE
Factor de aprovechamiento de la resistencia		33%
Comprobación a cortante eje z		CUMPLE
Factor de aprovechamiento de la resistencia		25%

Tabla 12. Comprobación a cortante de los elementos del domo 1.

En la siguiente ilustración extraída del modelo SAP2000 se muestra en color amarillo la barra con mayores solicitaciones a cortante producidas por el viento de presión perpendicular al plano de la puerta como acción dominante en la combinación COMB064. Este grupo de barras están denominadas las barras del grupo 3 de la puerta.

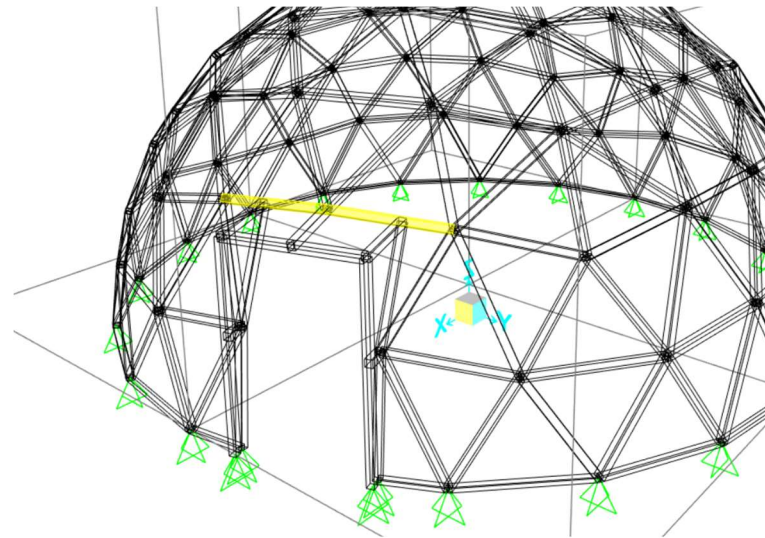


Ilustración 8. Barra más solicitada a cortante (color amarillo).

Comprobación a cortante en la barra de grupo 3			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a cortante de cálculo			
Resistencia característica tracción perpendicular	f _{t,90,k}	0,4	MPa
Resistencia característica cortante	f _{v,k,rodadura}	0,8	MPa
Factor de modificación (corta duración)	K _{mod}	0,90	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ _M	1,30	-
Resistencia de cálculo a cortante	f_{m,d}	0,55	MPa
Tensión a cortante de cálculo			
Cortante de cálculo en eje y	V2	1,32	kN

Cortante de cálculo en eje z	V3	2,19	kN
Ancho en y	By	90	mm
Ancho en z	Bz	100	mm
Coefficiente reductor	k _{cr}	0,67	-
Ancho eficaz en y	Bef,y	60,3	mm
Ancho eficaz en z	Bef,z	67	mm
Tensión de cálculo a cortante, y	T_{v,y,d}	0,36	MPa
Tensión de cálculo a cortante, z	T_{v,z,d}	0,49	MPa

Comprobación de resistencia		
Comprobación a cortante eje y		CUMPLE
Factor de aprovechamiento de la resistencia		66%
Comprobación a cortante eje z		CUMPLE
Factor de aprovechamiento de la resistencia		88%

Tabla 13. Comprobación a cortante de los elementos de la puerta. Domo 1.

Se comprueba que este grupo de barras debe de tener una sección superior a la del resto del domo de dimensiones 90x100 mm (ancho x canto). El resto de barras de toda la estructura resisten el cortante con una sección cuadrada de 90x90mm.

3.6.9. COMPROBACIÓN A TORSIÓN

Se considera oportuno no realizar la comprobación a torsión en las piezas, puesto que el valor del torsor máximo alcanza un valor muy reducido de 0,05 KN.m. Además, dicho valor aparece por compatibilidad de deformaciones en la estructura, y, por tanto, se considera que cumpliría sobradamente con la resistencia a torsión.

3.6.10. COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN INCLINADA RESPECTO A LA FIBRA

Este tipo de solicitaciones se presenta en las uniones de la estructura, puesto que debido al tipo de unión Good Kharma todas las uniones presentan un corte oblicuo para el encaje de las piezas.

Como se ha descrito anteriormente, la resistencia a compresión de la madera depende de la dirección de la carga aplicada con respecto a la fibra, siendo mucho más resistente cuando esta es paralela a la fibra y más baja en la dirección perpendicular.

La variación en la resistencia según los ángulos de las cargas aplicadas viene dada por la expresión de Hankinson que recoge el CTE-SE-M:

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

En la expresión el valor de α corresponde con el ángulo que forma la tensión con la dirección de la fibra. Mientras que el resto de parámetros corresponden con la resistencia a compresión paralela $f_{c,0,d}$ y la resistencia a compresión perpendicular $f_{c,90,d}$.

Por tanto, se debe de cumplir la siguiente condición para realizar la comprobación de compresión inclinada:

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

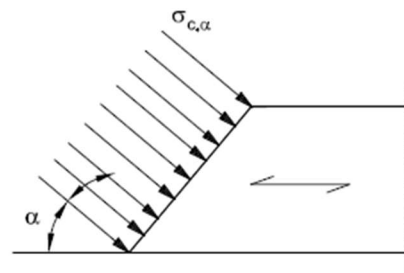


Figura 6.7. Compresión inclinada respecto a la fibra (ángulo α)

Completando los valores de la ecuación se obtienen los siguientes resultados:

Comprobación a compresión inclinada			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencias a compresión inclinada			
Resistencia cálculo compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Resistencia cálculo compresión perpendicular	$f_{c,90,d}$	1,15	MPa
Resistencia de cálculo a compresión inclinada	$f_{c,\alpha,d}$	1,87	MPa
Tensión de compresión inclinada			
Esfuerzo de compresión paralelo	$N_{c,0,d}$	6,19	kN
Esfuerzo de compresión perpendicular	$N_{c,90,d}$	2,37	kN
Ángulo de corte	α	40	grados
ancho	b	45	mm
canto	h	90	mm
Area inclinada (área en inglete cargada)	$A\alpha$	2643	mm ²
Hipotenusa (Longitud cargada)	L	29,37	m

Tensión de cálculo a compresión inclinada	$\sigma_{c,\alpha,d}$	0,90	MPa
Comprobación de resistencia			
Comprobación			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de la resistencia			48%

Tabla 14. Comprobación a compresión inclinada. Domo 1.

3.6.11. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN Y TRACCIÓN AXIAL COMBINADAS

Este apartado trata de comprobar la distribución de tensiones debidas a la superposición del axil de tracción más los flectores de las dos direcciones principales.

Para el análisis de las tensiones provocadas por dos momentos flectores y un axil en tracción se aplica la expresión siguiente:

$$\sigma = \frac{N_d}{A_n} + \frac{M_{y,d}}{W_y} + \frac{M_{z,d}}{W_z}$$

En este caso, existe un único punto de tensión máxima, cuya tensión será la suma de los valores absolutos de las tensiones parciales.

Para cumplir con esta comprobación deberá de validarse la siguiente condición:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Donde:

- $\sigma_{t,0,d}$ tensión de cálculo a tracción paralela;
- $f_{t,0,d}$ resistencia de cálculo a tracción paralela;
- $\sigma_{m,y,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje y;
- $f_{m,y,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje y;
- $\sigma_{m,z,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje z;
- $f_{m,z,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje z;
- k_m factor definido en el apartado 6.1.7.

Los resultados de la comprobación son los siguientes:

Comprobación a tracción y flexión esviada compuesta			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencias a tracción y flexión esviada			
Resistencia de cálculo a tracción paralela	ft,0,d	10,73	MPa
Resistencia de cálculo respecto al eje y	fm,d	18,40	MPa
Resistencia de cálculo a flexión respecto al eje z	fm,z,d	18,40	MPa
Tensiones de tracción y flexión esviada			
Tensión de cálculo a tracción paralela	σt,0,d	1,25	MPa
Tensión de cálculo a flexión respecto eje Y	σm,d,y	5,52	MPa
Tensión de cálculo a flexión respecto al eje z	σm,z,d	9,70	MPa
Factor redistribución de tensiones	Km	0,7	-
Comprobación de resistencia			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			79%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			85%

Tabla 15. Comprobación a tracción y flexión esviada – Domo 1.

3.6.12. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN AXIAL COMBINADAS

Del mismo modo que el caso anterior, se deben de cumplir las siguientes condiciones:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}}\right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Donde;

- σc,0,d tensión de cálculo a compresión paralela;
- f_{c,0,d} resistencia de cálculo a compresión paralela;
- σm,y,d tensión de cálculo a flexión respecto al eje y;
- f_{m,y,d} resistencia de cálculo a flexión respecto al eje y;
- σm,z,d tensión de cálculo a flexión respecto al eje z;
- f_{m,z,d} resistencia de cálculo a flexión respecto al eje z;
- Km factor definido en el apartado 6.1.7.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Comprobación a compresión y flexión esviada compuesta			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencias a compresión y flexión esviada			
Resistencia de cálculo a compresión paralela	fc,0,d	15,23	MPa
Resistencia de cálculo respecto al eje y	fm,d	18,40	MPa
Resistencia de cálculo a flexión respecto al eje z	fm,z,d	18,40	MPa
Tensiones de compresión y flexión esviada			
Tensión de cálculo a compresión paralela	σc,0,d	1,53	MPa
Tensión de cálculo a flexión respecto eje Y	σm,d,y	5,52	MPa
Tensión de cálculo a flexión respecto al eje Z	σm,z,d	9,70	MPa
Factor redistribución de tensiones	Km	0,7	-
Comprobación de resistencia			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			68%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			75%

Tabla 16. Comprobaciones de axil de compresión y flexión esviada. Domo 1.

3.6.13. COMPROBACIÓN DE ESTABILIDAD LOCAL DE PIEZAS

La comprobación a pandeo es la condición a cumplir más limitante de la estructura esférica del domo, y, por lo tanto, la que condiciona en mayor medida el dimensionamiento de la estructura. El pandeo de una pieza que se encuentra sometida a esfuerzos de compresión o flexocompresión es un fenómeno de inestabilidad por el que la pieza puede sufrir el fallo ante tensiones mucho más reducidas que las de la propia resistencia del material.

Según la formulación de Euler, existe una carga crítica que en el caso de ser superada se produce un equilibrio inestable o pandeo, con deslizamiento lateral creciente hasta la rotura. Esta carga crítica viene dada por la siguiente expresión:

$$P_{crit} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{L^2}$$

Esta formulación de Euler sirve para piezas ideales, en la práctica las piezas reales sobre todo en madera son anisótropas en cuanto a sus propiedades resistentes, falta de homogeneidad por la existencia de nudos o fendas, además de falta de rectitud y excentricidad de la carga.

Por lo que para las comprobaciones de pandeo se emplea la misma resistencia, pero reducida con un factor llamado coeficiente de pandeo χ, que reduce su valor en función de la esbeltez de la pieza.

El pandeo puede producirse en cualquiera de sus dos planos de inercia de la sección. Por lo que el análisis se realizará según los coeficientes de pandeo para cada uno de los dos planos.

Para realizar la comprobación de pandeo, primero, se deberá de hallar la esbeltez mecánica para cada uno de los dos planos de inercia.

La esbeltez mecánica del plano XZ, flectando respecto al eje y:

$$\lambda_{y} = \frac{L_{k,y}}{i_y}$$

La esbeltez mecánica del plano XY, flectando respecto al eje z:

$$\lambda_{z} = \frac{L_{k,z}}{i_z}$$

Siendo:

$L_{k,y}$ y $L_{k,z}$ longitudes de pandeo en los planos xz y xy, respectivamente.

$$L_{k,y} = \beta_y \cdot L$$

$$L_{k,z} = \beta_z \cdot L$$

L longitud del soporte o pieza;

β_y y β_z coeficientes que dependen de las condiciones de restricción de los extremos de la pieza para el movimiento en el plano xz y xy, respectivamente. Los valores de β para los casos más habituales pueden consultarse en el anejo G;

i_y e i_z radios de giro de la sección respecto a los ejes principales: y, z, respectivamente.

Dada la configuración del domo, donde todas sus barras están biarticuladas, se puede adoptar en el coeficiente β para ambos ejes el valor 1.

El radio de giro de la sección respecto a los ejes principales, se puede hallar mediante la siguiente ecuación:

$$i = \sqrt{\frac{\text{Inercia}}{\text{Área}}}$$

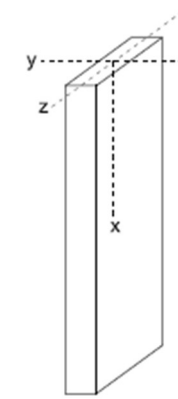


Ilustración 9. Ejes principales de la pieza comprimida, solicitada a compresión.

Por otro lado, se deberá de hallar la esbeltez relativa para cada uno de los planos de inercia por medio de las siguientes expresiones:

$$\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,y}}}$$

$$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,z}}}$$

siendo:

$$\sigma_{c,crit,y} = \pi^2 E_{0,k} / \lambda_y^2$$

$$\sigma_{c,crit,z} = \pi^2 E_{0,k} / \lambda_z^2$$

$E_{0,k}$ módulo de elasticidad paralelo a la fibra;

λ_y y λ_z esbelteces mecánicas.

Como hemos visto en la fórmula de Euler hay dos variables principales para el pandeo de la pieza. La longitud de la misma y su carga a compresión. Por tanto, nos basaremos en estas dos variables para realizar las comprobaciones a pandeo de las barras.

La comprobación de la estabilidad de piezas deberá de valorar dos situaciones de esfuerzos diferentes; la verificación de la estabilidad a compresión simple y a flexocompresión, como se muestra a continuación:

Comprobación de pandeo en compresión simple

Se deberá de cumplir las siguientes condiciones:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,y} f_{c,0,d}} \leq 1$$

Siendo:

$\sigma_{c,0,d}$ tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra;
 $f_{c,0,d}$ resistencia de cálculo a compresión paralela a la fibra;
 $\chi_{c,y}, \chi_{c,z}$ coeficientes de pandeo, obtenidos a partir de las siguientes expresiones
 $\chi_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}}$ análogo para $\chi_{c,z}$
 $k_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2)$ análogo para k_z

Comprobación de flexocompresión

Deberá de cumplirse las siguientes condiciones para comprobar la estabilidad de la pieza incluyendo la flexión esviada:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

siendo:
 $\sigma_{c,0,d}$ tensión de cálculo a compresión paralela;
 $f_{c,0,d}$ resistencia de cálculo a compresión paralela;
 $\sigma_{m,y,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje y;
 $f_{m,y,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje y;
 $\sigma_{m,z,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje z;
 $f_{m,z,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje z;
 k_m factor definido en el apartado 6.1.7;
 $k_m = 0,7$ (sección rectangular);
 $\chi_{c,y}$ y $\chi_{c,z}$ coeficientes de pandeo según 6.3.2.2.

Para comprobar la estabilidad local de las piezas de la estructura; se harán las comprobaciones a pandeo pertinentes de la barra de mayor axil a compresión, posteriormente, la siguiente barra a verificar será aquella que teniendo un axil inmediatamente inferior al anterior también tenga una longitud de la barra mayor, y por tanto, una esbeltez más desfavorable. Se repetirá el proceso hasta comprobar la pieza con la mayor esbeltez y su máximo axil.

Por tanto, se realizarán 4 comprobaciones a 4 barras diferentes de la estructura según la premisa descrita en el párrafo anterior. Estas barras reúnen las siguientes características:

	Valor (kN)	Barra	Longitud (m)	Combinación
Axil,c,max 1	12,38	12-063	1,389	COMB066
Axil,c,max 2	10,34	12-027	1,427	COMB040
Axil,c,max 3	8,25	12-062	1,564	COMB061
Axil,c,max 4	7,50	12-055	1,625	COMB076

Tabla 17. Barras a comprobar su estabilidad local.

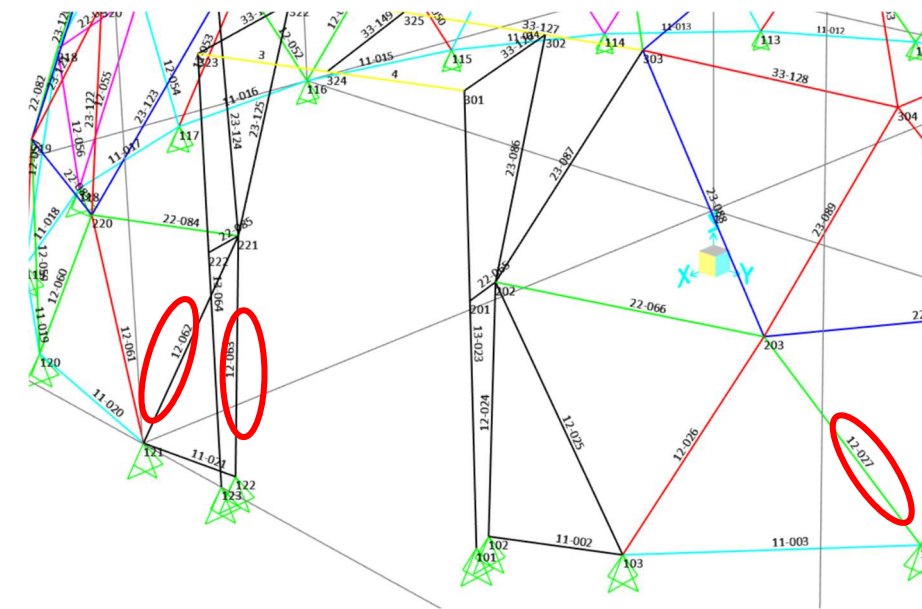


Ilustración 10. Barras con comprobación a pandeo local.

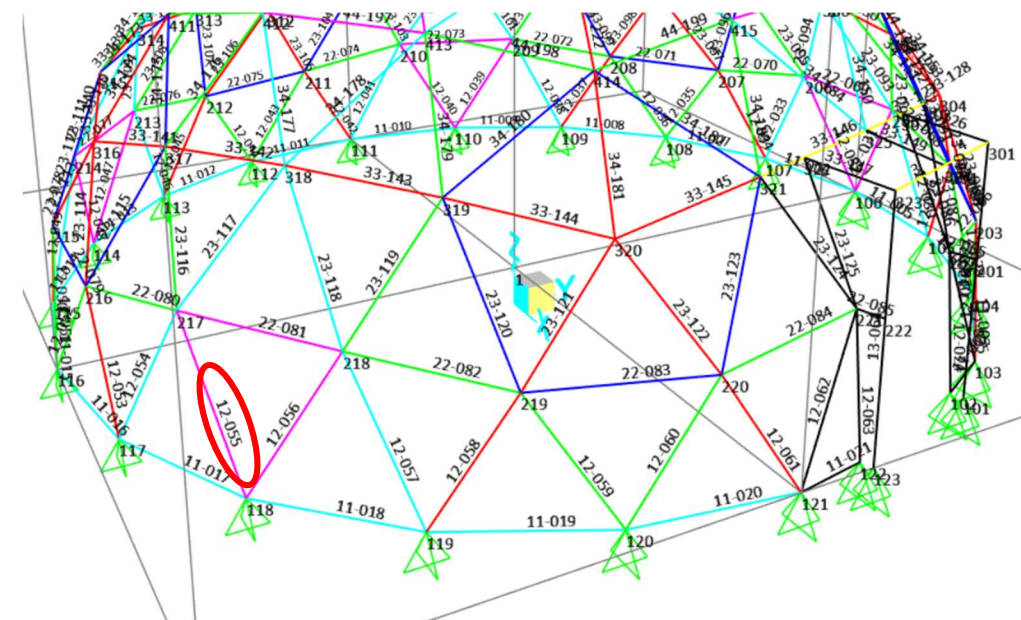


Ilustración 11. Barra con comprobación a pandeo local.

Comprobación de la barra 12-063

Esbeltez mecánica y relativa - Barra 12-063			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Esbeltez mecánica			
Longitud de la pieza	L	1,3886	m
Coef. de condiciones de restricción en y	β_y	1	-
Coef. de condiciones de restricción en z	β_z	1	-
Longitud de pandeo en plano xz	$L_{k,y}$	1,39	m
Longitud de pandeo en plano xy	$L_{k,z}$	1,39	m
Canto de la pieza	h	90	mm
Ancho de la pieza	b	90	mm
Inercia respecto el eje y	I_y	5467500	mm ⁴
Inercia respecto el eje z	I_z	5467500	mm ⁴
Reducción del área por pretaladro y tirafondo (d=8mm)	Atirafondo	50	mm ²
Área eficaz	A	8050	mm ²
Radio de giro en y	i_y	26,06	mm
Radio de giro en z	i_z	26,06	mm
Esbeltez mecánica en el plano xz	λ_y	53,28	-
Esbeltez mecánica en el plano xy	λ_z	53,28	-
Esbeltez relativa			
Resistencia a compresión característica	$f_{c,0,k}$	22	Mpa
Modulo de elasticidad paralelo a la fibra	$E_{0,k}$	7,4	kN/mm ²
Tensión de compresión crítica en plano xz	$\sigma_{c,crit,y}$	25,73	MPa
Tensión de compresión crítica en plano xy	$\sigma_{c,crit,z}$	25,73	MPa
Esbeltez relativa en plano xz	$\lambda_{rel,y}$	0,92	-
Esbeltez relativa en plano xy	$\lambda_{rel,z}$	0,92	-

Tabla 18. Esbelteces mecánicas y relativas en barra 12-063- Domo 1.

Estabilidad de piezas - compresión simple - barra 12-063			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Estabilidad en compresión simple			
Axil de compresión máximo	$C_{0,d}$	12,38	kN
Área neta	A_n	8050	mm ²
Tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0,d}$	1,54	MPa
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Factor asociado a la rectitud de las piezas	β_c	0,20	-
	k_y	0,99	-
	k_z	0,99	-
Coeficiente de pandeo en y	$\chi_{c,y}$	0,744	-
Coeficiente de pandeo en z	$\chi_{c,z}$	0,744	-
Comprobación de estabilidad en compresión simple			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			14%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			14%

Tabla 19. Comprobación de la estabilidad local en compresión simple Barra 12-063. Domo 1.

Estabilidad de piezas - flexocompresión - barra 12-063			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Estabilidad en flexocompresión			
Tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0,d}$	1,54	MPa
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Coeficiente de pandeo en y	$\chi_{c,y}$	0,744	-
Coeficiente de pandeo en z	$\chi_{c,z}$	0,744	-
Resistencia de cálculo a flexión simple eje y	$f_{m,y,d}$	18,40	MPa
Resistencia de cálculo a flexión simple eje z	$f_{m,z,d}$	18,40	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje y	$\sigma_{m,y,d}$	5,52	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje z	$\sigma_{m,z,d}$	9,70	MPa
Factor de redistribución de tensiones	K_m	0,7	-
Comprobación de flexocompresión			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			80,46%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			87,28%

Tabla 20. Comprobación de la estabilidad local en flexocompresión Barra 12-063. Domo 1.

Comprobación de la barra 12-027

Esbeltez mecánica y relativa- Barra 12-027			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Esbeltez mecánica			
Longitud de la pieza	L	1,427	m
Coef. de condiciones de restricción en y	β_y	1	-
Coef. de condiciones de restricción en z	β_z	1	-
Longitud de pandeo en plano xz	$L_{k,y}$	1,43	m
Longitud de pandeo en plano xy	$L_{k,z}$	1,43	m
Canto de la pieza	h	90	mm
Ancho de la pieza	b	90	mm
Inercia respecto el eje y	I_y	5467500	mm ⁴
Inercia respecto el eje z	I_z	5467500	mm ⁴
Reducción del área por pretaladro y tirafondo (d=8mm)	Atirafondo	50	mm ²
Área eficaz	A	8050	mm ²
Radio de giro en y	i_y	26,06	mm
Radio de giro en z	i_z	26,06	mm
Esbeltez mecánica en el plano xz	λ_y	54,77	-
Esbeltez mecánica en el plano xy	λ_z	54,77	-
Esbeltez relativa			
Resistencia a compresión característica	$f_{c,0,k}$	22	Mpa
Modulo de elasticidad paralelo a la fibra	$E_{0,k}$	7,4	kN/mm ²
Tensión de compresión crítica en plano xz	$\sigma_{c,crit,y}$	24,35	MPa
Tensión de compresión crítica en plano xy	$\sigma_{c,crit,z}$	24,35	MPa
Esbeltez relativa en plano xz	$\lambda_{rel,y}$	0,95	-
Esbeltez relativa en plano xy	$\lambda_{rel,z}$	0,95	-

Tabla 21. Esbelteces mecánicas y relativas en barra 12-027- Domo 1.

Estabilidad de piezas - compresión simple - Barra 12-027			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Estabilidad en compresión simple			
Axil de compresión máximo	$C_{0,d}$	10,34	kN
Área neta	A_n	8050	mm ²
Tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0,d}$	1,28	MPa
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Factor asociado a la rectitud de las piezas	β_c	0,20	-
	k_y	1,02	-
	k_z	1,02	-
Coeficiente de pandeo en y	$\chi_{c,y}$	0,726	-
Coeficiente de pandeo en z	$\chi_{c,z}$	0,726	-
Comprobación de estabilidad en compresión simple			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			12%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			12%

Tabla 22. Comprobación de la estabilidad local en compresión simple Barra 12-027. Domo 1.

Estabilidad de piezas - flexocompresión - Barra 12-027			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Estabilidad en flexocompresión			
Tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0,d}$	1,28	MPa
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Coeficiente de pandeo en y	$\chi_{c,y}$	0,726	-
Coeficiente de pandeo en z	$\chi_{c,z}$	0,726	-
Resistencia de cálculo a flexión simple eje y	$f_{m,y,d}$	18,40	MPa
Resistencia de cálculo a flexión simple eje z	$f_{m,z,d}$	18,40	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje y	$\sigma_{m,y,d}$	5,52	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje z	$\sigma_{m,z,d}$	9,70	MPa
Factor de redistribución de tensiones	K_m	0,7	-
Comprobación de flexocompresión			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			78,51%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			85,34%

Tabla 23. Comprobación de la estabilidad local en flexocompresión Barra 12-027. Domo 1.

Comprobación de la barra 12-062

Esbeltz mecánica y relativa - Barra 12-062			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Esbeltz mecánica			
Longitud de la pieza	L	1,5644	m
Coef. de condiciones de restricción en y	β_y	1	-
Coef. de condiciones de restricción en z	β_z	1	-
Longitud de pandeo en plano xz	$L_{k,y}$	1,56	m
Longitud de pandeo en plano xy	$L_{k,z}$	1,56	m
Canto de la pieza	h	90	mm
Ancho de la pieza	b	90	mm
Inercia respecto el eje y	I_y	5467500	mm ⁴
Inercia respecto el eje z	I_z	5467500	mm ⁴
Reducción del área por pretaladro y tirafondo (d=8mm)	Atirafondo	50	mm ²
Área eficaz	A	8050	mm ²
Radio de giro en y	i_y	26,06	mm
Radio de giro en z	i_z	26,06	mm
Esbeltz mecánica en el plano xz	λ_y	60,03	-
Esbeltz mecánica en el plano xy	λ_z	60,03	-
Esbeltz relativa			
Resistencia a compresión característica	$f_{c,0,k}$	22	Mpa
Modulo de elasticidad paralelo a la fibra	$E_{0,k}$	7,4	kN/mm ²
Tensión de compresión crítica en plano xz	$\sigma_{c,crit,y}$	20,27	MPa
Tensión de compresión crítica en plano xy	$\sigma_{c,crit,z}$	20,27	MPa
Esbeltz relativa en plano xz	$\lambda_{rel,y}$	1,04	-
Esbeltz relativa en plano xy	$\lambda_{rel,z}$	1,04	-

Tabla 24. Esbeltz mecánicas y relativas en barra 12-062 - Domo 1

Estabilidad de piezas - compresión simple - Barra 12-062			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Estabilidad en compresión simple			
Axil de compresión máximo	$C_{0,d}$	8,25	kN
Área neta	A_n	8050	mm ²
Tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0,d}$	1,02	MPa
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Factor asociado a la rectitud de las piezas	β_c	0,20	-
	k_y	1,12	-
	k_z	1,12	-
Coeficiente de pandeo en y	$\chi_{c,y}$	0,658	-
Coeficiente de pandeo en z	$\chi_{c,z}$	0,658	-
Comprobación de estabilidad en compresión simple			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			10%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			10%

Tabla 25. Comprobación de la estabilidad local en compresión simple Barra 12-062. Domo 1.

Estabilidad de piezas - flexocompresión - Barra 12-062			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Estabilidad en flexocompresión			
Tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0,d}$	1,02	MPa
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Coeficiente de pandeo en y	$\chi_{c,y}$	0,658	-
Coeficiente de pandeo en z	$\chi_{c,z}$	0,658	-
Resistencia de cálculo a flexión simple eje y	$f_{m,y,d}$	18,40	MPa
Resistencia de cálculo a flexión simple eje z	$f_{m,z,d}$	18,40	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje y	$\sigma_{m,y,d}$	5,52	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje z	$\sigma_{m,z,d}$	9,70	MPa
Factor de redistribución de tensiones	K_m	0,7	-
Comprobación de flexocompresión			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			77,12%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			83,94%

Tabla 26. Comprobación de la estabilidad local en flexocompresión Barra 12-062. Domo 1.

Comprobación de la barra 12-055

Esbeltez mecánica y relativa - Barra 12-055			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Esbeltez mecánica			
Longitud de la pieza	L	1,625	m
Coef. de condiciones de restricción en y	β_y	1	-
Coef. de condiciones de restricción en z	β_z	1	-
Longitud de pandeo en plano xz	$L_{k,y}$	1,62	m
Longitud de pandeo en plano xy	$L_{k,z}$	1,62	m
Canto de la pieza	h	90	mm
Ancho de la pieza	b	90	mm
Inercia respecto el eje y	I_y	5467500	mm ⁴
Inercia respecto el eje z	I_z	5467500	mm ⁴
Reducción del área por pretaladro y tirafondo (d=8mm)	Atirafondo	50	mm ²
Área eficaz	A	8050	mm ²
Radio de giro en y	i_y	26,06	mm
Radio de giro en z	i_z	26,06	mm
Esbeltez mecánica en el plano xz	λ_y	62,34	-
Esbeltez mecánica en el plano xy	λ_z	62,34	-
Esbeltez relativa			
Resistencia a compresión característica	$f_{c,0,k}$	22	Mpa
Modulo de elasticidad paralelo a la fibra	$E_{0,k}$	7,4	kN/mm ²
Tensión de compresión crítica en plano xz	$\sigma_{c,crit,y}$	18,80	MPa
Tensión de compresión crítica en plano xy	$\sigma_{c,crit,z}$	18,80	MPa
Esbeltez relativa en plano xz	$\lambda_{rel,y}$	1,08	-
Esbeltez relativa en plano xy	$\lambda_{rel,z}$	1,08	-

Tabla 27. Esbelteces mecánicas y relativas en barra 12-055 - Domo 1.

Estabilidad de piezas - compresión simple - Barra 12-055			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Estabilidad en compresión simple			
Axil de compresión máximo	$C_{0,d}$	7,62	kN
Área neta	A_n	8050	mm ²
Tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0,d}$	0,95	MPa
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Factor asociado a la rectitud de las piezas	β_c	0,20	-
	k_y	1,16	-
	k_z	1,16	-
Coeficiente de pandeo en y	$\chi_{c,y}$	0,628	-
Coeficiente de pandeo en z	$\chi_{c,z}$	0,628	-
Comprobación de estabilidad en compresión simple			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			10%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			10%

Tabla 28. Comprobación de la estabilidad local en compresión simple Barra 12-055. Domo 1.

Estabilidad de piezas - flexocompresión - Barra 12-055			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Estabilidad en flexocompresión			
Tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0,d}$	0,95	MPa
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Coeficiente de pandeo en y	$\chi_{c,y}$	0,628	-
Coeficiente de pandeo en z	$\chi_{c,z}$	0,628	-
Resistencia de cálculo a flexión simple eje y	$f_{m,y,d}$	18,40	MPa
Resistencia de cálculo a flexión simple eje z	$f_{m,z,d}$	18,40	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje y	$\sigma_{m,y,d}$	5,52	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje z	$\sigma_{m,z,d}$	9,70	MPa
Factor de redistribución de tensiones	K_m	0,7	-
Comprobación de flexocompresión			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			76,78%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			83,60%

Tabla 29. Comprobación de la estabilidad local en flexocompresión Barra 12-055. Domo 1.

Tras estas comprobaciones se verifica que por la comprobación de pandeo la mínima sección asumible es la 90 x 90 mm en todas las piezas del domo.

3.6.14. COMPROBACIÓN DE ESTABILIDAD GLOBAL DE PIEZAS

La comprobación de la estabilidad global de la estructura puede ser la comprobación más importante para el dimensionamiento de cualquier domo geodésico. Como hemos visto en el epígrafe anterior, el pandeo local de la barra es la comprobación que condiciona el dimensionamiento, pero en la práctica, el pandeo local de una de las barras no generaría el colapso de la estructura.

El efecto que produciría el colapso de la estructura será el fallo de su estabilidad global, es decir, del pandeo global de su geometría. Estudiar esto induciría a realizar un análisis de segundo orden, teniendo en cuenta la influencia de la deformación de la estructura.

En general, podemos obtener las solicitaciones de la estructura por dos metodologías diferentes:

- El análisis de primer orden, con la geometría inicial de la estructura, que es el caso que se ha realizado hasta ahora.
- El análisis de segundo orden, teniendo en cuenta la influencia de la deformación de la estructura.

Los efectos de la geometría deformada (efectos de segundo orden) deben tenerse en cuenta si estos incrementarían significativamente los efectos de las acciones o modificarían significativamente el comportamiento estructural del domo.

Por tanto, este incremento de las solicitaciones o cualquier otro cambio en el comportamiento estructural producido por las deformaciones podrá despreciarse, es decir, el diseño sería válido con un análisis de primer orden en la estructura, si se cumple el siguiente criterio:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \rightarrow \text{Para el análisis elástico}$$

donde:

- α_{cr} Es el coeficiente por el que es necesario multiplicar las cargas de cálculo para producir una inestabilidad elástica del modo de pandeo global e la estructura.
- F_{Ed} Es la carga de cálculo que actúa sobre la estructura
- F_{cr} Es la carga crítica de pandeo elástico que produce una inestabilidad del modo de pandeo global, calculada con las rigideces elásticas iniciales.

Para realizar el cálculo del coeficiente α_{cr} se ha empleado el modelo de la estructura en el software SAP2000, donde se han creado casos de carga tipo Buckling que relacionan el esfuerzo de cálculo con la carga crítica de pandeo que produce la inestabilidad global.

A priori, se puede suponer que aquellos casos de carga que proporcionen mayor compresión a la estructura serán los que producirán la inestabilidad global. No obstante, para cada una de las combinaciones de acciones calculadas en ELU se ha creado un caso Buckling de dicha combinación, es decir, se han creado 141 casos de carga nuevos. Exportando los datos, obtenemos la siguiente tabla con los 10 menores coeficientes, y, por tanto, las combinaciones que más cerca están de la inestabilidad global del domo:

Descripción	Parámetro	Valor
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 1	BUCKLING065	16,62
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 2	BUCKLING066	17,36
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 3	BUCKLING043	17,45
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 4	BUCKLING044	18,26
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 5	BUCKLING082	20,14
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 6	BUCKLING004	20,45
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 7	BUCKLING063	20,56
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 8	BUCKLING083	21,36
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 9	BUCKLING064	21,51
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 10	BUCKLING039	21,93

Tabla 30. Casos Buckling más desfavorables para la inestabilidad global – Domo 1.

Como se puede observar ninguno de ellos es inferior al valor de 10. El más cercano es el caso BUCKLING065 que se corresponde con el caso de carga COMB065. Donde el viento de presión actúa como dominante el plano perpendicular a la puerta y empujando hacia el interior del domo, acompañado de la temperatura máxima como acciones variables no dominantes.

Por tanto, tras realizar esta comprobación podemos asegurar que no será necesaria la comprobación de los efectos de segundo orden por considerarse que serán poco significativos y no hay riesgo de estabilidad global, dando por concluido el dimensionamiento de la estructura en Estado Límite Último.

3.7. ESTADOS LÍMITE DE SERVICIO. DEFORMACIÓN DIFERIDA.

El estudio de las deformaciones se realiza bajo la combinación característica correspondiente al estado límite de servicio, según la siguiente expresión:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

La componente diferida de un desplazamiento, se determina a partir de la siguiente expresión:

$$\delta_{dif} = \delta_{ini} \cdot \psi_2 \cdot k_{def} \quad (7.1)$$

siendo:

δ_{ini} desplazamiento elástico;

ψ_2 coeficiente de simultaneidad que se obtiene de la tabla 4.2 del DB SE. Para las cargas permanentes, se adoptará $\psi_2=1$;

k_{def} factor de fluencia en función de la clase de servicio (véase tabla 7.1);

Tabla 7.1 Valores de k_{def} para madera y productos derivados de la madera

Material	Tipo de producto	Clase de servicio		
		1	2	3
Madera maciza		0,60	0,80	2,00
Madera laminada encolada		0,60	0,80	2,00
Madera microlaminada (LVL)		0,60	0,80	2,00

En la comprobación realizada cabe puntualizar el siguiente aspecto; la flecha diferida solo puede producirse para las cargas permanentes, por lo que, lo adecuado sería emplear la combinación de acciones casi permanente, sin embargo, se ha establecido utilizar la combinación de acciones característica para obtener valores de desplazamiento más restrictivos.

En primer lugar, definiremos los desplazamientos elásticos máximos de la estructura hallados del modelo de elementos finitos. Sin embargo, para obtener la flecha máxima del nudo deberemos de tener en cuenta los efectos de traslación de la estructura, es decir, deberemos de calcular la diferencia de desplazamiento entre el nudo con mayor valor absoluto junto con sus nodos adyacentes. Es decir, debemos de hallar la flecha relativa entre nudos para poder definir el desplazamiento elástico y poder aplicar la ecuación de la flecha diferida expresada en este epígrafe.

Se establece que la flecha máxima a cumplir será $L/250$ m/m, para el tipo de cerramiento utilizado. Se muestran los resultados obtenidos de las 3 direcciones principales de traslación U1, como ejes globales de "X", U2 corresponde con el eje global "Y" y U3 corresponde el desplazamiento en el eje "Z" o elevación de la estructura en el plano vertical.

Es evidente que la flecha que debiéramos comprobar sería la perpendicular al plano tangente al domo, este plano variará en función del nudo que estemos estudiando. A modo de unificar y teniendo en cuenta que los valores de flecha serán igual de restrictivos, se ha establecido que emplear las tres direcciones principales de los ejes globales de la estructura es suficiente para realizar esta comprobación.

Se muestran a continuación los resultados de la comprobación de estado límite de servicio:

Comprobación deformaciones en eje x - U1			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Deformación diferida desplazamiento U1			
Desplazamiento máximo del nodo - N°325	U1-N325	0,007	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 1	Ur1-N325	0,003	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 2	Ur1-N325	0,001	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 3	Ur1-N325	0,004	m
Factor de fluencia	Kdef	0,800	-
Desplazamiento diferido máximo	Udif	0,003	m
Longitud de la barra	L	1,640	m
Límite de flecha diferida (1/250)	U,r,lim	0,004	m/m
Flexa máxima en el nudo	U,max	0,007	m
Comprobación flecha diferida desplazamiento U1			
Comprobación			CUMPLE

Tabla 31. Comprobación de deformaciones en U1 - Domo 1.

Comprobación deformaciones en eje y - U2			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Deformación diferida desplazamiento U2			
Desplazamiento elástico del nodo - N°222	U2-N222	0,003	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 1	Ur2-N222	0,003	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 2	Ur2-N222	0,001	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 3	Ur2-N222	0,003	m
Factor de fluencia	Kdef	0,800	-
Desplazamiento elástico máximo	Ur,max	0,003	m
Longitud de la barra	L	0,700	m
Límite de flecha relativa (1/250)	U,r,lim	0,004	m/m
Flexa máxima en el nudo	U,max	0,003	m
Comprobación flecha diferida desplazamiento U2			
Comprobación			CUMPLE

Tabla 32. Comprobación de deformaciones en U2 - Domo 1.

Comprobación deformaciones en eje z - U3			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Deformación diferida desplazamiento U3			
Desplazamiento máximo del nodo	U3-N325	0,008	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 1	Ur3-N325	0,007	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 2	Ur3-N325	0,007	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 3	Ur3-N325	0,007	m
Factor de fluencia	Kdef	0,800	-
Desplazamiento elástico máximo	Ur,max	0,006	m
Longitud de la barra	L	1,380	m
Límite de flecha relativa (1/250)	U,r,lim	0,004	m/m
Flexa máxima en el nudo	U,max	0,007	m
Comprobación flecha diferida desplazamiento U3			
Comprobación			CUMPLE

Tabla 33. Comprobación de deformaciones en U3 - Domo 1.

3.8. DIMENSIONAMIENTO CIMENTACIÓN – DOMO 1

Para el dimensionamiento de la cimentación se ha empleado el software CYPECAD, en el cual, se han exportado los resultados de las reacciones obtenidas a partir del modelo de la estructura realizado en SAP2000.

El cálculo de las vigas de cimentación es un cálculo complejo puesto que la interacción entre el suelo y el cimiento depende de las condiciones de rigidez de ambos, algo difícil de determinar con exactitud. Por lo que, Cypecad calcula las vigas y losas de cimentación considerando que la deformación producida por la carga es común al terreno y al cimiento de valor proporcional a la carga aplicada. En este nivel de cálculo solo se considera la deformación del terreno bajo el cimiento, y no la del terreno adyacente afectado.

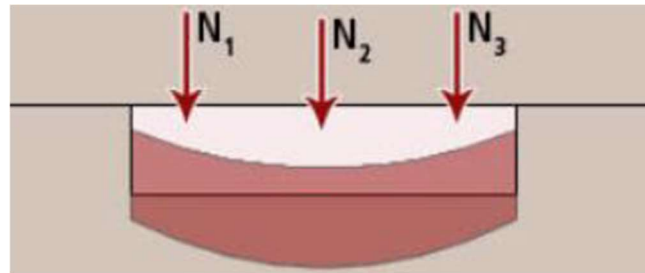


Ilustración 12. Deformación común en terreno y cimiento – Hipótesis de cálculo empleada por el software Cypecad.

Para ello, el software utiliza el método de balasto o de Winkler, y ofrece ágilmente resultados suficientes para dimensionar la obra de este proyecto, aunque hay que tomar con cautela los valores de los asientos y no aporta información sobre las deformaciones del terreno adyacente.

Para el modelo de cálculo de la cimentación se ha empleado una viga de cimentación perimetral apoyada directamente sobre el terreno. La forma de la cimentación del domo 1 es la siguiente:

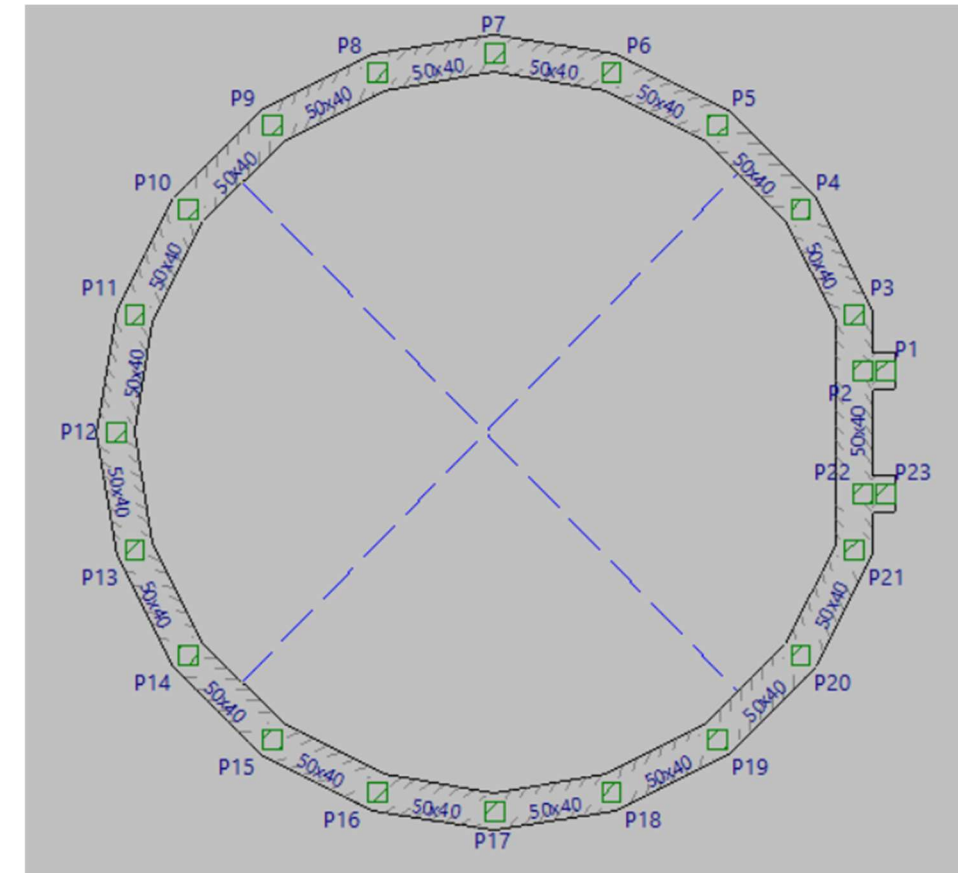


Ilustración 13. Ilustración del modelo de la cimentación en CYPECAD - Domo 1.

Se ha configurado en CYPECAD las mismas combinaciones de acciones elaboradas para el modelo de la estructura, por lo que, se han importado los datos de las reacciones sin ponderar a cada uno de los apoyos puntuales.

Dado que el proyecto carece de estudio geotécnico por ser académico, con base en el estudio geológico y en la experiencia de proyectos cercanos a las obras proyectadas se han estimado los siguientes datos de cálculo del terreno, considerando el terreno como un medio elástico:

- Resistencia del terreno en situaciones persistentes: 0,20 MPa
- Resistencia del terreno en situaciones sísmicas y accidentales: 0,30 MPa
- Módulo de balasto: 100000 kN/m³

La normativa de referencia para el cálculo de la cimentación utilizada ha sido el Código Estructural. Las comprobaciones de dimensionamiento se pueden observar en el Anexo 1: Comprobaciones de dimensionamiento de cimentación - Domo 1.

4. DIMENSIONAMIENTO DOMO 2

4.1. PROPIEDADES DE CÁLCULO DEL MATERIAL

Para el domo geodésico 2, se prevé que su canto sea inferior a 150 mm, por tanto, se le aplicará un factor de corrección de la altura k_h , que servirá para corregir los valores característicos de resistencia a flexión y a tracción paralela a la fibra principal. Y como sección resistente se tomará la sección 100x100 mm, por tanto, el valor del factor de altura a utilizar será el siguiente:

$$k_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2} < 1,3$$

Sustituyendo el valor de h, el canto de la pieza en flexión (100 mm):

$$k_h = \left(\frac{150}{100}\right)^{0,2} = 1,084 < 1,3$$

Se podrá incrementar en un 8,4% los valores de resistencia característica a flexión y tracción paralela.

Por otro lado, en cuanto a factores que afectan al comportamiento de la madera se tendrá en cuenta las clases de duración de la carga especificadas en la *Tabla 1* del presente anejo. Y para las obras proyectadas se determina que la clase de servicio que se debe de tener en cuenta para los cálculos es la clase 2, que se caracteriza por un contenido de humedad en la madera correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 85% unas pocas semanas al año.

Del mismo modo que para la estructura 1, el valor de cálculo de las propiedades del material del material se define como:

$$X_d = K_{mod} \cdot \left(\frac{X_k}{\gamma_M}\right)$$

Siendo:

X_k valor característico de la propiedad del material

γ_M coeficiente parcial de seguridad para la propiedad del material

K_{mod} factor de modificación, teniendo en cuenta la clase de duración de la combinación de carga y la clase de servicio

Utilizando como coeficiente parcial de seguridad del material, γ_M , un valor de 1,30, correspondiente a la madera maciza.

Mientras que, el valor de la capacidad de carga de cálculo referida a una unión o un sistema estructural, R_d , se define según la expresión:

$$R_d = K_{mod} \cdot \left(\frac{R_k}{\gamma_M}\right)$$

Los valores del factor de modificación K_{mod} que se aplicarán son los expuestos en la *Tabla 3* del presente anejo. En los casos de combinación de acciones donde se incluyan acciones pertenecientes a clase de duración diferentes, el factor k_{mod} que debe elegirse será al correspondiente a la acción de más corta duración. Que en la mayoría de los casos será el K_{mod} de corta duración, puesto que para el dimensionamiento la acción que es más determinante es la del viento.

Por último, se exponen las propiedades de cálculo del material en la siguiente tabla. Se empleará madera conífera aserrada de clase resistente C24 con una sección de 10 x 10 cm, por su uso común como material de construcción y su facilidad de encontrarla en el mercado.

Resistencia característica		(N/mm ²)
Flexión	$f_{m,k}$	26,03
Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	15,18
Tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,40
Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	22
Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,50
Cortante	$f_{v,k}$	4
Rigidez		kN/mm²

Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	11
Módulo de elasticidad paralelo percentil 5%	$E_{0,k}$	7,40
Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,medio}$	0,37
Módulo transversal medio	G_{medio}	0,69
Densidad		Kg/m³
Densidad característica	ρ_k	350
Densidad media	ρ_{medio}	420

Tabla 34. Propiedades características del material – Domo 2.

A continuación, se incluye una tabla resumen con los valores geométricos de la sección y el resumen de sus factores de corrección:

Descripción	Dato
Tipo de madera	C24
Clase de servicio	2
Canto (mm)	100
Ancho (mm)	100
Área (mm ²)	10.000
Factor de corrección de la altura K_h	1,084

Descripción	Dato
K_{mod} Permanente (PP+CM)	0,60
K_{mod} Media (SCU)	0,80
K_{mod} Corta (VP, VS, Tmax, Tmin, Nieve)	0,90
γ_M	1,30

Tabla 35. Resumen de parámetros y datos geométricos – Domo 2.

Se seguirán los principios generales del análisis estructural los especificados en el epígrafe 3.5 del presente anejo.

4.2. ESTADO LÍMITE ÚLTIMOS

4.2.1. PRINCIPIOS GENERALES

Se supone que las tensiones se orientan solamente según sus tres ejes principales según la siguiente figura:

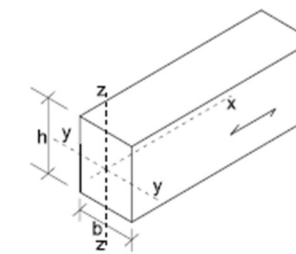


Ilustración 14. Ejes y dirección de la fibra en la pieza.

Para el análisis estructural se han debido de orientar todos los ejes locales de las barras de la estructura con respecto al centro del domo. Por hacer la equivalencia con el modelo de SAP2000, el eje local de la barra "x" se corresponde con el eje 1 local del programa, el eje "z" se corresponde con el eje 2, y el eje "y" con el eje local 3. La orientación de los ejes locales ha consistido en girar los ejes de tal forma que el eje z sea perpendicular a una línea recta que pase por el centro de gravedad de la pieza y el centro del domo geodésico en su origen de coordenadas (0, 0, 0). De esta manera, conseguimos orientar el canto de la pieza hacia el centro de la esfera.

4.2.2. COMPROBACIÓN A TRACCIÓN UNIFORME PARALELA A LA FIBRA

Debe de cumplirse la siguiente condición:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d}$$

siendo:

$\sigma_{t,0,d}$ tensión de cálculo a tracción paralela a la fibra;

$f_{t,0,d}$ resistencia de cálculo a tracción paralela a la fibra.

La máxima tensión de cálculo a tracción paralela se da bajo la combinación de acciones donde actúa el viento de succión como carga dominante. Esta carga se considera de corta duración y por tanto se aplica un valor de K_{mod} de 0,90 para minorar la resistencia. La tensión de tracción máxima se halla mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{t,0,d} = \left(\frac{N_d}{A_n} \right)$$

Suponiendo que las tensiones se reparten uniformemente en la superficie neta de la sección transversal de la pieza. La resistencia de cálculo a tracción paralela a la fibra se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$f_{t,0,d} = K_{mod} \cdot \left(\frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} \right)$$

A continuación, se exponen los datos de la comprobación:

Comprobación Tracción Uniforme paralela a la fibra			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a tracción de cálculo			
Resistencia característica a Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	15,18	MPa
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,90	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo a tracción paralela	$f_{t,0,d}$	10,51	MPa
Tensión a tracción de cálculo			
Axil a tracción máximo	N_d	9,51	kN
Área neta	A_n	10000,00	mm ²
Tensión de cálculo tracción paralela	$\sigma_{t,0,d}$	0,95	MPa
Comprobación de resistencia			
Comprobación			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			9%

Tabla 36. Comprobación de resistencia tracción uniforme paralela – Domo 2.

4.2.3. COMPROBACIÓN A TRACCIÓN UNIFORME PERPENDICULAR A LA FIBRA

Dado que la estructura se trata de una estructura triangulada con configuración esférica donde los esfuerzos axiles son mucho más significativos que el resto de esfuerzos, no aparece en ningún caso en ninguna de las uniones esfuerzos de tracción con componente normal a la fibra. Por lo que esta comprobación se da por cumplida al no existir tales tensiones.

4.2.4. COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN UNIFORME PARALELA A LA FIBRA

La comprobación de compresión paralela a la fibra debe de cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d}$$

siendo:

$\sigma_{c,0,d}$ tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra;

$f_{c,0,d}$ resistencia de cálculo a compresión paralela a la fibra.

Al igual que en el caso de tracción, se supone que la compresión se reparte uniformemente en la superficie neta de la sección transversal de la pieza. Aunque, en piezas comprimidas existe la posibilidad de inestabilidad o pandeo, pero esto se estudiará más adelante.

Por lo que, la tensión máxima a compresión se halla mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{c,0,d} = \left(\frac{N_d}{A_n} \right)$$

La resistencia de cálculo a compresión paralela a la fibra se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$f_{c,0,d} = K_{mod} \cdot \left(\frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} \right)$$

A continuación, se muestran los resultados de la comprobación:

Comprobación Compresión Uniforme paralela a la fibra			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a compresión de cálculo			
Resistencia característica a compresión paralela	$f_{c,0,k}$	22,00	MPa
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,90	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Tensión a compresión de cálculo			
Axil a compresión máximo	$C_{0,d}$	11,13	kN

Área neta	A_n	10000	mm ²
Tensión de cálculo a compresión paralela al a fibra	$\sigma_{c,0,d}$	1,11	MPa
Comprobación de resistencia			
Comprobación			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			7%

Tabla 37. Comprobación compresión uniforme paralela - Domo 2.

4.2.5. COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN UNIFORME PERPENDICULAR A LA FIBRA

Este tipo de esfuerzos suele producirse en el apoyo de vigas, durmientes o uniones, o cuando un área se encuentra aplastada por tensiones de compresión normales a la fibra transmitidas por otra viga o apoyo.

Este tipo de esfuerzos solo se dan en la estructura en dos situaciones diferentes; la primera que se analiza es en los elementos barra que tienen un apoyo continuo con la cimentación y se ven afectados por el peso del cerramiento. Estos elementos son los que se encuentran en las aristas inferiores de los triángulos de la primera fila en contacto con la cimentación. No obstante, la carga muerta transmitida a estas barras es muy poco significativa, puesto que se considera que su área tributaria es 1/3 del área del triángulo, y la carga transmitida por el cerramiento es ligera.

Por otro lado, si que se debe de comprobar la resistencia a la compresión perpendicular en el encuentro de las uniones. La forma de la unión hace que algunas de las piezas estén aplastando con su esfuerzo axil la cara superior del elemento inferior, es decir, el axil de una barra es una fuerza inclinada con una componente perpendicular a la fibra que afecta a la barra adyacente.

Se muestra un esquema de genérico del esfuerzo a compresión perpendicular descrito:

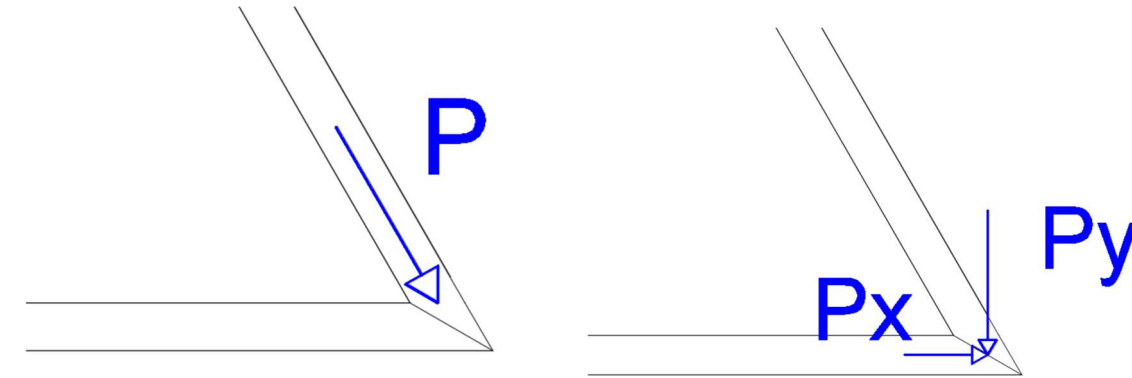


Ilustración 15. Descomposición del axil, componente vertical y horizontal – Domo 2.

Por tanto, para realizar dicha comprobación debemos de hallar la componente vertical P_y según la ilustración. Dado el axil de cálculo N_d , que es compartido por dos barras, el valor de P será la mitad del valor del axil de compresión de cálculo, que habrá que multiplicar por el coseno del ángulo que forma con la vertical para obtener su componente vertical perpendicular a la pieza inferior.

Cabe destacar que la carga P no solo está inclinada en el plano del triángulo tal como se ve en la figura, sino que también tiene una componente de inclinación en el plano perpendicular debido a la curvatura del domo, que también se habrá de tener en cuenta.

La comprobación de compresión perpendicular debe de cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}$$

siendo

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}}$$

Donde; $F_{c,90,d}$ es el valor de cálculo de la carga a compresión perpendicular a la fibra, y A_{ef} el área de contacto eficaz de dicha carga, $f_{c,90,d}$ es la resistencia de cálculo a compresión perpendicular y $k_{c,90}$ un factor que tiene en cuenta la distribución de la carga, la posibilidad de hienda y la deformación máxima por compresión perpendicular.

Los resultados de la comprobación se muestran en la siguiente tabla:

Comprobación Compresión Uniforme perpendicular a la fibra aplastamiento en triángulos			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a compresión perpendicular de cálculo			
Resistencia característica compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,5	MPa
Factor de modificación (Permanente)	K_{mod}	0,6	-

Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,90,d}$	1,44	MPa
Tensión a compresión perpendicular de cálculo			
Axil de compresión máximo en la barra	$C_{0,d}$	5,57	kN
Ángulo de P en el plano del triángulo	α	60	grados
Ángulo de P en el plano perpendicular	β	9	grados
Esfuerzo de compresión del elemento	$C_{\alpha,\beta,d}$	4,76	kN
Ancho	b	50	mm
Canto	h	100	mm
Área eficaz de contacto	A_n	5000	mm ²
Factor de distribución de carga	$K_{c,90}$	1,25	-
Tensión de cálculo a compresión perpendicular	$\sigma_{c,90,d}$	0,95	MPa
Comprobación de resistencia			
Comprobación			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			66,03%

Tabla 38. Comprobación de compresión perpendicular - Domo 2.

Se observa que cumple con la resistencia a compresión perpendicular, alcanzando el 66% de su resistencia en la barra más desfavorable de la estructura.

4.2.6. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN SIMPLE

La comprobación a flexión simple debe de cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$$

siendo:

$\sigma_{m,d}$ tensión de cálculo a flexión;

$f_{m,d}$ resistencia de cálculo a flexión.

Dada la forma circular de la estructura, los momentos flectores son igual de significativos para los dos ejes de flexión de la pieza. Por tanto, se comprobará la flexión simple en ambos ejes por separado.

Así pues, para cualquier sección solicitada por un momento flector la tensión originada será:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_d}{I_y} \cdot Z_{max}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_d}{I_z} \cdot y_{max}$$

Se muestra a continuación los resultados de la comprobación de la flexión en las dos direcciones:

Comprobación Flexión Simple			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a flexión simple de cálculo			
Resistencia característica flexión	$f_{m,k}$	26,03	MPa
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,90	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo a flexión simple	$f_{m,d}$	18,02	MPa
Tensión a flexión simple de cálculo			
Flexión de cálculo sobre eje y	$F_{s,d,y}$	0,66	kN.m
Flexión de cálculo sobre eje z	$F_{s,d,z}$	0,54	kN.m
Inercia respecto eje y	I_y	8333333,333	mm ⁴
Inercia respecto eje z	I_z	8333333,333	mm ⁴
Z max y	$Z_{,y}$	50	mm
Z max z	$Z_{,z}$	50	mm
Tensión de cálculo flexión eje y	$\sigma_{m,d,y}$	3,96	MPa
Tensión de cálculo flexión eje z	$\sigma_{m,d,z}$	3,23	MPa

Comprobación de resistencia	
Comprobación flexión eje y	CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia	21,97%
Comprobación flexión eje z	CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia	17,94%

Tabla 39. Comprobación a flexión simple en las dos direcciones principales. Domo 2.

4.2.7. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN ESVIADA

Esta comprobación es similar a la de flexión simple, pero suponiendo que ambos flectores máximos están actuando a la vez sobre una sección. Es decir, actúan los flectores en ambos planos principales de manera que la fibra neutra no coincide con ningún plano principal de inercia.

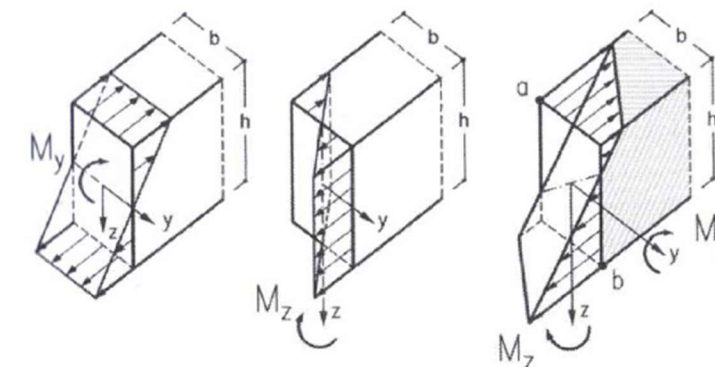


Ilustración 16. Esfuerzos de flexión esviada.

Para realizar esta comprobación deben de cumplirse a la vez las siguientes condiciones:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Siendo;

- $\sigma_{m,y,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje principal y, figura 6.1;
- $f_{m,y,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje principal y, figura 6.1;
- $\sigma_{m,z,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje principal z, figura 6.1;
- $f_{m,z,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje principal z, figura 6.1;
- k_m factor que tiene en cuenta el efecto de redistribución de tensiones y la falta de homogeneidad del material en la sección transversal y adopta los valores siguientes:
 - $k_m = 0,7$ para secciones rectangulares de madera maciza, madera laminada encolada y madera microlaminada; (6.10)
 - $k_m = 1,0$ para otras secciones y otros productos derivados de la madera (6.11)

Tomando los mismos valores de tensión calculados en flexión simple se obtienen los siguientes resultados para la comprobación:

Comprobación Flexión Esviada			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a flexión esviada de cálculo			
Resistencia característica flexión	$f_{m,k}$	26,03	MPa
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,90	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,30	-
Resistencia de cálculo a flexión eje y	$f_{m,y,d}$	18,02	MPa
Resistencia de cálculo a flexión eje z	$f_{m,y,z}$	18,02	MPa
Tensión a flexión esviada de cálculo			
Flexión de cálculo sobre eje y	$F_{s,d,y}$	0,66	kN.m
Flexión de cálculo sobre eje z	$F_{s,d,z}$	0,54	kN.m
Inercia respecto eje y	I_y	8333333,333	mm ⁴
Inercia respecto eje z	I_z	8333333,333	mm ⁴
Z max y	Z_y	50	mm
Z max z	Z_z	50	mm
factor redistribución de tensiones	K_m	0,7	-
Tensión de cálculo a flexión eje y	$\sigma_{m,y,d}$	3,96	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje z	$\sigma_{m,z,d}$	3,23	MPa
Comprobación de resistencia			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			33,32%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			34,53%

Tabla 40. Comprobación a flexión esviada. Domo 2.

4.2.8. COMPROBACIÓN A CORTANTE

En una viga simplemente apoyada se produce el fallo por cortante por el deslizamiento de las fibras en la zona central de la sección, donde tienen lugar las máximas tensiones tangenciales, en la sección próxima a los apoyos, donde suelen estar los cortantes máximos. Esto da a lugar un plano de rotura horizontal por rasante. Tal como se muestra en la siguiente ilustración:

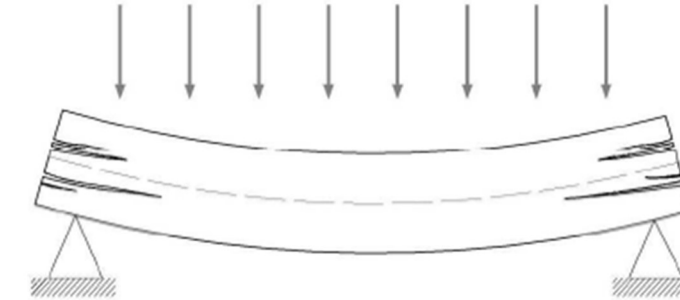


Ilustración 17. Fallo por cortante.

Para solicitaciones de cortante con una de las componentes paralela a la dirección de la fibra y para solicitaciones con ambas componentes perpendiculares a la dirección de la fibra debe de cumplirse la siguiente condición:

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

siendo:

- τ_d tensión de cálculo a cortante;
- $f_{v,d}$ resistencia de cálculo a cortante (corte paralelo o rodadura). La resistencia a cortante por rodadura podrá considerarse igual al doble de la resistencia a tracción perpendicular a la fibra.

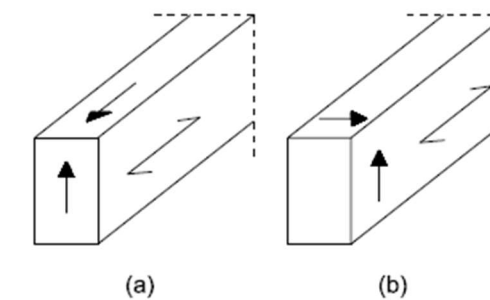


Figura 6.5 Tensiones de cortadura. a) corte paralelo. b) rodadura

Ilustración 18. Tensiones de cortadura.

Para una sección rectangular la ley de distribución de tensiones tangenciales es parabólica con su máximo en el centro que se calcula con la siguiente ecuación:

$$\tau_d = 1,5 \cdot \frac{V_d}{b \cdot h}$$

A continuación, se muestra la comprobación de resistencia a cortante para la barra más solicitada de la estructura.

Comprobación a cortante en el domo			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a cortante de cálculo			
Resistencia característica tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	MPa
Resistencia característica cortante	$f_{v,k,rodadura}$	0,8	MPa
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,90	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,30	-
Resistencia de cálculo a cortante	$f_{m,d}$	0,55	MPa
Tensión a cortante de cálculo			
Cortante de cálculo en eje y	V2	1,01	kN
Cortante de cálculo en eje z	V3	0,86	kN
Ancho en y	By	100	mm
Ancho en z	Bz	100	mm
Coeficiente reductor	kcr	0,67	-
Ancho eficaz en y	Bef,y	67	mm
Ancho eficaz en z	Bef,z	67	mm
Tensión de cálculo a cortante, y	$T_{v,y,d}$	0,23	MPa
Tensión de cálculo a cortante, z	$T_{v,z,d}$	0,19	MPa
Comprobación de resistencia			
Comprobación a cortante eje y			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			41%
Comprobación a cortante eje z			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			35%

Tabla 41. Comprobación a cortante de los elementos del domo 2.

4.2.9. COMPROBACIÓN A TORSIÓN

Se considera oportuno no realizar la comprobación a torsión en las piezas, puesto que el valor del torsor máximo alcanza un valor muy reducido de 0,12 KN.m. Además, dicho valor aparece por compatibilidad de deformaciones en la estructura, y, por tanto, se considera que cumpliría sobradamente con la resistencia a torsión.

4.2.10. COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN INCLINADA RESPECTO A LA FIBRA

Este tipo de solicitaciones se presenta en las uniones de la estructura, puesto que debido al tipo de unión *Good Kharma* todas las uniones presentan un corte oblicuo para el encaje de las piezas.

Como se ha descrito anteriormente, la resistencia a compresión de la madera depende de la dirección de la carga aplicada con respecto a la fibra, siendo mucho más resistente cuando esta es paralela a la fibra y más baja en la dirección perpendicular.

La variación en la resistencia según los ángulos de las cargas aplicadas viene dada por la expresión de Hankinson que recoge el CTE-SE-M:

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \text{sen}^2 \alpha + \text{cos}^2 \alpha}$$

En la expresión el valor de α corresponde con el ángulo que forma la tensión con la dirección de la fibra. Mientras que el resto de parámetros corresponden con la resistencia a compresión paralela $f_{c,0,d}$ y la resistencia a compresión perpendicular $f_{c,90,d}$.

Por tanto, se debe de cumplir la siguiente condición para realizar la comprobación de compresión inclinada:

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \text{sen}^2 \alpha + \text{cos}^2 \alpha}$$

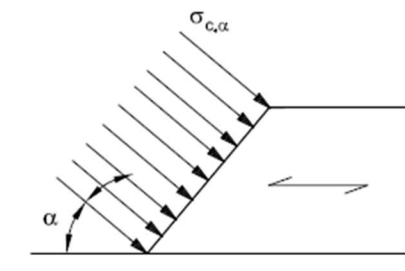


Figura 6.7. Compresión inclinada respecto a la fibra (ángulo α)

Completando los valores de la ecuación se obtienen los siguientes resultados:

Comprobación a compresión inclinada			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencias a compresión inclinada			
Resistencia cálculo compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Resistencia cálculo compresión perpendicular	$f_{c,90,d}$	1,15	MPa
Resistencia de cálculo a compresión inclinada	$f_{c,\alpha,d}$	1,50	MPa
Tensión de compresión inclinada			
Esfuerzo de compresión paralelo	$N_{c,0,d}$	5,57	kN
Esfuerzo de compresión perpendicular	$N_{c,90,d}$	2,41	kN
Ángulo de corte	α	30	grados
ancho	b	50	mm
canto	h	100	mm
Area inclinada (área en inglete cargada)	$A\alpha$	2887	mm ²
Hipotenusa (Longitud cargada)	L	28,87	m
Tensión de cálculo a compresión inclinada	$\sigma_{c,\alpha,d}$	0,84	MPa
Comprobación de resistencia			
Comprobación			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			56%

Tabla 42. Comprobación a compresión inclinada. Domo 2.

4.2.11. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN Y TRACCIÓN AXIAL COMBINADAS

Este apartado trata de comprobar la distribución de tensiones debidas a la superposición del axil de tracción más los flectores de las dos direcciones principales.

Para el análisis de las tensiones provocadas por dos momentos flectores y un axil en tracción se aplica la expresión siguiente:

$$\sigma = \frac{N_d}{A_n} + \frac{M_{y,d}}{W_y} + \frac{M_{z,d}}{W_z}$$

En este caso, existe un único punto de tensión máxima, cuya tensión será la suma de los valores absolutos de las tensiones parciales.

Para cumplir con esta comprobación deberá de validarse la siguiente condición:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Donde:

- $\sigma_{t,0,d}$ tensión de cálculo a tracción paralela;
- $f_{t,0,d}$ resistencia de cálculo a tracción paralela;
- $\sigma_{m,y,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje y;
- $f_{m,y,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje y;
- $\sigma_{m,z,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje z;
- $f_{m,z,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje z;
- k_m factor definido en el apartado 6.1.7.

Los resultados de la comprobación son los siguientes:

Comprobación a tracción y flexión esviada compuesta			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencias a tracción y flexión esviada			
Resistencia de cálculo a tracción paralela	$f_{t,0,d}$	10,51	MPa
Resistencia de cálculo respecto al eje y	$f_{m,d}$	18,02	MPa
Resistencia de cálculo a flexión respecto al eje z	$f_{m,z,d}$	18,02	MPa
Tensiones de tracción y flexión esviada			
Tensión de cálculo a tracción paralela	$\sigma_{t,0,d}$	0,95	MPa
Tensión de cálculo a flexión respecto eje Y	$\sigma_{m,d,y}$	3,96	MPa
Tensión de cálculo a flexión respecto al eje z	$\sigma_{m,z,d}$	3,96	MPa
Factor redistribución de tensiones	K_m	0,7	-

Comprobación de resistencia	
Comprobación 1	CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia	46%
Comprobación 2	CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia	46%

Tabla 43. Comprobación a tracción y flexión esviada – Domo 2.

4.2.12. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN AXIAL COMBINADAS

Del mismo modo que el caso anterior, se deben de cumplir las siguientes condiciones:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Donde;

$\sigma_{c,0,d}$	tensión de cálculo a compresión paralela;
$f_{c,0,d}$	resistencia de cálculo a compresión paralela;
$\sigma_{m,y,d}$	tensión de cálculo a flexión respecto al eje y;
$f_{m,y,d}$	resistencia de cálculo a flexión respecto al eje y;
$\sigma_{m,z,d}$	tensión de cálculo a flexión respecto al eje z;
$f_{m,z,d}$	resistencia de cálculo a flexión respecto al eje z;
K_m	factor definido en el apartado 6.1.7.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Comprobación a compresión y flexión esviada compuesta			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencias a compresión y flexión esviada			
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Resistencia de cálculo respecto al eje y	$f_{m,d}$	18,02	MPa
Resistencia de cálculo a flexión respecto al eje z	$f_{m,z,d}$	18,02	MPa
Tensiones de compresión y flexión esviada			
Tensión de cálculo a compresión paralela	$\sigma_{c,0,d}$	1,11	MPa
Tensión de cálculo a flexión respecto eje Y	$\sigma_{m,d,y}$	3,96	MPa
Tensión de cálculo a flexión respecto al eje z	$\sigma_{m,z,d}$	3,96	MPa
Factor redistribución de tensiones	K_m	0,7	-
Comprobación de resistencia			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			38%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			38%

Tabla 44. Comprobaciones de axil de compresión y flexión esviada. Domo 2.

4.2.13. COMPROBACIÓN DE ESTABILIDAD LOCAL DE PIEZAS

La comprobación a pandeo es la condición a cumplir más limitante de la estructura esférica del domo, y, por lo tanto, la que condiciona en mayor medida el dimensionamiento de la estructura. El pandeo de una pieza que se encuentra sometida a esfuerzos de compresión o flexocompresión es un fenómeno de inestabilidad por el que la pieza puede sufrir el fallo ante tensiones mucho más reducidas que las de la propia resistencia del material.

Según la formulación de Euler, existe una carga crítica que en el caso de ser superada se produce un equilibrio inestable o pandeo, con deslizamiento lateral creciente hasta la rotura. Esta carga crítica viene dada por la siguiente expresión:

$$P_{crit} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{L^2}$$

Esta formulación de Euler sirve para piezas ideales, en la práctica las piezas reales sobre todo en madera son anisótropas en cuanto a sus propiedades resistentes, falta de homogeneidad por la existencia de nudos o fendas, además de falta de rectitud y excentricidad de la carga.

Por lo que para las comprobaciones de pandeo se emplea la misma resistencia, pero reducida con un factor llamado coeficiente de pandeo χ , que reduce su valor en función de la esbeltez de la pieza.

El pandeo puede producirse en cualquiera de sus dos planos de inercia de la sección. Por lo que el análisis se realizará según los coeficientes de pandeos para cada uno de los dos planos.

Para realizar la comprobación de pandeo, primero, se deberá de hallar la esbeltez mecánica para cada uno de los dos planos de inercia.

La esbeltez mecánica del plano XZ, flectando respecto al eje y:

$$\lambda_y = \frac{L_{k,y}}{i_y}$$

La esbeltez mecánica del plano XY, flectando respecto al eje z:

$$\lambda_z = \frac{L_{k,z}}{i_z}$$

Siendo:

$L_{k,y}$ y $L_{k,z}$ longitudes de pandeo en los planos xz y xy, respectivamente.

$$L_{k,y} = \beta_y \cdot L$$

$$L_{k,z} = \beta_z \cdot L$$

L longitud del soporte o pieza;

β_y y β_z coeficientes que dependen de las condiciones de restricción de los extremos de la pieza para el movimiento en el plano xz y xy, respectivamente. Los valores de β para los casos más habituales pueden consultarse en el anejo G;

i_y e i_z radios de giro de la sección respecto a los ejes principales: y, z, respectivamente.

Dada la configuración del domo, donde todas sus barras están biarticuladas, se puede adoptar en el coeficiente β para ambos ejes el valor 1.

El radio de giro de la sección respecto a los ejes principales, se puede hallar mediante la siguiente ecuación:

$$i = \sqrt{\frac{\text{Inercia}}{\text{Área}}}$$

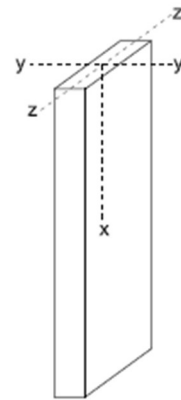


Ilustración 19. Ejes principales de la pieza comprimida, solicitada a compresión.

Por otro lado, se deberá de hallar la esbeltez relativa para cada uno de los planos de inercia por medio de las siguientes expresiones:

$$\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,y}}}$$

$$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,z}}}$$

siendo:

$$\sigma_{c,crit,y} = \pi^2 E_{0,k} / \lambda_y^2$$

$$\sigma_{c,crit,z} = \pi^2 E_{0,k} / \lambda_z^2$$

$E_{0,k}$ módulo de elasticidad paralelo a la fibra;

λ_y y λ_z esbelteces mecánicas.

Como hemos visto en la fórmula de Euler hay dos variables principales para el pandeo de la pieza. La longitud de la misma y su carga a compresión. Por tanto, nos basaremos en estas dos variables para realizar las comprobaciones a pandeo de las barras.

La comprobación de la estabilidad de piezas deberá de valorar dos situaciones de esfuerzos diferentes; la verificación de la estabilidad a compresión simple y a flexocompresión, como se muestra a continuación:

Comprobación de pandeo en compresión simple

Se deberá de cumplir las siguientes condiciones:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,y} f_{c,0,d}} \leq 1$$

Siendo:

$\sigma_{c,0,d}$ tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra;

$f_{c,0,d}$ resistencia de cálculo a compresión paralela a la fibra;

$\chi_{c,y}$, $\chi_{c,z}$ coeficientes de pandeo, obtenidos a partir de las siguientes expresiones

$$\chi_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad \text{análogo para } \chi_{c,z}$$

$$k_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad \text{análogo para } k_z$$

Comprobación de flexocompresión

Deberá de cumplirse las siguientes condiciones para comprobar la estabilidad de la pieza incluyendo la flexión esviada:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

siendo:

$\sigma_{c,0,d}$ tensión de cálculo a compresión paralela;

$f_{c,0,d}$ resistencia de cálculo a compresión paralela;

$\sigma_{m,y,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje y;

$f_{m,y,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje y;

$\sigma_{m,z,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje z;

$f_{m,z,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje z;

k_m factor definido en el apartado 6.1.7;

$k_m = 0,7$ (sección rectangular);

$\chi_{c,y}$ y $\chi_{c,z}$ coeficientes de pandeo según 6.3.2.2.

Para comprobar la estabilidad local de las piezas de la estructura; se harán las comprobaciones a pandeo pertinentes de la barra de mayor axil a compresión, posteriormente, la siguiente barra a verificar será aquella que teniendo un axil inmediatamente inferior al anterior también tenga una

longitud de la barra mayor, y, por tanto, una esbeltez más desfavorable. Se repetirá el proceso hasta comprobar la pieza con la mayor esbeltez y su máximo axil.

Por tanto, se realizarán 4 comprobaciones a 4 barras diferentes de la estructura según la premisa descrita en el párrafo anterior. Estas barras reúnen las siguientes características:

	Valor (kN)	Barra	Longitud (m)	Combinación
Axil,c,max 1	11,13	12-016	1,593	COMB049
Axil,c,max 2	8,30	12-030	1,640	COMB070
Axil,c,max 3	6,73	12-032	1,854	COMB088

Tabla 45. Barras a comprobar su estabilidad local – Domo 2.

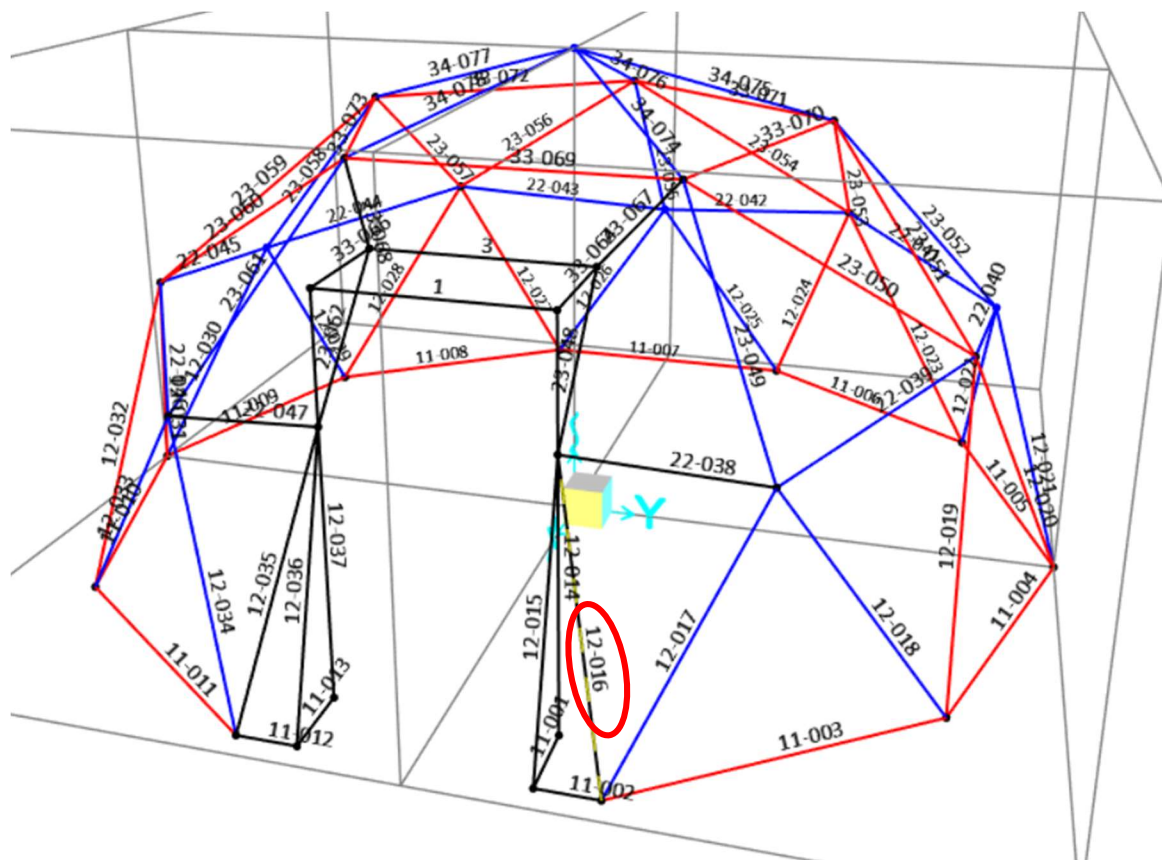


Ilustración 20. Barras con comprobación a pandeo local – Domo 2.

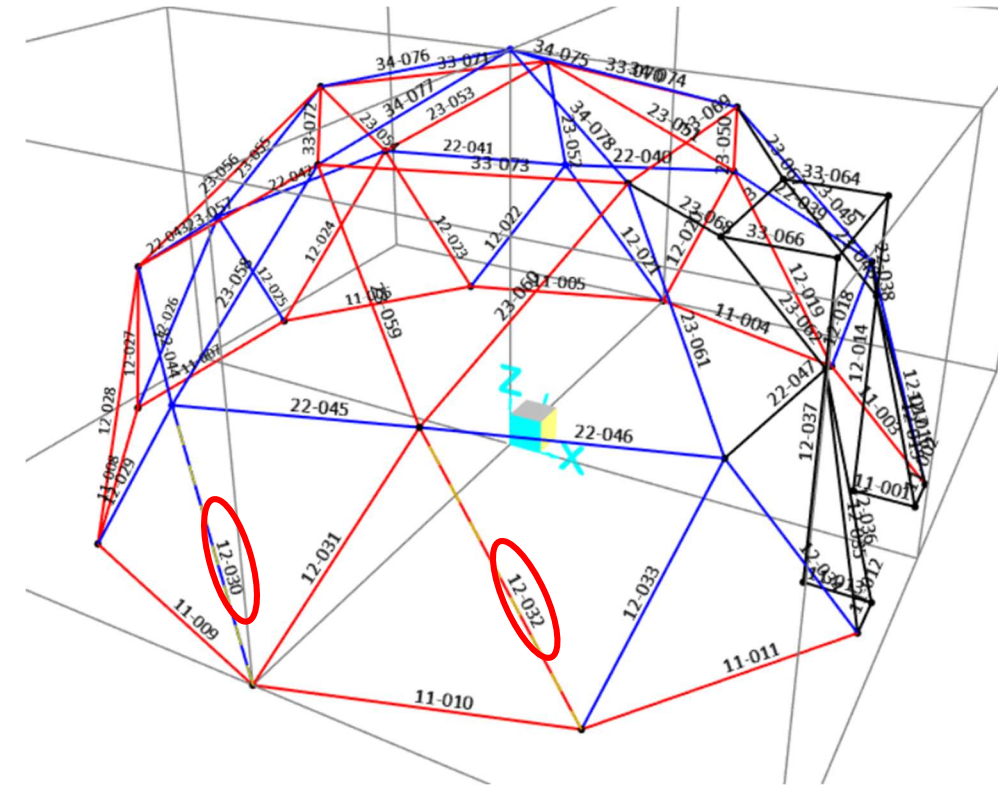


Ilustración 21. Barra con comprobación a pandeo local – Domo 2.

Comprobación de la barra 12-016
Comprobación de pandeo en la barra más cargada
12-016

Esbeltez mecánica y relativa - Barra 12-016			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Esbeltez mecánica			
Longitud de la pieza	L	1,593	m
Coef. de condiciones de restricción en y	β_y	1	-
Coef. de condiciones de restricción en z	β_z	1	-
Longitud de pandeo en plano xz	$L_{k,y}$	1,59	m
Longitud de pandeo en plano xy	$L_{k,z}$	1,59	m
Canto de la pieza	h	100	mm
Ancho de la pieza	b	100	mm
Inercia respecto el eje y	I_y	8333333	mm ⁴
Inercia respecto el eje z	I_z	8333333	mm ⁴
Reducción del área por pretaladro y tirafondo (d=8mm)	Atirafondo	50	mm ²
Área eficaz	A	9950	mm ²
Radio de giro en y	i_y	28,94	mm
Radio de giro en z	i_z	28,94	mm
Esbeltez mecánica en el plano xz	λ_y	55,05	-
Esbeltez mecánica en el plano xy	λ_z	55,05	-
Esbeltez relativa			
Resistencia a compresión característica	$f_{c,0,k}$	22	Mpa
Modulo de elasticidad paralelo a la fibra	$E_{0,k}$	7,4	kN/mm ²
Tensión de compresión crítica en plano xz	$\sigma_{c,crit,y}$	24,10	MPa
Tensión de compresión crítica en plano xy	$\sigma_{c,crit,z}$	24,10	MPa
Esbeltez relativa en plano xz	$\lambda_{rel,y}$	0,96	-
Esbeltez relativa en plano xy	$\lambda_{rel,z}$	0,96	-

Tabla 46. Esbelteces mecánicas y relativas en barra 12-016- Domo 2.

Estabilidad de piezas - compresión simple - barra 12-016			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Estabilidad en compresión simple			
Axil de compresión máximo	$C_{0,d}$	11,13	kN
Área neta	A_n	9950	mm ²
Tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0,d}$	1,12	MPa
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Factor asociado a la rectitud de las piezas	β_c	0,20	-
	k_y	1,02	-
	k_z	1,02	-
Coeficiente de pandeo en y	$\chi_{c,y}$	0,722	-
Coeficiente de pandeo en z	$\chi_{c,z}$	0,722	-
Comprobación de estabilidad en compresión simple			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			10%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			10%

Tabla 47. Comprobación de la estabilidad local en compresión simple Barra 12-016. Domo 2.

Estabilidad de piezas - flexocompresión - barra 12-016			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Estabilidad en flexocompresión			
Tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0,d}$	1,12	MPa
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Coeficiente de pandeo en y	$\chi_{c,y}$	0,722	-
Coeficiente de pandeo en z	$\chi_{c,z}$	0,722	-
Resistencia de cálculo a flexión simple eje y	$f_{m,y,d}$	18,02	MPa
Resistencia de cálculo a flexión simple eje z	$f_{m,z,d}$	18,02	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje y	$\sigma_{m,y,d}$	3,96	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje z	$\sigma_{m,z,d}$	3,23	MPa
Factor de redistribución de tensiones	K_m	0,7	-
Comprobación de flexocompresión			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			44,70%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			43,50%

Tabla 48. Comprobación de la estabilidad local en flexocompresión Barra 12-016. Domo 2.

Comprobación de la barra 12-030

Esbeltz mecánica y relativa- Barra 12-030			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Esbeltz mecánica			
Longitud de la pieza	L	1,640	m
Coef. de condiciones de restricción en y	β_y	1	-
Coef. de condiciones de restricción en z	β_z	1	-
Longitud de pandeo en plano xz	$L_{k,y}$	1,64	m
Longitud de pandeo en plano xy	$L_{k,z}$	1,64	m
Canto de la pieza	h	100	mm
Ancho de la pieza	b	100	mm
Inercia respecto el eje y	I_y	8333333	mm ⁴
Inercia respecto el eje z	I_z	8333333	mm ⁴
Reducción del área por pretaladro y tirafondo (d=8mm)	Atirafondo	50	mm ²
Área eficaz	A	9950	mm ²
Radio de giro en y	i_y	28,94	mm
Radio de giro en z	i_z	28,94	mm
Esbeltz mecánica en el plano xz	λ_y	56,65	-
Esbeltz mecánica en el plano xy	λ_z	56,65	-
Esbeltz relativa			
Resistencia a compresión característica	$f_{c,0,k}$	22	Mpa
Modulo de elasticidad paralelo a la fibra	$E_{0,k}$	7,4	kN/mm ²
Tensión de compresión crítica en plano xz	$\sigma_{c,crit,y}$	22,75	MPa
Tensión de compresión crítica en plano xy	$\sigma_{c,crit,z}$	22,75	MPa
Esbeltz relativa en plano xz	$\lambda_{rel,y}$	0,98	-
Esbeltz relativa en plano xy	$\lambda_{rel,z}$	0,98	-

Tabla 49. Esbeltz mecánicas y relativas en barra 12-030- Domo 2.

Estabilidad de piezas - compresión simple - Barra 12-030			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Estabilidad en compresión simple			
Axil de compresión máximo	$C_{0,d}$	8,30	kN
Área neta	A_n	9950	mm ²
Tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0,d}$	0,83	MPa
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Factor asociado a la rectitud de las piezas	β_c	0,20	-
	k_y	1,05	-
	k_z	1,05	-
Coeficiente de pandeo en y	$\chi_{c,y}$	0,702	-
Coeficiente de pandeo en z	$\chi_{c,z}$	0,702	-
Comprobación de estabilidad en compresión simple			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			8%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			8%

Tabla 50. Comprobación de la estabilidad local en compresión simple Barra 12-030. Domo 2.

Estabilidad de piezas - flexocompresión - Barra 12-030			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Estabilidad en flexocompresión			
Tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0,d}$	0,83	MPa
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Coeficiente de pandeo en y	$\chi_{c,y}$	0,702	-
Coeficiente de pandeo en z	$\chi_{c,z}$	0,702	-
Resistencia de cálculo a flexión simple eje y	$f_{m,y,d}$	18,02	MPa
Resistencia de cálculo a flexión simple eje z	$f_{m,z,d}$	18,02	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje y	$\sigma_{m,y,d}$	3,96	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje z	$\sigma_{m,z,d}$	3,23	MPa
Factor de redistribución de tensiones	K_m	0,7	-
Comprobación de flexocompresión			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			42,33%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			41,13%

Tabla 51. Comprobación de la estabilidad local en flexocompresión Barra 12-030. Domo 2.

Comprobación de la barra 12-032

Esbeltz mecánica y relativa - Barra 12-032			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Esbeltz mecánica			
Longitud de la pieza	L	1,854	m
Coef. de condiciones de restricción en y	β_y	1	-
Coef. de condiciones de restricción en z	β_z	1	-
Longitud de pandeo en plano xz	$L_{k,y}$	1,85	m
Longitud de pandeo en plano xy	$L_{k,z}$	1,85	m
Canto de la pieza	h	100	mm
Ancho de la pieza	b	100	mm
Inercia respecto el eje y	I_y	8333333	mm ⁴
Inercia respecto el eje z	I_z	8333333	mm ⁴
Reducción del área por pretaladro y tirafondo (d=8mm)	Atirafondo	50	mm ²
Área eficaz	A	9950	mm ²
Radio de giro en y	i_y	28,94	mm
Radio de giro en z	i_z	28,94	mm
Esbeltz mecánica en el plano xz	λ_y	64,07	-
Esbeltz mecánica en el plano xy	λ_z	64,07	-
Esbeltz relativa			
Resistencia a compresión característica	$f_{c,0,k}$	22	Mpa
Modulo de elasticidad paralelo a la fibra	$E_{0,k}$	7,4	kN/mm ²
Tensión de compresión crítica en plano xz	$\sigma_{c,crit,y}$	17,79	MPa
Tensión de compresión crítica en plano xy	$\sigma_{c,crit,z}$	17,79	MPa
Esbeltz relativa en plano xz	$\lambda_{rel,y}$	1,11	-
Esbeltz relativa en plano xy	$\lambda_{rel,z}$	1,11	-

Tabla 52. Esbeltz mecánicas y relativas en barra 12-032- Domo 2.

Estabilidad de piezas - compresión simple - Barra 12-032			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Estabilidad en compresión simple			
Axil de compresión máximo	$C_{0,d}$	6,73	kN
Área neta	A_n	9950	mm ²
Tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0,d}$	0,68	MPa
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Factor asociado a la rectitud de las piezas	β_c	0,20	-
	k_y	1,20	-
	k_z	1,20	-
Coeficiente de pandeo en y	$\chi_{c,y}$	0,606	-
Coeficiente de pandeo en z	$\chi_{c,z}$	0,606	-
Comprobación de estabilidad en compresión simple			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			7%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			7%

Tabla 53. Comprobación de la estabilidad local en compresión simple Barra 12-032. Domo 2.

Estabilidad de piezas - flexocompresión - Barra 12-032			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Estabilidad en flexocompresión			
Tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0,d}$	0,68	MPa
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Coeficiente de pandeo en y	$\chi_{c,y}$	0,606	-
Coeficiente de pandeo en z	$\chi_{c,z}$	0,606	-
Resistencia de cálculo a flexión simple eje y	$f_{m,y,d}$	18,02	MPa
Resistencia de cálculo a flexión simple eje z	$f_{m,z,d}$	18,02	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje y	$\sigma_{m,y,d}$	3,96	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje z	$\sigma_{m,z,d}$	3,23	MPa
Factor de redistribución de tensiones	K_m	0,7	-
Comprobación de flexocompresión			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			41,85%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			40,64%

Tabla 54. Comprobación de la estabilidad local en flexocompresión Barra 12-032. Domo 2.

4.2.14. COMPROBACIÓN DE ESTABILIDAD GLOBAL DE PIEZAS

La comprobación de la estabilidad global de la estructura puede ser la comprobación más importante para el dimensionamiento de cualquier domo geodésico. Como hemos visto en el epígrafe anterior, el pandeo local de la barra es la comprobación que condiciona el dimensionamiento, pero en la práctica, el pandeo local de una de las barras no generaría el colapso de la estructura.

El efecto que produciría el colapso de la estructura será el fallo de su estabilidad global, es decir, del pandeo global de su geometría. Estudiar esto induciría a realizar un análisis de segundo orden, teniendo en cuenta la influencia de la deformación de la estructura.

En general, podemos obtener las solicitaciones de la estructura por dos metodologías diferentes:

- El análisis de primer orden, con la geometría inicial de la estructura, que es el caso que se ha realizado hasta ahora.
- El análisis de segundo orden, teniendo en cuenta la influencia de la deformación de la estructura.

Los efectos de la geometría deformada (efectos de segundo orden) deben tenerse en cuenta si estos incrementarían significativamente los efectos de las acciones o modificaría significativamente el comportamiento estructural del domo.

Por tanto, este incremento de las solicitaciones o cualquier otro cambio en el comportamiento estructural producido por las deformaciones podrá despreciarse, es decir, el diseño sería válido con un análisis de primer orden en la estructura, si se cumple el siguiente criterio:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \rightarrow \text{Para el análisis elástico}$$

donde:

- α_{cr} Es el coeficiente por el que es necesario multiplicar las cargas de cálculo para producir una inestabilidad elástica del modo de pandeo global e la estructura.
- F_{Ed} Es la carga de cálculo que actúa sobre la estructura
- F_{cr} Es la carga crítica de pandeo elástico que produce una inestabilidad del modo de pandeo global, calculada con las rigideces elásticas iniciales.

Para realizar el cálculo del coeficiente α_{cr} se ha empleado el modelo de la estructura en el software SAP2000, donde se han creado casos de carga tipo Buckling que relacionan el esfuerzo de cálculo con la carga crítica de pandeo que produce la inestabilidad global.

A priori, se puede suponer que aquellos casos de carga que proporcionen mayor compresión a la estructura serán los que producirán la inestabilidad global. No obstante, para cada una de las combinaciones de acciones calculadas en ELU se ha creado un caso Buckling de dicha combinación, es decir, se han creado 141 casos de carga nuevos. Exportando los datos, obtenemos la siguiente tabla con los 10 menores coeficientes, y, por tanto, las combinaciones que más cerca están de la inestabilidad global del domo:

CASOS DE CARGA BUCKLING - ESTABILIDAD GLOBAL		
Descripción	Parámetro	Valor
CASOS BUCKLING - COEFICIENTE DE INESTABILIDAD GLOBAL		
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 1	BUCKLING039	14,28
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 2	BUCKLING055	15,66
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 3	BUCKLING045	15,78
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 4	BUCKLING053	15,99
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 5	BUCKLING043	16,22
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 6	BUCKLING051	17,05
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 7	BUCKLING040	17,13
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 8	BUCKLING059	17,23
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 9	BUCKLING061	17,68
Coeficiente más desfavorable para la estabilidad global 10	BUCKLING015	18,04

Tabla 55. Casos Buckling más desfavorables para la inestabilidad global – Domo 2.

Como se puede observar ninguno de ellos es inferior al valor de 10. El más cercano es el caso BUCKLING039 que se corresponde con el caso de carga COMB039. La acción dominante es la sobrecarga de uso 2, acompañado de dos acciones no dominantes como el viento de presión que actúa en el plano perpendicular a la puerta y empujando hacia el interior del domo y la temperatura máxima.

Por tanto, tras realizar esta comprobación podemos asegurar que no será necesaria la comprobación de los efectos de segundo orden por considerarse que serán poco significativos y no hay riesgo de estabilidad global, dando por concluido el dimensionamiento de la estructura en Estado Límite Último. Con una sección nominal cuadrada de 10 x 10 cm para todas las barras de la estructura.

4.3. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO. DEFORMACIÓN DIFERIDA

El estudio de las deformaciones se realiza bajo la combinación característica correspondiente al estado límite de servicio, según la siguiente expresión:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

La componente diferida de un desplazamiento, se determina a partir de la siguiente expresión:

$$\delta_{dif} = \delta_{ini} \cdot \psi_2 \cdot k_{def} \quad (7.1)$$

siendo:

δ_{ini} desplazamiento elástico;

ψ_2 coeficiente de simultaneidad que se obtiene de la tabla 4.2 del DB SE. Para las cargas permanentes, se adoptará $\psi_2=1$;

k_{def} factor de fluencia en función de la clase de servicio (véase tabla 7.1);

Tabla 7.1 Valores de k_{def} para madera y productos derivados de la madera

Material	Tipo de producto	Clase de servicio		
		1	2	3
Madera maciza		0,60	0,80	2,00
Madera laminada encolada		0,60	0,80	2,00
Madera microlaminada (LVL)		0,60	0,80	2,00

En la comprobación realizada cabe puntualizar el siguiente aspecto; la flecha diferida solo puede producirse para las cargas permanentes, por lo que, lo adecuado sería emplear la combinación de acciones casi permanente, sin embargo, se ha establecido utilizar la combinación de acciones característica para obtener valores de desplazamiento más restrictivos.

En primer lugar, definiremos los desplazamientos elásticos máximos de la estructura hallados del modelo de elementos finitos. Sin embargo, para obtener la flecha máxima del nudo deberemos de tener en cuenta los efectos de traslación de la estructura, es decir, deberemos de calcular la diferencia de desplazamiento entre el nudo con mayor valor absoluto junto con sus nodos adyacentes. Es decir, debemos de hallar la flecha relativa entre nudos para poder definir el desplazamiento elástico y poder aplicar la ecuación de la flecha diferida expresada en este epígrafe.

Se define que la flecha máxima a cumplir será $L/250$ m/m. Se muestran los resultados obtenidos de las 3 direcciones principales de traslación U1, como ejes globales de X, U2 corresponde con el eje global Y, y U3 corresponde el desplazamiento en el eje Z o elevación de la estructura en el plano vertical.

Es evidente que la flecha que debiéramos comprobar sería la perpendicular al plano tangente al domo, este plano variará en función del nudo que estemos estudiando. A modo de unificar y teniendo en cuenta que los valores de flecha serán igual de restrictivos, se ha establecido que emplear las tres direcciones principales de los ejes globales de la estructura es suficiente para realizar esta comprobación.

Se muestran a continuación los resultados de la comprobación de estado límite de servicio:

Comprobación deformaciones en eje x - U1			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Deformación diferida desplazamiento U1			
Desplazamiento máximo del nodo	U1-N26	0,003	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 1	Ur1-N26	0,002	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 2	Ur1-N26	0,001	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 3	Ur1-N26	0,001	m
Factor de fluencia	Kdef	0,800	-
Desplazamiento diferido máximo	Udif	0,001	m
Longitud de la barra	L	1,640	m
Límite de flecha relativa (1/250)	U,r,lim	0,004	m/m
Flexa máxima en el nodo	U,max	0,007	m
Comprobación flecha diferida desplazamiento U1			
Comprobación			CUMPLE

Tabla 56. Comprobación de deformaciones en U1 - Domo 2.

Comprobación deformaciones en eje y - U2			
Deformación diferida desplazamiento U2			
Desplazamiento elástico del nodo - N°222	U2-N28	0,001	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 1	Ur2-N28	0,001	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 2	Ur2-N28	0,000	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 3	Ur2-N28	0,001	m
Factor de fluencia	Kdef	0,800	-
Desplazamiento elástico máximo	Ur,max	0,001	m
Longitud de la barra	L	0,700	m
Límite de flecha relativa (1/250)	U,r,lim	0,004	m/m
Flexa máxima en el nodo	U,max	0,003	m
Comprobación flecha diferida desplazamiento U2			
Comprobación			CUMPLE

Tabla 57. Comprobación de deformaciones en U2 - Domo 2.

Comprobación deformaciones en eje z - U3			
Deformación diferida desplazamiento U3			
Desplazamiento máximo del nodo	U3-N27	0,002	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 1	Ur3-N27	0,001	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 2	Ur3-N27	0,001	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 3	Ur3-N27	0,001	m
Factor de fluencia	Kdef	0,800	-
Desplazamiento elástico máximo	Ur,max	0,001	m
Longitud de la barra	L	1,380	m
Límite de flecha relativa (1/250)	U,r,lim	0,004	m/m
Flexa máxima en el nodo	U,max	0,007	m
Comprobación flecha diferida desplazamiento U3			
Comprobación			CUMPLE

Tabla 58. Comprobación de deformaciones en U3 - Domo 2.

4.4. DIMENSIONAMIENTO CIMENTACIÓN DOMO 2

Para el dimensionamiento de la cimentación se ha empleado el software CYPECAD, en el cual, se han exportado los resultados de las reacciones obtenidas a partir del modelo de la estructura realizado en SAP2000.

Para el modelo de cálculo de la cimentación se ha empleado una viga de cimentación perimetral apoyada directamente sobre el terreno. La forma de la cimentación del domo 2 es la siguiente:

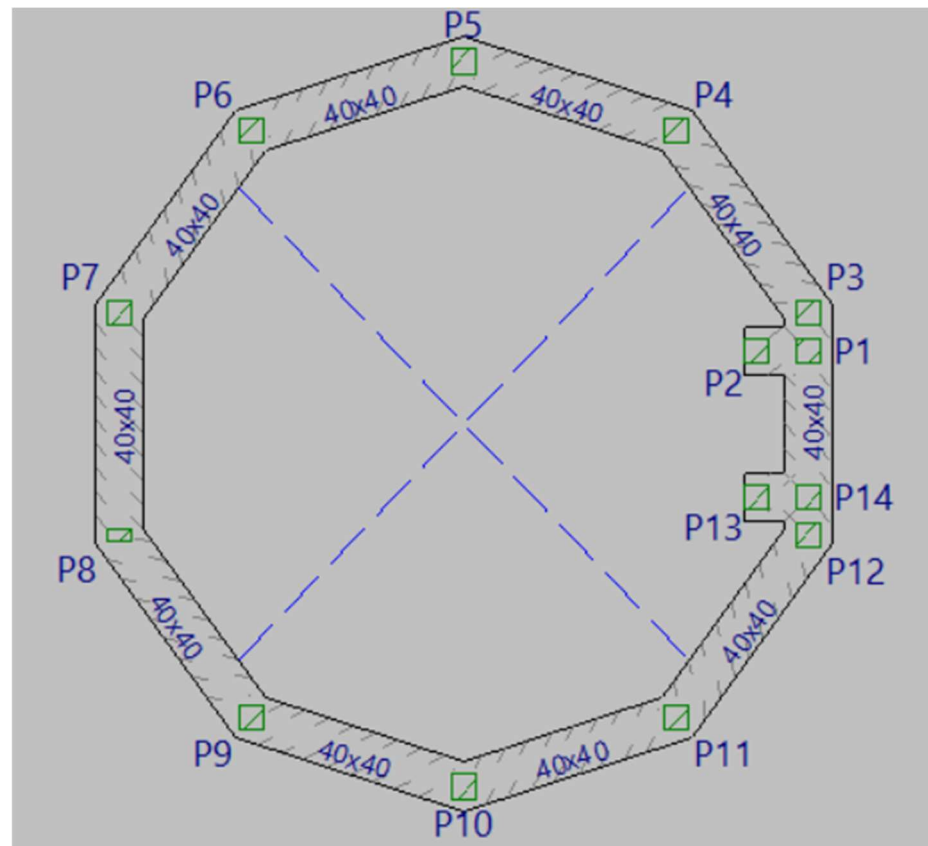


Ilustración 22. Ilustración del modelo de la cimentación en CYPECAD - Domo 2.

Se ha configurado en CYPECAD las mismas combinaciones de acciones elaboradas para el modelo de la estructura, por lo que, se han importado los datos de las reacciones sin ponderar a cada uno de los apoyos puntuales.

Dado que el proyecto carece de estudio geotécnico por ser académico, con base en el estudio geológico y en la experiencia de proyectos cercanos a las obras proyectadas se han estimado los siguientes datos de cálculo del terreno, considerando el terreno como un medio elástico:

- Resistencia del terreno en situaciones persistentes: 0,20 MPa

- Resistencia del terreno en situaciones sísmicas y accidentales: 0,30 MPa
- Módulo de balasto: 100000 kN/m³

La normativa de referencia para el cálculo de la cimentación utilizada ha sido el Código Estructural. Las comprobaciones de dimensionamiento se pueden observar en el Anexo 2: Comprobaciones de dimensionamiento de cimentación - Domo 2.

5. DIMENSIONAMIENTO DOMO 3

5.1. PROPIEDADES DE CÁLCULO DEL MATERIAL

Para el domo geodésico 3, se prevé que su canto sea inferior a 150 mm, por tanto, se le aplicará un factor de corrección de la altura k_h , que servirá para corregir los valores característicos de resistencia a flexión y a tracción paralela a la fibra principal. Y como sección resistente se tomará la sección 140x140 mm, por tanto, el valor del factor de altura a utilizar será el siguiente:

$$k_h = \left(\frac{150}{h}\right)^{0,2} < 1,3$$

Sustituyendo el valor de h, el canto de la pieza en flexión (100 mm):

$$k_h = \left(\frac{150}{140}\right)^{0,2} = 1,014 < 1,3$$

Se podrá incrementar en un 1,4% los valores de resistencia característica a flexión y tracción paralela.

Por otro lado, en cuanto a factores que afectan al comportamiento de la madera se tendrá en cuenta las clases de duración de la carga especificadas en la *Tabla 1* del presente anejo. Y para las obras proyectadas se determina que la clase de servicio que se debe de tener en cuenta para los cálculos es la clase 2, que se caracteriza por un contenido de humedad en la madera correspondiente a una temperatura de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ y una humedad relativa del aire que sólo exceda el 85% unas pocas semanas al año.

Del mismo modo que para la estructura 1, el valor de cálculo de las propiedades del material del material se define como:

$$X_d = K_{mod} \cdot \left(\frac{X_k}{\gamma_M}\right)$$

Siendo:

X_k valor característico de la propiedad del material

γ_M coeficiente parcial de seguridad para la propiedad del material

K_{mod} factor de modificación, teniendo en cuenta la clase de duración de la combinación de carga y la clase de servicio

Utilizando como coeficiente parcial de seguridad del material, γ_M , un valor de 1,30, correspondiente a la madera maciza.

Mientras que, el valor de la capacidad de carga de cálculo referida a una unión o un sistema estructural, R_d , se define según la expresión:

$$R_d = K_{mod} \cdot \left(\frac{R_k}{\gamma_M}\right)$$

Los valores del factor de modificación K_{mod} que se aplicarán son los expuestos en la *Tabla 3* del presente anejo. En los casos de combinación de acciones donde se incluyan acciones pertenecientes a clase de duración diferentes, el factor k_{mod} que debe elegirse será al correspondiente a la acción de más corta duración. Que en la mayoría de los casos será el K_{mod} de corta duración, puesto que para el dimensionamiento la acción que es más determinante es la del viento.

Por último, se exponen las propiedades de cálculo del material en la siguiente tabla. Se empleará madera conífera aserrada de clase resistente C24 con una sección de 10 x 10 cm, por su uso común como material de construcción y su facilidad de encontrarla en el mercado.

Resistencia característica		(N/mm ²)
Flexión	$f_{m,k}$	24,33
Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	14,19
Tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,40
Compresión paralela	$f_{c,0,k}$	22
Compresión perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,50
Cortante	$f_{v,k}$	4
Rigidez		kN/mm²

Módulo de elasticidad paralelo medio	$E_{0,medio}$	11
Módulo de elasticidad paralelo 5º-percentil	$E_{0,k}$	7,40
Módulo de elasticidad perpendicular medio	$E_{90,medio}$	0,37
Módulo transversal medio	G_{medio}	0,69
Densidad		
		Kg/m³
Densidad característica	ρ_k	350
Densidad media	ρ_{medio}	420

Tabla 59. Propiedades características del material – Domo 3.

A continuación, se incluye una tabla resumen con los valores geométricos de la sección y el resumen de sus factores de corrección:

Descripción	Dato
Tipo de madera	C24
Clase de servicio	2
Canto (mm)	140
Ancho (mm)	140
Área (mm ²)	19.600
Factor de corrección de la altura K_h	1,014

Descripción	Dato
K_{mod} Permanente (PP+CM)	0,60
K_{mod} Media (SCU)	0,80
K_{mod} Corta (VP, VS, Tmax, Tmin, Nieve)	0,90
γ_M	1,30

Tabla 60. Resumen de parámetros y datos geométricos – Domo 3.

Se seguirán los principios generales del análisis estructural los especificados en el epígrafe 3.5 del presente anejo.

5.2. ESTADO LÍMITE ÚLTIMOS

5.2.1. PRINCIPIOS GENERALES

Se supone que las tensiones se orientan solamente según sus tres ejes principales según la siguiente figura:

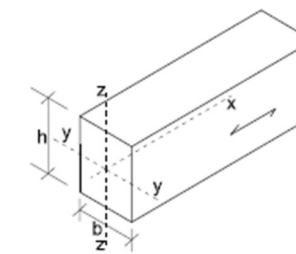


Ilustración 23. Ejes y dirección de la fibra en la pieza.

Para el análisis estructural se han debido de orientar todos los ejes locales de las barras de la estructura con respecto al centro del domo. Por hacer la equivalencia con el modelo de SAP2000, el eje local de la barra "x" se corresponde con el eje 1 local del programa, el eje "z" se corresponde con el eje 2, y el eje "y" con el eje local 3. La orientación de los ejes locales ha consistido en girar los ejes de tal forma que el eje z sea perpendicular a una línea recta que pase por el centro de gravedad de la pieza y el centro del domo geodésico en su origen de coordenadas (0, 0, 0). De esta manera, conseguimos orientar el canto de la pieza hacia el centro de la esfera.

5.2.2. COMPROBACIÓN A TRACCIÓN UNIFORME PARALELA A LA FIBRA

Debe de cumplirse la siguiente condición:

$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d}$$

siendo:

$\sigma_{t,0,d}$ tensión de cálculo a tracción paralela a la fibra;

$f_{t,0,d}$ resistencia de cálculo a tracción paralela a la fibra.

La máxima tensión de cálculo a tracción paralela se da bajo la combinación de acciones donde actúa el viento de succión como carga dominante. Esta carga se considera de corta duración y por tanto se aplica un valor de K_{mod} de 0,90 para minorar la resistencia.

La tensión de tracción máxima se halla mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{t,0,d} = \left(\frac{N_d}{A_n} \right)$$

Suponiendo que las tensiones se reparten uniformemente en la superficie neta de la sección transversal de la pieza.

La resistencia de cálculo a tracción paralela a la fibra se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$f_{t,0,d} = K_{mod} \cdot \left(\frac{f_{t,0,k}}{\gamma_M} \right)$$

A continuación, se exponen los datos de la comprobación:

Comprobación Tracción Uniforme paralela a la fibra			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a tracción de cálculo			
Resistencia característica a Tracción paralela	$f_{t,0,k}$	14,19	MPa
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,90	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo a tracción paralela	$f_{t,0,d}$	9,83	MPa
Tensión a tracción de cálculo			
Axil a tracción máximo	N_d	16,46	kN
Área neta	A_n	19600,00	mm ²
Tensión de cálculo tracción paralela	$\sigma_{t,0,d}$	0,84	MPa
Comprobación de resistencia			
Comprobación			CUMPLE

Factor de aprovechamiento de resistencia

9%

Tabla 61. Comprobación de resistencia tracción uniforme paralela – Domo 3.

5.2.3. COMPROBACIÓN A TRACCIÓN UNIFORME PERPENDICULAR A LA FIBRA

Dado que la estructura se trata de una estructura triangulada con configuración esférica donde los esfuerzos axiales son mucho más significativos que el resto de esfuerzos, no aparece en ningún caso en ninguna de las uniones esfuerzos de tracción con componente normal a la fibra. Por lo que esta comprobación se da por cumplida al no existir tales tensiones.

5.2.4. COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN UNIFORME PARALELA A LA FIBRA

La comprobación de compresión paralela a la fibra debe de cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d}$$

siendo:

$\sigma_{c,0,d}$ tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra;

$f_{c,0,d}$ resistencia de cálculo a compresión paralela a la fibra.

Al igual que en el caso de tracción, se supone que la compresión se reparte uniformemente en la superficie neta de la sección transversal de la pieza. Aunque, en piezas comprimidas existe la posibilidad de inestabilidad o pandeo, pero esto se estudiará más adelante.

Por lo que, la tensión máxima a compresión se halla mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{c,0,d} = \left(\frac{N_d}{A_n} \right)$$

La resistencia de cálculo a compresión paralela a la fibra se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$f_{c,0,d} = K_{mod} \cdot \left(\frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} \right)$$

A continuación, se muestran los resultados de la comprobación:

Comprobación Compresión Uniforme paralela a la fibra			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a compresión de cálculo			
Resistencia característica a compresión paralela	$f_{c,0,k}$	22,00	MPa
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,90	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-

Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Tensión a compresión de cálculo			
Axil a compresión máximo	$C_{,0,d}$	18,23	kN
Área neta	A_n	19600	mm ²
Tensión de cálculo a compresión paralela al a fibra	$\sigma_{c,0,d}$	0,93	MPa
Comprobación de resistencia			
Comprobación			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			6%

Tabla 62. Comprobación compresión uniforme paralela - Domo 3.

5.2.5. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN SIMPLE

La comprobación a flexión simple debe de cumplir la siguiente condición:

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$$

siendo:

$\sigma_{m,d}$ tensión de cálculo a flexión;

$f_{m,d}$ resistencia de cálculo a flexión.

Dada la forma circular de la estructura, los momentos flectores son igual de significativos para los dos ejes de flexión de la pieza. Por tanto, se comprobará la flexión simple en ambos ejes por separado.

Así pues, para cualquier sección solicitada por un momento flector la tensión originada será:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_d}{I_y} \cdot Z_{max}$$

$$\sigma_{m,z,d} = \frac{M_d}{I_z} \cdot y_{max}$$

Se muestra a continuación los resultados de la comprobación de la flexión en las dos direcciones:

Comprobación Flexión Simple			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a flexión simple de cálculo			
Resistencia característica flexión	$f_{m,k}$	24,33	MPa
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,90	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo a flexión simple	$f_{m,d}$	16,85	MPa
Tensión a flexión simple de cálculo			
Flexión de cálculo sobre eje y	$F_{,s,d,y}$	2,00	kN.m

Flexión de cálculo sobre eje z	$F_{,s,d,z}$	0,76	kN.m
Inercia respecto eje y	I_y	32013333,33	mm ⁴
Inercia respecto eje z	I_z	32013333,33	mm ⁴
Z max y	$Z_{,y}$	70	mm
Z max z	$Z_{,z}$	70	mm
Tensión de cálculo flexión eje y	$\sigma_{m,d,y}$	4,37	MPa
Tensión de cálculo flexión eje z	$\sigma_{m,d,z}$	1,65	MPa

Comprobación de resistencia			
Comprobación flexión eje y			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			25,95%
Comprobación flexión eje z			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			9,82%

Tabla 63. Comprobación a flexión simple en las dos direcciones principales. Domo 3.

5.2.6. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN ESVIADA

Esta comprobación es similar a la de flexión simple, pero suponiendo que ambos flectores máximos están actuando a la vez sobre una sección. Es decir, actúan los flectores en ambos planos principales de manera que la fibra neutra no coincide con ningún plano principal de inercia.

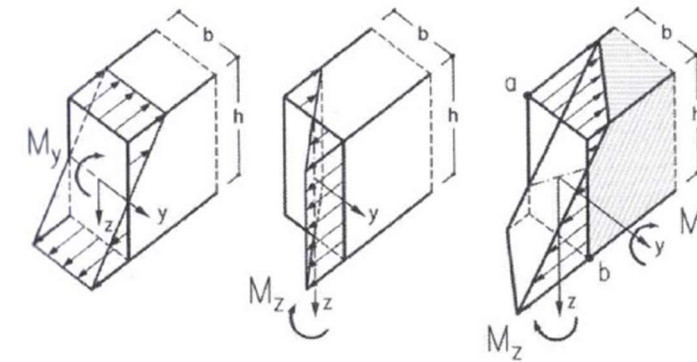


Ilustración 24. Esfuerzos de flexión esviada.

Para realizar esta comprobación deben de cumplirse a la vez las siguientes condiciones:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Siendo;

- $\sigma_{m,y,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje principal y, figura 6.1;
- $f_{m,y,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje principal y, figura 6.1;
- $\sigma_{m,z,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje principal z, figura 6.1;
- $f_{m,z,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje principal z, figura 6.1;
- k_m factor que tiene en cuenta el efecto de redistribución de tensiones y la falta de homogeneidad del material en la sección transversal y adopta los valores siguientes:
 - $k_m = 0,7$ para secciones rectangulares de madera maciza, madera laminada encolada y madera microlaminada; (6.10)
 - $k_m = 1,0$ para otras secciones y otros productos derivados de la madera (6.11)

Tomando los mismos valores de tensión calculados en flexión simple se obtienen los siguientes resultados para la comprobación:

Comprobación Flexión Esviada			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a flexión esviada de cálculo			
Resistencia característica flexión	$f_{m,k}$	24,33	MPa
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,90	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,30	-
Resistencia de cálculo a flexión eje y	$f_{m,y,d}$	16,85	MPa
Resistencia de cálculo a flexión eje z	$f_{m,y,z}$	16,85	MPa
Tensión a flexión esviada de cálculo			
Flexión de cálculo sobre eje y	$F_{s,d,y}$	2,00	kN.m
Flexión de cálculo sobre eje z	$F_{s,d,z}$	0,76	kN.m
Inercia respecto eje y	I_y	32013333,33	mm ⁴
Inercia respecto eje z	I_z	32013333,33	mm ⁴
Z max y	$Z_{,y}$	70	mm
Z max z	$Z_{,z}$	70	mm
factor redistribución de tensiones	K_m	0,7	-
Tensión de cálculo a flexión eje y	$\sigma_{m,y,d}$	4,37	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje z	$\sigma_{m,z,d}$	1,65	MPa
Comprobación de resistencia			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			27,98%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			32,83%

Tabla 64. Comprobación a flexión esviada. Domo 3.

5.2.7. COMPROBACIÓN A CORTANTE

En una viga simplemente apoyada se produce el fallo por cortante por el deslizamiento de las fibras en la zona central, donde tienen lugar las máximas tensiones tangenciales, en la sección próxima a

los apoyos, donde suelen estar los cortantes máximos. Esto da a lugar un plano de rotura horizontal por rasante. Tal como se muestra en la siguiente ilustración:

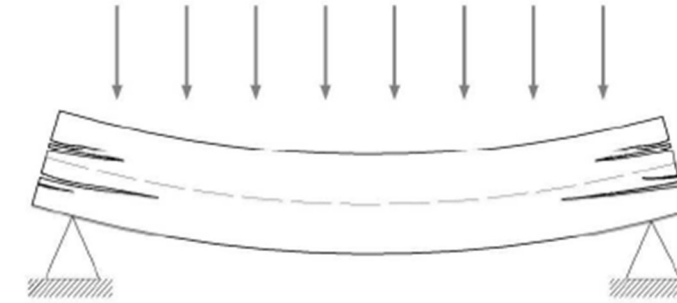


Ilustración 25. Fallo por cortante.

Para solicitaciones de cortante con una de las componentes paralela a la dirección de la fibra y para solicitaciones con ambas componentes perpendiculares a la dirección de la fibra debe de cumplirse la siguiente condición:

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

siendo:

- τ_d tensión de cálculo a cortante;
- $f_{v,d}$ resistencia de cálculo a cortante (corte paralelo o rodadura). La resistencia a cortante por rodadura podrá considerarse igual al doble de la resistencia a tracción perpendicular a la fibra.

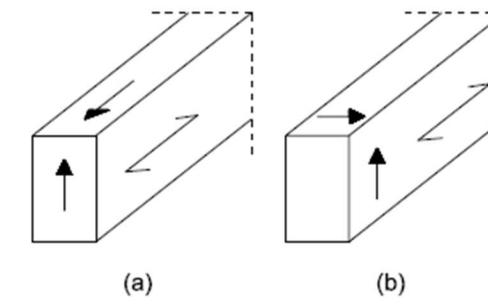


Figura 6.5 Tensiones de cortadura. a) corte paralelo. b) rodadura

Ilustración 26. Tensiones de cortadura.

Para una sección rectangular la ley de distribución de tensiones tangenciales es parabólica con su máximo en el centro que se calcula con la siguiente ecuación:

$$\tau_d = 1,5 \cdot \frac{V_d}{b \cdot h}$$

A continuación, se muestra la comprobación de resistencia a cortante para la barra más solicitada de la estructura.

Comprobación a cortante en el domo			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia a cortante de cálculo			
Resistencia característica tracción perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	MPa
Resistencia característica cortante	$f_{v,k,rodadura}$	0,8	MPa
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,90	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,30	-
Resistencia de cálculo a cortante	$f_{m,d}$	0,55	MPa
Tensión a cortante de cálculo			
Cortante de cálculo en eje y	V2	2,17	kN
Cortante de cálculo en eje z	V3	1,07	kN
Ancho en y	By	140	mm
Ancho en z	Bz	140	mm
Coeficiente reductor	kcr	0,67	-
Ancho eficaz en y	Bef,y	93,8	mm
Ancho eficaz en z	Bef,z	93,8	mm
Tensión de cálculo a cortante, y	$T_{v,y,d}$	0,25	MPa
Tensión de cálculo a cortante, z	$T_{v,z,d}$	0,12	MPa
Comprobación de resistencia			
Comprobación a cortante eje y			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			45%
Comprobación a cortante eje z			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			22%

Tabla 65. Comprobación a cortante de los elementos del Domo 3.

5.2.8. COMPROBACIÓN A TORSIÓN

Se considera oportuno no realizar la comprobación a torsión en las piezas, puesto que el valor del torsor máximo alcanza un valor muy reducido de $2,24 \times 10^{-7}$ KN.m.

5.2.9. COMPROBACIÓN A COMPRESIÓN INCLINADA RESPECTO A LA FIBRA

Este tipo de solicitaciones se presenta en las uniones de la estructura, puesto que debido al tipo de unión *Good Karma* todas las uniones presentan un corte oblicuo para el encaje de las piezas.

Como se ha descrito anteriormente, la resistencia a compresión de la madera depende de la dirección de la carga aplicada con respecto a la fibra, siendo mucho más resistente cuando esta es paralela a la fibra y más baja en la dirección perpendicular.

La variación en la resistencia según los ángulos de las cargas aplicadas viene dada por la expresión de Hankinson que recoge el CTE-SE-M:

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \cdot \text{sen}^2 \alpha + \text{cos}^2 \alpha}$$

En la expresión el valor de α corresponde con el ángulo que forma la tensión con la dirección de la fibra. Mientras que el resto de parámetros corresponden con la resistencia a compresión paralela $f_{c,0,d}$ y la resistencia a compresión perpendicular $f_{c,90,d}$.

Por tanto, se debe de cumplir la siguiente condición para realizar la comprobación de compresión inclinada:

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{f_{c,90,d}} \text{sen}^2 \alpha + \text{cos}^2 \alpha}$$

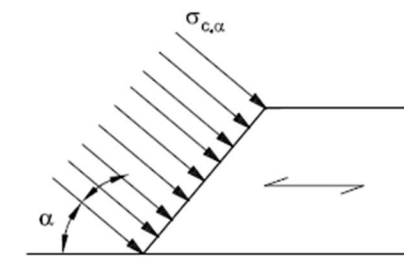


Figura 6.7. Compresión inclinada respecto a la fibra (ángulo α)

Completando los valores de la ecuación se obtienen los siguientes resultados:

Comprobación a compresión inclinada			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencias a compresión inclinada			
Resistencia cálculo compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Resistencia cálculo compresión perpendicular	$f_{c,90,d}$	1,15	MPa
Resistencia de cálculo a compresión inclinada	$f_{c,\alpha,d}$	3,76	MPa

Tensión de compresión inclinada			
Esfuerzo de compresión paralelo	N,c,0,d	18,23	kN
Esfuerzo de compresión perpendicular	N,c,90,d	9,11	kN
Ángulo de corte	α	60	grados
ancho	b	70	mm
canto	h	140	mm
Area inclinada (área en inglete cargada)	Aα	9800	mm ²
Hipotenusa (Longitud cargada)	L	70,00	m
Tensión de cálculo a compresión inclinada	σ,c,α,d	0,93	MPa

Comprobación de resistencia		
Comprobación		CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia		25%

Tabla 66. Comprobación a compresión inclinada. Domo 3.

5.2.10. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN Y TRACCIÓN AXIAL COMBINADAS

Este apartado trata de comprobar la distribución de tensiones debidas a la superposición del axil de tracción más los flectores de las dos direcciones principales.

Para el análisis de las tensiones provocadas por dos momentos flectores y un axil en tracción se aplica la expresión siguiente:

$$\sigma = \frac{N_d}{A_n} + \frac{M_{y,d}}{W_y} + \frac{M_{z,d}}{W_z}$$

En este caso, existe un único punto de tensión máxima, cuya tensión será la suma de los valores absolutos de las tensiones parciales.

Para cumplir con esta comprobación deberá de validarse la siguiente condición:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Donde:

- σ_{t,0,d} tensión de cálculo a tracción paralela;
- f_{t,0,d} resistencia de cálculo a tracción paralela;
- σ_{m,y,d} tensión de cálculo a flexión respecto al eje y;
- f_{m,y,d} resistencia de cálculo a flexión respecto al eje y;
- σ_{m,z,d} tensión de cálculo a flexión respecto al eje z;
- f_{m,z,d} resistencia de cálculo a flexión respecto al eje z;
- k_m factor definido en el apartado 6.1.7.

Los resultados de la comprobación son los siguientes:

Comprobación a tracción y flexión esviada compuesta			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencias a tracción y flexión esviada			
Resistencia de cálculo a tracción paralela	ft,0,d	9,83	MPa
Resistencia de cálculo respecto al eje y	fm,d	16,85	MPa
Resistencia de cálculo a flexión respecto al eje z	fm,z,d	16,85	MPa
Tensiones de tracción y flexión esviada			
Tensión de cálculo a tracción paralela	σt,0,d	0,84	MPa
Tensión de cálculo a flexión respecto eje Y	σm,d,y	4,37	MPa
Tensión de cálculo a flexión respecto al eje z	σm,z,d	4,37	MPa
Factor redistribución de tensiones	K _m	0,7	-

Comprobación de resistencia		
Comprobación 1		CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia		53%
Comprobación 2		CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia		53%

Tabla 67. Comprobación a tracción y flexión esviada – Domo 3.

5.2.11. COMPROBACIÓN A FLEXIÓN Y COMPRESIÓN AXIAL COMBINADAS

Del mismo modo que el caso anterior, se deben de cumplir las siguientes condiciones:

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

Donde;

- $\sigma_{c,0,d}$ tensión de cálculo a compresión paralela;
- $f_{c,0,d}$ resistencia de cálculo a compresión paralela;
- $\sigma_{m,y,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje y;
- $f_{m,y,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje y;
- $\sigma_{m,z,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje z;
- $f_{m,z,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje z;
- K_m factor definido en el apartado 6.1.7.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Comprobación a compresión y flexión esviada compuesta			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencias a compresión y flexión esviada			
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Resistencia de cálculo respecto al eje y	$f_{m,d}$	16,85	MPa
Resistencia de cálculo a flexión respecto al eje z	$f_{m,z,d}$	16,85	MPa
Tensiones de compresión y flexión esviada			
Tensión de cálculo a compresión paralela	$\sigma_{c,0,d}$	0,93	MPa
Tensión de cálculo a flexión respecto eje Y	$\sigma_{m,d,y}$	4,37	MPa
Tensión de cálculo a flexión respecto al eje z	$\sigma_{m,z,d}$	4,37	MPa
Factor redistribución de tensiones	K_m	0,7	-
Comprobación de resistencia			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			44%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			44%

Tabla 68. Comprobaciones de axil de compresión y flexión esviada. Domo 3.

5.2.12. COMPROBACIÓN DE ESTABILIDAD LOCAL DE PIEZAS

La comprobación a pandeo es la condición a cumplir más limitante de la estructura esférica del domo, y, por lo tanto, la que condiciona en mayor medida el dimensionamiento de la estructura. El pandeo de una pieza que se encuentra sometida a esfuerzos de compresión o flexocompresión es un fenómeno de inestabilidad por el que la pieza puede sufrir el fallo ante tensiones mucho más reducidas que las de la propia resistencia del material.

Según la formulación de Euler, existe una carga crítica que en el caso de ser superada se produce un equilibrio inestable o pandeo, con deslizamiento lateral creciente hasta la rotura. Esta carga crítica viene dada por la siguiente expresión:

$$P_{crit} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I}{L^2}$$

Esta formulación de Euler sirve para piezas ideales, en la práctica las piezas reales sobre todo en madera son anisótropas en cuanto a sus propiedades resistentes, falta de homogeneidad por la existencia de nudos o fendas, además de falta de rectitud y excentricidad de la carga.

Por lo que para las comprobaciones de pandeo se emplea la misma resistencia, pero reducida con un factor llamado coeficiente de pandeo χ , que reduce su valor en función de la esbeltez de la pieza.

El pandeo puede producirse en cualquiera de sus dos planos de inercia de la sección. Por lo que el análisis se realizará según los coeficientes de pandeos para cada uno de los dos planos.

Para realizar la comprobación de pandeo, primero, se deberá de hallar la esbeltez mecánica para cada uno de los dos planos de inercia.

La esbeltez mecánica del plano XZ, flectando respecto al eje y:

$$\lambda_y = \frac{L_{k,y}}{i_y}$$

La esbeltez mecánica del plano XY, flectando respecto al eje z:

$$\lambda_z = \frac{L_{k,z}}{i_z}$$

Siendo:

$L_{k,y}$ y $L_{k,z}$ longitudes de pandeo en los planos xz y xy, respectivamente.

$$L_{k,y} = \beta_y \cdot L$$

$$L_{k,z} = \beta_z \cdot L$$

L longitud del soporte o pieza;

β_y y β_z coeficientes que dependen de las condiciones de restricción de los extremos de la pieza para el movimiento en el plano xz y xy, respectivamente. Los valores de β para los casos más habituales pueden consultarse en el anejo G;

i_y e i_z radios de giro de la sección respecto a los ejes principales: y, z, respectivamente.

Dada la configuración del domo, donde todas sus barras están biarticuladas, se puede adoptar en el coeficiente β para ambos ejes el valor 1.

El radio de giro de la sección respecto a los ejes principales, se puede hallar mediante la siguiente ecuación:

$$i = \sqrt{\frac{\text{Inercia}}{\text{Área}}}$$

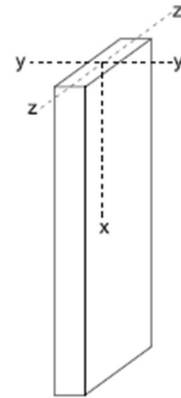


Ilustración 27. Ejes principales de la pieza comprimida, solicitada a compresión.

Por otro lado, se deberá de hallar la esbeltez relativa para cada uno de los planos de inercia por medio de las siguientes expresiones:

$$\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,y}}}$$

$$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,z}}}$$

siendo:

$$\sigma_{c,crit,y} = \pi^2 E_{0,k} / \lambda_y^2$$

$$\sigma_{c,crit,z} = \pi^2 E_{0,k} / \lambda_z^2$$

$E_{0,k}$ módulo de elasticidad paralelo a la fibra;

λ_y y λ_z esbelteces mecánicas.

Como hemos visto en la fórmula de Euler hay dos variables principales para el pandeo de la pieza. La longitud de la misma y su carga a compresión. Por tanto, nos basaremos en estas dos variables para realizar las comprobaciones a pandeo de las barras.

La comprobación de la estabilidad de piezas deberá de valorar dos situaciones de esfuerzos diferentes; la verificación de la estabilidad a compresión simple y a flexocompresión, como se muestra a continuación:

Comprobación de pandeo en compresión simple

Se deberá de cumplir las siguientes condiciones:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,y} f_{c,0,d}} \leq 1$$

Siendo:

$\sigma_{c,0,d}$ tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra;

$f_{c,0,d}$ resistencia de cálculo a compresión paralela a la fibra;

$\chi_{c,y}$, $\chi_{c,z}$ coeficientes de pandeo, obtenidos a partir de las siguientes expresiones

$$\chi_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad \text{análogo para } \chi_{c,z}$$

$$k_y = 0,5(1 + \beta_c(\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2) \quad \text{análogo para } k_z$$

Comprobación de flexocompresión

Deberá de cumplirse las siguientes condiciones para comprobar la estabilidad de la pieza incluyendo la flexión esviada:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

siendo:

$\sigma_{c,0,d}$ tensión de cálculo a compresión paralela;

$f_{c,0,d}$ resistencia de cálculo a compresión paralela;

$\sigma_{m,y,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje y;

$f_{m,y,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje y;

$\sigma_{m,z,d}$ tensión de cálculo a flexión respecto al eje z;

$f_{m,z,d}$ resistencia de cálculo a flexión respecto al eje z;

k_m factor definido en el apartado 6.1.7;

$k_m = 0,7$ (sección rectangular);

$\chi_{c,y}$ y $\chi_{c,z}$ coeficientes de pandeo según 6.3.2.2.

Para comprobar la estabilidad local de las piezas de la estructura; se harán las comprobaciones a pandeo pertinentes de la barra de mayor axil a compresión, posteriormente, la siguiente barra a

verificar será aquella que teniendo un axil inmediatamente inferior al anterior también tenga una longitud de la barra mayor, y, por tanto, una esbeltez más desfavorable. Se repetirá el proceso hasta comprobar la pieza con la mayor esbeltez y su máximo axil.

En el caso de esta estructura, solo es necesario comprobar una barra para verificar la estabilidad local de las piezas. Puesto que la barra más cargada es la de mayor longitud, el resto de barras cuentan con axiles y longitudes inferiores, y por tanto, tienen condiciones más favorables de estabilidad.

	Valor (kN)	Barra	Longitud (m)	Combinación
Axil,c,max 1	18,28902	12-020	2,564	COMB056

Tabla 69. Barras a comprobar su estabilidad local – Domo 3.

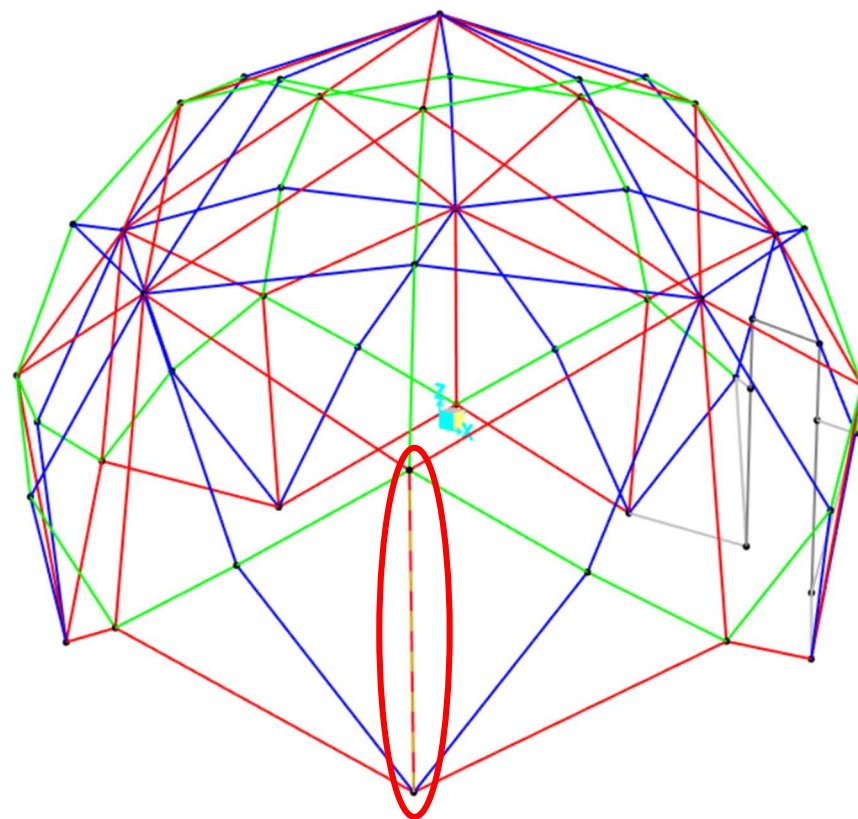


Ilustración 28. Barras con comprobación a pandeo local – barra 12-020 – Domo 3.

Comprobación de la barra 12-020

Esbeltez mecánica y relativa - Barra 12-020			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Esbeltez mecánica			
Longitud de la pieza	L	2,564	m
Coef. de condiciones de restricción en y	β_y	1	-
Coef. de condiciones de restricción en z	β_z	1	-
Longitud de pandeo en plano xz	$L_{k,y}$	2,56	m

Longitud de pandeo en plano xy	$L_{k,z}$	2,56	m
Canto de la pieza	h	140	mm
Ancho de la pieza	b	140	mm
Inercia respecto el eje y	I_y	32013333	mm ⁴
Inercia respecto el eje z	I_z	32013333	mm ⁴
Reducción del área por pretaladro y tirafondo (d=8mm)	Atirafondo	50	mm ²
Área eficaz	A	19550	mm ²
Radio de giro en y	i_y	40,47	mm
Radio de giro en z	i_z	40,47	mm
Esbeltez mecánica en el plano xz	λ_y	63,35	-
Esbeltez mecánica en el plano xy	λ_z	63,35	-
Esbeltez relativa			
Resistencia a compresión característica	$f_{c,0,k}$	22	Mpa
Modulo de elasticidad paralelo a la fibra	$E_{0,k}$	7,4	kN/mm ²
Tensión de compresión crítica en plano xz	$\sigma_{c,crit,y}$	18,20	MPa
Tensión de compresión crítica en plano xy	$\sigma_{c,crit,z}$	18,20	MPa
Esbeltez relativa en plano xz	$\lambda_{rel,y}$	1,10	-
Esbeltez relativa en plano xy	$\lambda_{rel,z}$	1,10	-

Tabla 70. Esbelteces mecánicas y relativas en barra 12-020- Domo 3.

Estabilidad de piezas - compresión simple - barra 12-020			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Estabilidad en compresión simple			
Axil de compresión máximo	$C_{0,d}$	18,23	kN
Área neta	A_n	19550	mm ²
Tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0,d}$	0,93	MPa
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Factor asociado a la rectitud de las piezas	β_c	0,20	-
	k_y	1,18	-
	k_z	1,18	-
Coeficiente de pandeo en y	$\chi_{c,y}$	0,616	-
Coeficiente de pandeo en z	$\chi_{c,z}$	0,616	-
Comprobación de estabilidad en compresión simple			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			10%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			10%

Tabla 71. Comprobación de la estabilidad local en compresión simple Barra 12-020. Domo 3.

Estabilidad de piezas - flexocompresión - barra 12-020			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Estabilidad en flexocompresión			
Tensión de cálculo a compresión paralela a la fibra	$\sigma_{c,0,d}$	0,93	MPa
Resistencia de cálculo a compresión paralela	$f_{c,0,d}$	15,23	MPa
Coeficiente de pandeo en y	$\chi_{c,y}$	0,616	-
Coeficiente de pandeo en z	$\chi_{c,z}$	0,616	-
Resistencia de cálculo a flexión simple eje y	$f_{m,y,d}$	16,85	MPa
Resistencia de cálculo a flexión simple eje z	$f_{m,z,d}$	16,85	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje y	$\sigma_{m,y,d}$	4,37	MPa
Tensión de cálculo a flexión eje z	$\sigma_{m,z,d}$	1,65	MPa
Factor de redistribución de tensiones	K_m	0,7	-
Comprobación de flexocompresión			
Comprobación 1			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			42,75%
Comprobación 2			CUMPLE
Factor de aprovechamiento de resistencia			37,91%

Tabla 72. Comprobación de la estabilidad local en flexocompresión Barra 12-020. Domo 3.

Como se puede observar, la pieza de 140x140 mm cumple con un 95,68% de su resistencia para el caso más desfavorable posible, por lo que es la comprobación que condiciona el dimensionamiento y que por tanto verifica la sección.

5.2.13. COMPROBACIÓN DE ESTABILIDAD GLOBAL DE PIEZAS

La comprobación de la estabilidad global de la estructura puede ser la comprobación más importante para el dimensionamiento de cualquier domo geodésico. Como hemos visto en el epígrafe anterior, el pandeo local de la barra es la comprobación que condiciona el dimensionamiento, pero en la práctica, el pandeo local de una de las barras no generaría el colapso de la estructura.

El efecto que produciría el colapso de la estructura será el fallo de su estabilidad global, es decir, del pandeo global de su geometría. Estudiar esto induciría a realizar un análisis de segundo orden, teniendo en cuenta la influencia de la deformación de la estructura.

En general, podemos obtener las solicitaciones de la estructura por dos metodologías diferentes:

- El análisis de primer orden, con la geometría inicial de la estructura, que es el caso que se ha realizado hasta ahora.
- El análisis de segundo orden, teniendo en cuenta la influencia de la deformación de la estructura.

Los efectos de la geometría deformada (efectos de segundo orden) deben tenerse en cuenta si estos incrementarían significativamente los efectos de las acciones o modificaría significativamente el comportamiento estructural del domo.

Por tanto, este incremento de las solicitaciones o cualquier otro cambio en el comportamiento estructural producido por las deformaciones podrá despreciarse, es decir, el diseño sería válido con un análisis de primer orden en la estructura, si se cumple el siguiente criterio:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \rightarrow \text{Para el análisis elástico}$$

donde:

α_{cr} Es el coeficiente por el que es necesario multiplicar las cargas de cálculo para producir una inestabilidad elástica del modo de pandeo global e la estructura.

F_{Ed} Es la carga de cálculo que actúa sobre la estructura

F_{cr} Es la carga crítica de pandeo elástico que produce una inestabilidad del modo de pandeo global, calculada con las rigideces elásticas iniciales.

Para realizar el cálculo del coeficiente α_{cr} se ha empleado el modelo de la estructura en el software SAP2000, donde se han creado casos de carga tipo Buckling que relacionan el esfuerzo de cálculo con la carga crítica de pandeo que produce la inestabilidad global.

A priori, se puede suponer que aquellos casos de carga que proporcionen mayor compresión a la estructura serán los que producirán la inestabilidad global. No obstante, para cada una de las combinaciones de acciones calculadas en ELU se ha creado un caso Buckling de dicha combinación, es decir, se han creado 141 casos de carga nuevos. Exportando los datos, obtenemos la siguiente tabla con los 10 menores coeficientes, y, por tanto, las combinaciones que más cerca están de la inestabilidad global del domo:

CASOS DE CARGA BUCKLING - ESTABILIDAD GLOBAL		
Descripción	Parámetro	Valor
CASOS BUCKLING - COEFICIENTE DE INESTABILIDAD GLOBAL		
Coficiente más desfavorable para la estabilidad global 1	BUCKLING056	28,88
Coficiente más desfavorable para la estabilidad global 2	BUCKLING056	28,88
Coficiente más desfavorable para la estabilidad global 3	BUCKLING032	29,79
Coficiente más desfavorable para la estabilidad global 4	BUCKLING032	29,79
Coficiente más desfavorable para la estabilidad global 5	BUCKLING044	30,06
Coficiente más desfavorable para la estabilidad global 6	BUCKLING044	30,06
Coficiente más desfavorable para la estabilidad global 7	BUCKLING055	30,49
Coficiente más desfavorable para la estabilidad global 8	BUCKLING055	30,49
Coficiente más desfavorable para la estabilidad global 9	BUCKLING074	30,63
Coficiente más desfavorable para la estabilidad global 10	BUCKLING074	30,63

Tabla 73. Casos Buckling más desfavorables para la inestabilidad global – Domo 3.

Como se puede observar ninguno de ellos es inferior al valor de 10 y cumplen sobradamente. El más cercano es el caso BUCKLING056 que se corresponde con el caso de carga COMB056. La acción dominante es la sobrecarga de uso 2 y como acciones no dominantes cuenta con las cargas de viento de presión y de succión en la dirección 2, la sobrecarga de nieve y de temperatura mínima.

Por tanto, tras realizar esta comprobación podemos asegurar que no será necesaria la comprobación de los efectos de segundo orden por considerarse que serán poco significativos y no hay riesgo de estabilidad global, dando por concluido el dimensionamiento de la estructura en Estado Límite Último. Con una sección nominal cuadrada de 14 x 14 cm para todas las barras de la estructura.

5.3. ESTADO LÍMITE DE SERVICIO. DEFORMACIÓN DIFERIDA

El estudio de las deformaciones se realiza bajo la combinación característica correspondiente al estado límite de servicio, según la siguiente expresión:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$$

La componente diferida de un desplazamiento, se determina a partir de la siguiente expresión:

$$\delta_{dif} = \delta_{ini} \cdot \psi_2 \cdot k_{def} \quad (7.1)$$

siendo:

δ_{ini} desplazamiento elástico;

ψ_2 coeficiente de simultaneidad que se obtiene de la tabla 4.2 del DB SE. Para las cargas permanentes, se adoptará $\psi_2=1$;

k_{def} factor de fluencia en función de la clase de servicio (véase tabla 7.1);

Tabla 7.1 Valores de k_{def} para madera y productos derivados de la madera

Material	Tipo de producto	Clase de servicio		
		1	2	3
Madera maciza		0,60	0,80	2,00
Madera laminada encolada		0,60	0,80	2,00
Madera microlaminada (LVL)		0,60	0,80	2,00

En la comprobación realizada cabe puntualizar el siguiente aspecto; la flecha diferida solo puede producirse para las cargas permanentes, por lo que, lo adecuado sería emplear la combinación de acciones casi permanente, sin embargo, se ha establecido utilizar la combinación de acciones característica para obtener valores de desplazamiento más restrictivos.

En primer lugar, definiremos los desplazamientos elásticos máximos de la estructura hallados del modelo de elementos finitos. Sin embargo, para obtener la flecha máxima del nudo deberemos de tener en cuenta los efectos de traslación de la estructura, es decir, deberemos de calcular la diferencia de desplazamiento entre el nudo con mayor valor absoluto junto con sus nodos adyacentes. Es decir, debemos de hallar la flecha relativa entre nudos para poder definir el desplazamiento elástico y poder aplicar la ecuación de la flecha diferida expresada en este epígrafe.

Se define que la flecha máxima a cumplir será L/250 m/m. Se muestran los resultados obtenidos de las 3 direcciones principales de traslación U1, como ejes globales de X, U2 corresponde con el eje global Y, y U3 corresponde el desplazamiento en el eje Z o elevación de la estructura en el plano vertical.

Es evidente que la flecha que debiéramos comprobar sería la perpendicular al plano tangente al domo, este plano variará en función del nudo que estemos estudiando. A modo de unificar y teniendo en cuenta que los valores de flecha serán igual de restrictivos, se ha establecido que emplear las tres direcciones principales de los ejes globales de la estructura es suficiente para realizar esta comprobación.

Se muestran a continuación los resultados de la comprobación de estado límite de servicio:

Comprobación deformaciones en eje x - U1			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Deformación diferida desplazamiento U1			
Desplazamiento máximo del nudo	U1-N12	0,002	m
Desplazamiento relativo con nudo adyacente 1	Ur1-N12	0,001	m
Desplazamiento relativo con nudo adyacente 2	Ur1-N12	0,001	m
Desplazamiento relativo con nudo adyacente 3	Ur1-N12	0,000	m
Factor de fluencia	Kdef	0,800	-
Desplazamiento diferido máximo	Udif	0,001	m
Longitud de la barra	L	1,640	m
Límite de flecha relativa (1/250)	U,r,lim	0,004	m/m

Flexa máxima en el nodo	U,max	0,007	m
Comprobación flecha diferida desplazamiento U1			
Comprobación			CUMPLE

Tabla 74. Comprobación de deformaciones en U1 - Domo 3.

Comprobación deformaciones en eje y - U2			
Deformación diferida desplazamiento U2			
Desplazamiento elástico del nodo - N°222	U2-N17	0,003	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 1	Ur2-N17	0,003	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 2	Ur2-N17	0,001	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 3	Ur2-N17	0,003	m
Factor de fluencia	Kdef	0,800	-
Desplazamiento elástico máximo	Ur,max	0,002	m
Longitud de la barra	L	0,700	m
Límite de flecha relativa (1/250)	U,r,lim	0,004	m/m
Flexa máxima en el nodo	U,max	0,003	m
Comprobación flecha diferida desplazamiento U2			
Comprobación			CUMPLE

Tabla 75. Comprobación de deformaciones en U2 - Domo 3.

Comprobación deformaciones en eje z - U3			
Deformación diferida desplazamiento U3			
Desplazamiento máximo del nodo	U3-N129	0,001	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 1	Ur3-N129	0,000	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 2	Ur3-N129	0,000	m
Desplazamiento relativo con nodo adyacente 3	Ur3-N129	0,000	m
Factor de fluencia	Kdef	0,800	-
Desplazamiento elástico máximo	Ur,max	0,000	m
Longitud de la barra	L	1,380	m
Límite de flecha relativa (1/250)	U,r,lim	0,004	m/m
Flexa máxima en el nodo	U,max	0,007	m
Comprobación flecha diferida desplazamiento U3			
Comprobación			CUMPLE

Tabla 76. Comprobación de deformaciones en U3 - Domo 3.

5.4. DIMENSIONAMIENTO CIMENTACIÓN DOMO 3

Para el dimensionamiento de la cimentación se ha empleado el software CYPECAD, en el cual, se han exportado los resultados de las reacciones obtenidas a partir del modelo de la estructura realizado en SAP2000.

Para el modelo de cálculo de la cimentación se ha empleado una viga de cimentación perimetral apoyada directamente sobre el terreno. La forma de la cimentación del domo 3 es la siguiente:

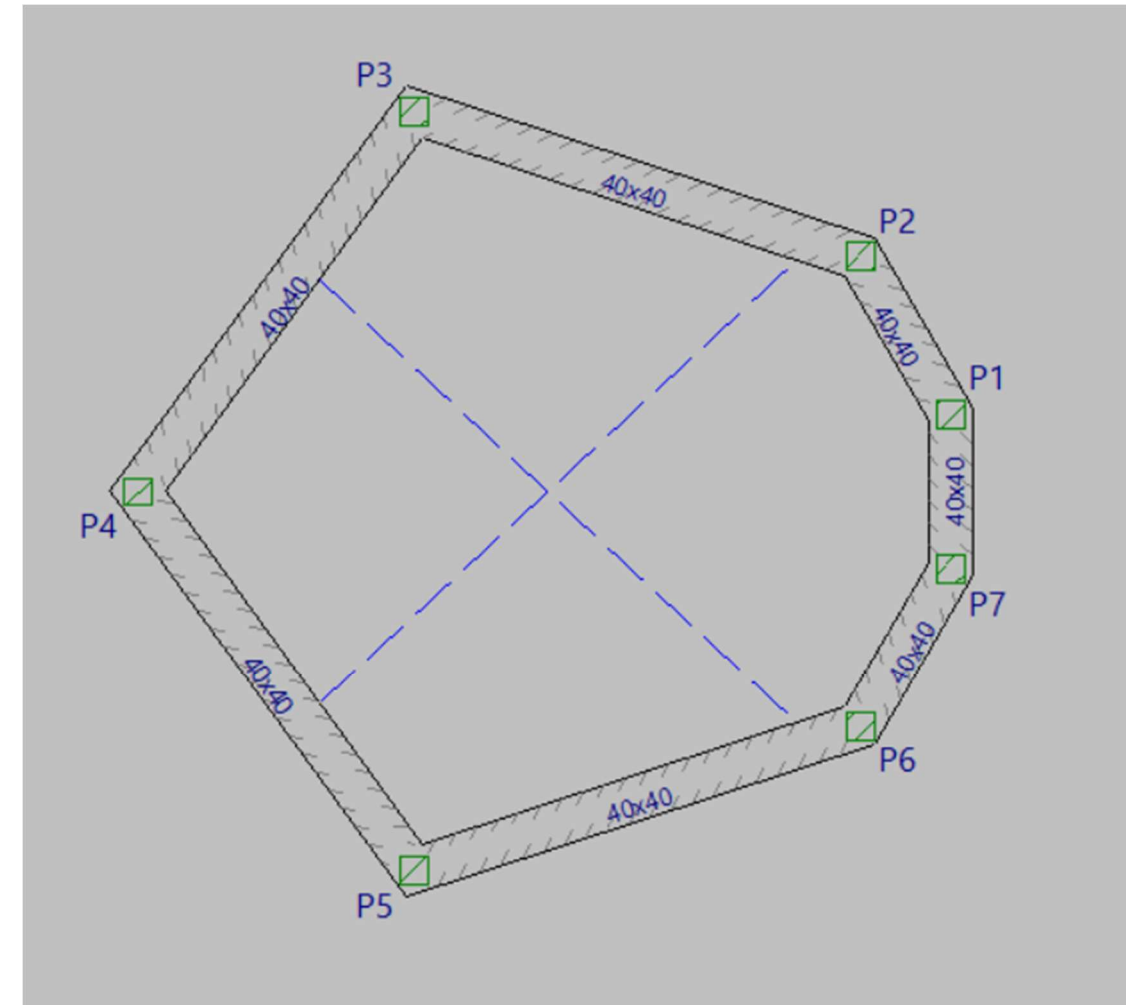


Ilustración 29. Ilustración del modelo de la cimentación en CYPECAD - Domo 3.

Se ha configurado en CYPECAD las mismas combinaciones de acciones elaboradas para el modelo de la estructura, por lo que, se han importado los datos de las reacciones sin ponderar a cada uno de los apoyos puntuales.

Dado que el proyecto carece de estudio geotécnico por ser académico, con base en el estudio geológico y en la experiencia de proyectos cercanos a las obras proyectadas se han estimado los siguientes datos de cálculo del terreno, considerando el terreno como un medio elástico:

- Resistencia del terreno en situaciones persistentes: 0,20 MPa
- Resistencia del terreno en situaciones sísmicas y accidentales: 0,30 MPa
- Módulo de balasto: 100000 kN/m³

La normativa de referencia para el cálculo de la cimentación utilizada ha sido el Código Estructural.
Las comprobaciones de dimensionamiento se pueden observar en el Anexo 3: Comprobaciones de dimensionamiento de cimentación - Domo 3.

ANEXO 1: COMPROBACIONES DE DIMENSIONAMIENTO DE CIMENTACIÓN –

DOMO 1

1. VIGAS..... 2
 1.1. Cimentación..... 2



1. VIGAS

1.1. Cimentación

Vigas	COMPROBACIONES DE RESISTENCIA (CÓDIGO ESTRUCTURAL)														Estado
	Disp.	Arm.	Q	N,M	T _c	T _{st}	T _{sl}	TNM _x	TV _x	TV _y	TV _{xSt}	TV _{ySt}	T,Disp _{sl}	T,Disp _{st}	
P4 - P5	Cumple	Cumple	'1.461 m' η = 6.4	'P4' η = 5.0	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 6.4
P5 - P6	Cumple	'0.000 m' Cumple	'0.000 m' η = 8.3	'0.348 m' η = 3.8	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 8.3
P8 - P9	Cumple	'0.238 m' Cumple	'1.430 m' η = 4.3	'P9' η = 5.9	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 5.9
P14 - P15	Cumple	'0.243 m' Cumple	'0.000 m' η = 5.1	'P14' η = 5.8	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 5.8
P15 - P16	Cumple	'0.238 m' Cumple	'0.000 m' η = 5.0	'P15' η = 6.0	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 6.0
P18 - P19	Cumple	Cumple	'1.430 m' η = 8.0	'P18' η = 5.0	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 8.0
P19 - P20	Cumple	Cumple	'1.461 m' η = 7.3	'1.217 m' η = 4.9	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 7.3
P20 - P21	Cumple	Cumple	'1.430 m' η = 10.7	'P21' η = 13.4	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 13.4
P21 - P22	Cumple	Cumple	'0.483 m' η = 14.5	'P21' η = 13.1	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 14.5
P22 - P2	Cumple	Cumple	'1.375 m' η = 3.9	'P22' η = 7.2	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 7.2
P2 - P3	Cumple	Cumple	'0.000 m' η = 15.0	'P3' η = 13.1	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 15.0
P3 - P4	Cumple	Cumple	'0.000 m' η = 10.4	'P3' η = 13.8	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 13.8

Vigas	COMPROBACIONES DE RESISTENCIA (CÓDIGO ESTRUCTURAL)														Estado
	Disp.	Arm.	Q	N,M	T _c	T _{st}	T _{sl}	TNM _x	TV _x	TV _y	TV _{xSt}	TV _{ySt}	T,Disp _{sl}	T,Disp _{st}	
P6 - P7	Cumple	'0.328 m' Cumple	'0.000 m' η = 6.2	'P6' η = 3.7	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 6.2
P7 - P8	Cumple	'0.328 m' Cumple	'0.000 m' η = 5.4	'1.311 m' η = 4.8	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 5.4
P9 - P10	Cumple	'0.243 m' Cumple	'0.000 m' η = 3.7	'P9' η = 5.5	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 5.5
P12 - P13	Cumple	'0.656 m' Cumple	'0.983 m' η = 2.4	η = 2.3	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 2.4
P13 - P14	Cumple	'0.715 m' Cumple	'1.430 m' η = 4.6	'P14' η = 5.5	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 5.5
P16 - P17	Cumple	'0.328 m' Cumple	'1.311 m' η = 5.6	'P16' η = 5.0	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 5.6
P17 - P18	Cumple	'0.328 m' Cumple	'1.311 m' η = 6.0	'1.311 m' η = 4.2	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 6.0

Vigas	COMPROBACIONES DE RESISTENCIA (CÓDIGO ESTRUCTURAL)		Estado
	-		
P10 - P11	N.P. ⁽³⁾		NO PROCEDE
P11 - P12	N.P. ⁽³⁾		NO PROCEDE
P22 - P23	N.P. ⁽³⁾		NO PROCEDE
P2 - P1	N.P. ⁽³⁾		NO PROCEDE



Comprobaciones E.L.U.

Cimentación Domo 1.V03

Fecha: 04/09/22



Comprobaciones E.L.U.

Cimentación Domo 1.V03

Fecha: 04/09/22

Notación:

Disp.: Disposiciones relativas a las armaduras
 Arm.: Armadura mínima y máxima
 Q: Estado límite de agotamiento frente a cortante (combinaciones no sísmicas)
 N,M: Estado límite de agotamiento frente a solicitaciones normales (combinaciones no sísmicas)
 T.: Estado límite de agotamiento por torsión. Compresión oblicua.
 T_α: Estado límite de agotamiento por torsión. Tracción en el alma.
 T_β: Estado límite de agotamiento por torsión. Tracción en las armaduras longitudinales.
 TNM.: Estado límite de agotamiento por torsión. Interacción entre torsión y esfuerzos normales. Flexión alrededor del eje X.
 TV.: Estado límite de agotamiento por torsión. Interacción entre torsión y cortante en el eje X. Compresión oblicua
 TV_y: Estado límite de agotamiento por torsión. Interacción entre torsión y cortante en el eje Y. Compresión oblicua
 TV_s: Estado límite de agotamiento por torsión. Interacción entre torsión y cortante en el eje X. Tracción en el alma.
 TV_s: Estado límite de agotamiento por torsión. Interacción entre torsión y cortante en el eje Y. Tracción en el alma.
 T,Disp.: Estado límite de agotamiento por torsión. Separación entre las barras de la armadura longitudinal.
 T,Disp.: Estado límite de agotamiento por torsión. Separación entre las barras de la armadura transversal.
 x: Distancia al origen de la barra
 η: Coeficiente de aprovechamiento (%)
 N.P.: No procede
 -: -

Comprobaciones que no proceden (N.P.):

⁽¹⁾ La comprobación del estado límite de agotamiento por torsión no procede, ya que no hay momento torsor.
⁽²⁾ La comprobación no procede, ya que no hay interacción entre torsión y esfuerzos normales.
⁽³⁾ No hay esfuerzos que produzcan tensiones normales para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Notación:

W_{k,C,sup.}: Cálculo del ancho de fisura: Cara superior
 W_{k,C,lat.Der.}: Cálculo del ancho de fisura: Cara lateral derecha
 W_{k,C,inf.}: Cálculo del ancho de fisura: Cara inferior
 W_{k,C,lat.Izq.}: Cálculo del ancho de fisura: Cara lateral izquierda
 σ_{sr}: Área mínima de armadura
 V_{fis}: Fisuración debida a tensiones tangenciales de cortante
 x: Distancia al origen de la barra
 η: Coeficiente de aprovechamiento (%)
 N.P.: No procede
 -: -

Comprobaciones que no proceden (N.P.):

⁽¹⁾ La comprobación no procede, ya que la tensión de tracción máxima en el hormigón no supera la resistencia a tracción del mismo.
⁽²⁾ No hay esfuerzos que produzcan tensiones normales para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Vigas	COMPROBACIONES DE FISURACIÓN (CÓDIGO ESTRUCTURAL)						Estado
	W _{k,C,sup.}	W _{k,C,lat.Der.}	W _{k,C,inf.}	W _{k,C,lat.Izq.}	σ _{sr}	V _{fis}	
P4 - P5	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P5 - P6	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P6 - P7	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	Cumple	CUMPLE
P7 - P8	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	Cumple	CUMPLE
P8 - P9	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P14 - P15	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P15 - P16	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	Cumple	CUMPLE
P16 - P17	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P17 - P18	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	Cumple	CUMPLE
P18 - P19	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	Cumple	CUMPLE
P19 - P20	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P20 - P21	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P21 - P22	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P22 - P2	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	x: 0 m Cumple	CUMPLE
P2 - P3	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P3 - P4	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE

Vigas	COMPROBACIONES DE FISURACIÓN (CÓDIGO ESTRUCTURAL)							Estado
	W _{k,C,sup.}	W _{k,C,lat.Der.}	W _{k,C,inf.}	W _{k,C,lat.Izq.}	σ _{sr}	V _{fis}	-	
P9 - P10	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	Cumple	N.P. ⁽²⁾	CUMPLE
P12 - P13	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	N.P. ⁽²⁾	CUMPLE
P13 - P14	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	N.P. ⁽²⁾	CUMPLE

Vigas	COMPROBACIONES DE FISURACIÓN (CÓDIGO ESTRUCTURAL)		Estado
	-		
P10 - P11	N.P. ⁽²⁾		NO PROCEDE
P11 - P12	N.P. ⁽²⁾		NO PROCEDE
P22 - P23	N.P. ⁽²⁾		NO PROCEDE
P2 - P1	N.P. ⁽²⁾		NO PROCEDE

ANEXO 2: COMPROBACIONES DE DIMENSIONAMIENTO DE CIMENTACIÓN –

DOMO 2

1. VIGAS..... 2
 1.1. Cimentación..... 2



1. VIGAS

1.1. Cimentación

Vigas	COMPROBACIONES DE RESISTENCIA (CÓDIGO ESTRUCTURAL)														Estado	
	Disp.	Arm.	Q	N,M	T _c	T _{st}	T _{st}	TNM _x	TV _x	TV _y	TV _s	TV _s	T,Disp _{st}	T,Disp _{st}		-
P9 - P10	Cumple	'0.287 m' Cumple	'1.720 m' η = 4.8	'0.573 m' η = 3.6	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽³⁾	CUMPLE η = 4.8
P10 - P11	Cumple	'0.287 m' Cumple	'1.720 m' η = 8.9	'1.433 m' η = 5.5	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽³⁾	CUMPLE η = 8.9
P6 - P5	Cumple	'0.287 m' Cumple	'1.720 m' η = 4.8	'0.573 m' η = 3.6	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽³⁾	CUMPLE η = 4.8
P5 - P4	Cumple	'0.287 m' Cumple	'1.720 m' η = 8.9	'1.433 m' η = 5.4	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽³⁾	CUMPLE η = 8.9
P8 - P7	Cumple	'0.568 m' Cumple	'1.704 m' η = 4.7	'0.568 m' η = 3.4	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽³⁾	CUMPLE η = 4.7
P7 - P6	Cumple	'0.588 m' Cumple	'1.471 m' η = 3.1	'0.588 m' η = 2.8	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽³⁾	CUMPLE η = 3.1
P8 - P9	Cumple	'0.586 m' Cumple	'1.465 m' η = 3.4	'0.586 m' η = 3.0	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽³⁾	CUMPLE η = 3.4

Vigas	COMPROBACIONES DE RESISTENCIA (CÓDIGO ESTRUCTURAL)														Estado
	Disp.	Arm.	Q	N,M	T _c	T _{st}	T _{st}	TNM _x	TV _x	TV _y	TV _s	TV _s	T,Disp _{st}	T,Disp _{st}	
P13 - P14	Cumple	'0.113 m' Cumple	'0.000 m' η = 7.4	'P14' η = 3.5	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 7.4
P2 - P1	Cumple	'0.113 m' Cumple	'0.000 m' η = 8.1	'P1' η = 3.8	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 8.1
P12 - P14	Cumple	Cumple	'0.127 m' η = 11.3	'P14' η = 11.6	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 11.6
P14 - P1	Cumple	Cumple	'1.000 m' η = 4.6	'P1' η = 12.2	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 12.2
P1 - P3	Cumple	Cumple	'0.000 m' η = 9.0	'P1' η = 11.7	'0.127 m' η = 3.5	'0.127 m' η = 17.5	'0.127 m' η = 7.6	'0.127 m' η = 12.1	N.P. ⁽⁴⁾	'0.127 m' η = 4.7	N.P. ⁽⁴⁾	'0.127 m' Cumple	Cumple	Cumple	CUMPLE
P11 - P12	Cumple	'0.000 m' Cumple	'1.765 m' η = 7.7	'1.417 m' η = 8.9	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 8.9
P4 - P3	Cumple	'0.000 m' Cumple	'1.765 m' η = 9.4	'1.417 m' η = 10.5	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 10.5

Notación:

Disp.: Disposiciones relativas a las armaduras
 Arm.: Armadura mínima y máxima
 Q: Estado límite de agotamiento frente a cortante (combinaciones no sísmicas)
 N,M: Estado límite de agotamiento frente a solicitaciones normales (combinaciones no sísmicas)
 T_c: Estado límite de agotamiento por torsión. Compresión oblicua.
 T_{st}: Estado límite de agotamiento por torsión. Tracción en el alma.
 T_{st}: Estado límite de agotamiento por torsión. Tracción en las armaduras longitudinales.
 TNM_x: Estado límite de agotamiento por torsión. Interacción entre torsión y esfuerzos normales. Flexión alrededor del eje X.
 TV_x: Estado límite de agotamiento por torsión. Interacción entre torsión y cortante en el eje X. Compresión oblicua
 TV_y: Estado límite de agotamiento por torsión. Interacción entre torsión y cortante en el eje Y. Compresión oblicua
 TV_s: Estado límite de agotamiento por torsión. Interacción entre torsión y cortante en el eje X. Tracción en el alma.
 TV_s: Estado límite de agotamiento por torsión. Interacción entre torsión y cortante en el eje Y. Tracción en el alma.
 T,Disp_{st}: Estado límite de agotamiento por torsión. Separación entre las barras de la armadura longitudinal.
 T,Disp_{st}: Estado límite de agotamiento por torsión. Separación entre las barras de la armadura transversal.
 -:
 x: Distancia al origen de la barra
 η: Coeficiente de aprovechamiento (%)
 N.P.: No procede

Comprobaciones que no proceden (N.P.):

- ⁽¹⁾ La comprobación del estado límite de agotamiento por torsión no procede, ya que no hay momento torsor.
- ⁽²⁾ La comprobación no procede, ya que no hay interacción entre torsión y esfuerzos normales.
- ⁽³⁾ No hay esfuerzos que produzcan tensiones normales para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.
- ⁽⁴⁾ No hay interacción entre torsión y cortante para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Vigas	COMPROBACIONES DE FISURACIÓN (CÓDIGO ESTRUCTURAL)						Estado
	W _{k,C,sup.}	W _{k,C,Lat.Der.}	W _{k,C,inf.}	W _{k,C,Lat.Izq.}	σ _{sr}	V _{fis}	
P9 - P10	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P10 - P11	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P13 - P14	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P2 - P1	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE



Comprobaciones E.L.U.

Cimentación Domo 2.V01

Fecha: 04/09/22

Vigas	COMPROBACIONES DE FISURACIÓN (CÓDIGO ESTRUCTURAL)						Estado
	$W_{k,C, sup.}$	$W_{k,C, Lat. Der.}$	$W_{k,C, inf.}$	$W_{k,C, Lat. Izq.}$	σ_{sr}	V_{fis}	
P6 - P5	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P5 - P4	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P12 - P14	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P14 - P1	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	Cumple	CUMPLE
P1 - P3	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	Cumple	CUMPLE
P11 - P12	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	Cumple	CUMPLE
P4 - P3	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	Cumple	CUMPLE

Vigas	COMPROBACIONES DE FISURACIÓN (CÓDIGO ESTRUCTURAL)							Estado
	$W_{k,C, sup.}$	$W_{k,C, Lat. Der.}$	$W_{k,C, inf.}$	$W_{k,C, Lat. Izq.}$	σ_{sr}	V_{fis}	-	
P8 - P7	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	Cumple	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE
P7 - P6	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	x: 0.294 m Cumple	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE
P8 - P9	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽²⁾	Cumple	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE

Notación:

$W_{k,C, sup.}$: Cálculo del ancho de fisura: Cara superior
 $W_{k,C, Lat. Der.}$: Cálculo del ancho de fisura: Cara lateral derecha
 $W_{k,C, inf.}$: Cálculo del ancho de fisura: Cara inferior
 $W_{k,C, Lat. Izq.}$: Cálculo del ancho de fisura: Cara lateral izquierda
 σ_{sr} : Área mínima de armadura
 V_{fis} : Fisuración debida a tensiones tangenciales de cortante
 x : Distancia al origen de la barra
 η : Coeficiente de aprovechamiento (%)
 N.P.: No procede
 -: -

Comprobaciones que no proceden (N.P.):

⁽¹⁾ No hay esfuerzos que produzcan tensiones normales para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.
⁽²⁾ La comprobación no procede, ya que la tensión de tracción máxima en el hormigón no supera la resistencia a tracción del mismo.

ANEXO 3: COMPROBACIONES DE DIMENSIONAMIENTO DE CIMENTACIÓN-

DOMO 3

1. VIGAS..... 2
 1.1. Cimentación..... 2



1. VIGAS

1.1. Cimentación

Vigas	COMPROBACIONES DE RESISTENCIA (CÓDIGO ESTRUCTURAL)														Estado	
	Disp.	Arm.	Q	N,M	T _c	T _{st}	T _{sl}	TNM _x	TV _x	TV _y	TV _{xS_t}	TV _{yS_t}	T,Disp _{-sl}	T,Disp _{-st}		-
P5 - P6	Cumple	'0.336 m' Cumple	'0.000 m' η = 24.6	'1.009 m' η = 20.8	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽³⁾	CUMPLE η = 24.6
P3 - P2	Cumple	'0.336 m' Cumple	'0.000 m' η = 22.8	'1.009 m' η = 20.0	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽³⁾	CUMPLE η = 22.8
P4 - P5	Cumple	'0.341 m' Cumple	'4.095 m' η = 27.1	'2.047 m' η = 25.2	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽³⁾	CUMPLE η = 27.1
P4 - P3	Cumple	'0.341 m' Cumple	'0.000 m' η = 25.4	'1.365 m' η = 23.9	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽³⁾	CUMPLE η = 25.4

Vigas	COMPROBACIONES DE RESISTENCIA (CÓDIGO ESTRUCTURAL)														Estado	
	Disp.	Arm.	Q	N,M	T _c	T _{st}	T _{sl}	TNM _x	TV _x	TV _y	TV _{xS_t}	TV _{yS_t}	T,Disp _{-sl}	T,Disp _{-st}		-
P6 - P7	Cumple	Cumple	'1.496 m' η = 11.8	'P7' η = 17.8	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 17.8
P7 - P1	Cumple	Cumple	'0.000 m' η = 18.1	'P7' η = 17.5	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 18.1
P1 - P2	Cumple	Cumple	'1.496 m' η = 11.0	'P1' η = 17.3	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽²⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	CUMPLE η = 17.3

Notación:

Disp.: Disposiciones relativas a las armaduras
 Arm.: Armadura mínima y máxima
 Q: Estado límite de agotamiento frente a cortante (combinaciones no sísmicas)
 N,M: Estado límite de agotamiento frente a solicitaciones normales (combinaciones no sísmicas)
 T_c: Estado límite de agotamiento por torsión. Compresión oblicua.
 T_{st}: Estado límite de agotamiento por torsión. Tracción en el alma.
 T_{sl}: Estado límite de agotamiento por torsión. Tracción en las armaduras longitudinales.
 TNM_x: Estado límite de agotamiento por torsión. Interacción entre torsión y esfuerzos normales. Flexión alrededor del eje X.
 TV_x: Estado límite de agotamiento por torsión. Interacción entre torsión y cortante en el eje X. Compresión oblicua
 TV_y: Estado límite de agotamiento por torsión. Interacción entre torsión y cortante en el eje Y. Compresión oblicua
 TV_{xS_t}: Estado límite de agotamiento por torsión. Interacción entre torsión y cortante en el eje X. Tracción en el alma.
 TV_{yS_t}: Estado límite de agotamiento por torsión. Interacción entre torsión y cortante en el eje Y. Tracción en el alma.
 T,Disp_{-sl}: Estado límite de agotamiento por torsión. Separación entre las barras de la armadura longitudinal.
 T,Disp_{-st}: Estado límite de agotamiento por torsión. Separación entre las barras de la armadura transversal.
 -: -
 x: Distancia al origen de la barra
 η: Coeficiente de aprovechamiento (%)
 N.P.: No procede

Comprobaciones que no proceden (N.P.):

⁽¹⁾ La comprobación del estado límite de agotamiento por torsión no procede, ya que no hay momento torsor.
⁽²⁾ La comprobación no procede, ya que no hay interacción entre torsión y esfuerzos normales.
⁽³⁾ No hay esfuerzos que produzcan tensiones normales para ninguna combinación. Por lo tanto, la comprobación no procede.

Vigas	COMPROBACIONES DE FISURACIÓN (CÓDIGO ESTRUCTURAL)					Estado	
	W _{k,C,sup.}	W _{k,C,Lat.Der.}	W _{k,C,inf.}	W _{k,C,Lat.Izq.}	σ _{sr}		V _{fis}
P5 - P6	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P3 - P2	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P4 - P5	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P4 - P3	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P6 - P7	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P7 - P1	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE
P1 - P2	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	N.P. ⁽¹⁾	Cumple	CUMPLE



Comprobaciones E.L.U.

Cimentación Domo 3.V01

Fecha: 04/09/22

Vigas	COMPROBACIONES DE FISURACIÓN (CÓDIGO ESTRUCTURAL)						Estado
	$W_{k,C,sup.}$	$W_{k,C,lat.Der.}$	$W_{k,C,inf.}$	$W_{k,C,lat.Izq.}$	σ_{sr}	V_{fis}	
<p>Notación:</p> <p>$W_{k,C,sup.}$: Cálculo del ancho de fisura: Cara superior $W_{k,C,lat.Der.}$: Cálculo del ancho de fisura: Cara lateral derecha $W_{k,C,inf.}$: Cálculo del ancho de fisura: Cara inferior $W_{k,C,lat.Izq.}$: Cálculo del ancho de fisura: Cara lateral izquierda σ_{sr}: Área mínima de armadura V_{fis}: Fisuración debida a tensiones tangenciales de cortante x: Distancia al origen de la barra η: Coeficiente de aprovechamiento (%) N.P.: No procede</p>							
Comprobaciones que no proceden (N.P.): ⁽¹⁾ La comprobación no procede, ya que la tensión de tracción máxima en el hormigón no supera la resistencia a tracción del mismo.							

ANEJO 08. CÁLCULO DE UNIONES

DENOMINACIÓN	TITULACIÓN	MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
	PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).	
	CENTRO EDUCATIVO	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.

ÍNDICE

1. OBJETIVOS DEL ANEJO	4
2. TIPOS DE UNIONES	4
2.1. DISEÑO DE LA UNIÓN GOOD KHARMA	5
3. DIMENSIONAMIENTO DE UNIONES EN DOMO 1	8
3.1. CÁLCULO GEOMÉTRICO DE LA UNIÓN CARPINTERA	8
3.2. DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS UNIONES	14
3.2.1. UNIÓN MECÁNICA PARA EL MONTAJE DE TRIÁNGULOS	15
3.2.1.1. Comprobación a carga axial	16
3.2.2. UNIÓN MECÁNICA PARA LA UNIÓN ENTRE TRIÁNGULOS	17
4. DIMENSIONAMIENTO DE UNIONES EN DOMO 2	20
4.1. CÁLCULO GEOMÉTRICO DE LA UNIÓN CARPINTERA	20
4.2. DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS UNIONES	21
4.2.1. UNIÓN MECÁNICA PARA EL MONTAJE DE TRIÁNGULOS	22
4.2.1.1. Comprobación a carga axial	22
4.2.2. UNIÓN MECÁNICA PARA LA UNIÓN ENTRE TRIÁNGULOS	24
5. DIMENSIONAMIENTO DE UNIONES EN DOMO 3	26
5.1. CÁLCULO GEOMÉTRICO DE LA UNIÓN CARPINTERA	26
5.2. DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS UNIONES	27
5.2.1. UNIÓN MECÁNICA PARA EL MONTAJE DE TRIÁNGULOS	28
5.2.1.1. Comprobación a carga axial	28
5.2.2. UNIÓN MECÁNICA PARA LA UNIÓN ENTRE TRIÁNGULOS	30

Listado de ilustraciones

Ilustración 1. Ángulos de corte en Good Kharma.	6
Ilustración 2. Triangulación sin curvatura.	6
Ilustración 3. Ilustración del cálculo del ángulo axial.	7
Ilustración 4. Disposición de los triángulos lado derecho testa/cara interior.	7
Ilustración 5. Esquema de montaje Triángulo 1 – Domo 1.	8
Ilustración 6. Esquema de montaje de triángulo 3 – Domo 1.	10
Ilustración 7. Esquema de montaje de triángulo 4 – Domo 1.	11
Ilustración 8. Esquema de montaje de triángulo 5 – Domo 1.	12
Ilustración 9. Esquema de montaje de triángulo 6 – Domo 1.	13
Ilustración 10. Unión para el montaje de triángulos.	14
Ilustración 11. Unión entre triángulos.	15
Ilustración 12. Separaciones mínimas a carga axial Tirafondo.	15
Ilustración 13. Modos de fallo en cortadura simple.	18
Ilustración 14. Esquema de montaje Triángulo 1 – Domo 2.	20
Ilustración 15. Unión para el montaje de triángulos -domo 2.	21
Ilustración 16. Unión entre triángulos – Domo 2.	22
Ilustración 17. Separaciones mínimas a carga axial Tirafondo.	22
Ilustración 18. Modos de fallo en cortadura simple.	24
Ilustración 19. Esquema de montaje Triángulo 1 – Domo 3.	26
Ilustración 20. Unión para el montaje de triángulos -Domo 3.	27
Ilustración 21. Unión entre triángulos – Domo 3.	28
Ilustración 22. Separaciones mínimas a carga axial Tirafondo.	28
Ilustración 23. Modos de fallo en cortadura simple.	30

Listado de Tablas

Tabla 1. Ángulos de triángulo en Triángulo 1 – Domo 1.	8
Tabla 2. Ángulos axiales de corte de Triángulo 1 – Domo 1.	8
Tabla 3. Esquema de montaje triángulo 2 – Domo 1.	9
Tabla 4. Ángulos de triángulo en Triángulo 2 – Domo 1.	9
Tabla 5. Ángulos axiales del triángulo 2 – Domo 1.	9
Tabla 6. Ángulos de triángulo en Triángulo 3.	10
Tabla 7. Ángulos axiales en Triángulo 3.	10
Tabla 8. Ángulos de triángulo en Triángulo 4 – Domo 1.	11
Tabla 9. Ángulos axiales en Triángulo 4 – Domo 1.	11
Tabla 10. Ángulos de triángulo en Triángulo 5 – Domo 1.	12
Tabla 11. Ángulos axiales en Triángulo 5 – Domo 1.	12
Tabla 12. Ángulos de triángulo en Triángulo 6 – Domo 1.	13
Tabla 13. Ángulos axiales en Triángulo 6 – Domo 1.	13
Tabla 14. Ángulos de triángulo de las piezas laterales superiores en puerta - Domo 1.	13
Tabla 15. Ángulos de triángulo de las piezas laterales inferiores en puerta - Domo 1.	14
Tabla 16. Cálculo del ángulo axial de las piezas P1 y P2 - Domo 1.	14
Tabla 17. Cálculo del ángulo axial de las piezas P3 y P4 - Domo 1.	14
Tabla 18. Cálculo del ángulo axial de las piezas P5 y P6 - Domo 1.	14
Tabla 19. Separaciones y distancias a la testa y a los bordes mínimas en tirafondos cargados axialmente.	15
Tabla 20. Dimensiones de tirafondos - montaje de triángulos – Domo 1.	16
Tabla 21. Resistencias características de la capacidad de carga axial. Montaje de triángulos – Domo 1.	17
Tabla 22. Comprobaciones de la capacidad de carga axial en montaje de triángulos – Domo 1.	17
Tabla 23. Dimensiones y separaciones mínimas en la unión de triángulos - Domo 1.	18
Tabla 24. Capacidad de carga lateral - unión entre triángulos – Domo 1.	19
Tabla 25. Ángulos de triángulo en Triángulo 1 – Domo 2.	20
Tabla 26. Ángulos axiales de corte de Triángulo 1 – Domo 2.	20
Tabla 27. Esquema de montaje triángulo 2 – Domo 2.	21
Tabla 28. Ángulos de triángulo en Triángulo 2 – Domo 2.	21
Tabla 29. Ángulos axiales del triángulo 2 – Domo 2.	21
Tabla 30. Separaciones y distancias a la testa y a los bordes mínimas en tirafondos cargados axialmente.	22
Tabla 31. Dimensiones de tirafondos - montaje de triángulos – Domo 2.	22
Tabla 32. Separaciones mínimas en uniones entre triángulos - Domo 2.	23
Tabla 33. Comprobaciones de la capacidad de carga axial en montaje de triángulos – Domo 2.	24
Tabla 34. Separaciones mínimas en uniones con tirafondos entre triángulos - Domo 2.	25
Tabla 35. Capacidad de carga lateral - unión entre triángulos – Domo 2.	25
Tabla 36. Ángulos de triángulo en Triángulo 1 – Domo 3.	26
Tabla 37. Ángulos axiales de corte de Triángulo 1 – Domo 3.	26
Tabla 38. Esquema de montaje triángulo 2 – Domo 3.	27
Tabla 39. Ángulos de triángulo en Triángulo 2 – Domo 3.	27
Tabla 40. Ángulos axiales del triángulo 2 – Domo 3.	27
Tabla 41. Separaciones y distancias a la testa y a los bordes mínimas en tirafondos cargados axialmente.	28
Tabla 42. Dimensiones de tirafondos - montaje de triángulos – Domo 3.	28
Tabla 43. Resistencias características de la capacidad de carga axial. Montaje de triángulos – Domo 3.	29
Tabla 44. Comprobaciones de la capacidad de carga axial en montaje de triángulos – Domo 3.	30
Tabla 45. Separaciones mínimas en tirafondos de uniones entre triángulos - Domo 3.	31
Tabla 46. Capacidad de carga lateral - unión entre triángulos – Domo 3.	31

1. OBJETIVOS DEL ANEJO

El presente anejo tiene como objetivo el diseño y verificación de seguridad de las uniones del domo. El diseño y la concepción del elemento de unión condicionará: los métodos de fabricación, los sistemas de montaje, e incluso el dimensionamiento de la propia estructura, que deberá de estar en consonancia con el tipo de unión, afectando significativamente al presupuesto de ejecución material de la estructura.

Por otro lado, las posibilidades de diseño de una unión en estructuras geodésicas son enormes y no es posible definir una única solución para cada caso, pues existen multitud de domos geodésicos contruidos con uniones de diferentes características y tamaños. Por lo tanto, dada la importancia de este elemento se realiza este anejo específico para las uniones. Para este proyecto, se empleará para todos los domos la unión conocida por el nombre de Good Karma, que a priori presenta grandes ventajas ya que agiliza significativamente el montaje de la estructura, dado que sus cortes de las uniones carpinteras hacen encajar el domo de forma eficiente.

Como idea principal, el mejor sistema de unión será aquel que sea el más simple y con menor número de herrajes. Por lo que, la unión Good Karma cumple con dicha premisa ya que es una unión fácil de ejecutar y fácil de montar, con el mínimo uso posible de elementos de fijación adicionales, la concepción en el diseño de estas uniones está basado en esta premisa.

El dimensionamiento de las uniones de la estructura se realiza siguiendo los criterios del Código Técnico de la Edificación – Seguridad Estructural Madera.

2. TIPOS DE UNIONES

Como se ha comentado en el epígrafe anterior, las posibilidades creativas en el diseño de las uniones son casi infinitas, siendo imposible definir una única solución para cada situación. Por lo tanto, el éxito del diseño de una unión, cumpliendo los objetivos de posibilidad de estandarización que persigue este trabajo, serán los siguientes:

- Simplicidad. Cuanto más sencilla sea la unión tendrá mejor resultado estético y mecánico, además de facilitar su cálculo.
- Mínimo material auxiliar. Cuantos menos herrajes se necesiten mejor será el comportamiento al fuego y su aspecto será más limpio.

- Estandarización, prefabricación y montaje. Se preferirán soluciones que requieran un proceso de fabricación y montaje sencillos.

Las uniones se pueden clasificar en 3 grandes grupos:

- Uniones carpinteras
- Uniones mecánicas
 - Tipo clavijas. (Clavos, pernos, pasadores, grapas, tirafondos)
 - Conectores: (Anillo, placa, dentados, placa clavo)
- Uniones encoladas.

Cada medio de unión tiene una adecuación en función principalmente de la esquadria de las piezas de madera y del tipo estructural. Se exponen las prácticas más habituales:

Uniones carpinteras

En el pasado constituyeron el único tipo de unión en las construcciones con madera. Se conoce también como unión tradicional. Este tipo de unión fue perdiendo importancia en las construcciones por ser poco eficiente, no obstante, empezó a ganar peso gracias a la fabricación mediante control numérico de este tipo de uniones, ya que la precisión alcanzada es muy elevada y ha logrado reducir costes significativos.

Actualmente, se utilizan para luces menores de hasta 10 o 12 metros, en muchas ocasiones se buscan por su aspecto estético, buscando una apariencia tradicional, pero también resultan muy económicas y presentan un mejor comportamiento al fuego. Aunque, en estructuras de luces mayores no se emplean puesto que requeriría un sobredimensionado de las secciones de la estructura que las hacen poco competitivas económicamente.

En nuestro diseño, se emplearán las uniones carpinteras, pues es la forma más utilizada por excelencia en la construcción de domos, aunque siempre deberá de ir combinada con uniones de tipo mecánico como tornillería, clavos o grapas. Pero este tipo de unión aplicado a estructuras geodésicas poco tienen que ver con uniones tradicionales de este tipo, como se mostrará más adelante. Además, el uso de este tipo de unión hace que la estructura sea más económica, ya que los domos contruidos con madera rara vez alcanzan luces mayores de 12 a 14 metros.

Uniones mecánicas

Este sistema agrupa varios tipos de elementos de fijación. Se destacan los más frecuentes:

Elementos de tipo clavija

- Clavos. Adecuados para construcción ligera de madera en la unión entre tableros y piezas de madera aserrada y entre las propias piezas de madera de pequeña escuadría. Tienen capacidad de carga a cortante, pero rara vez aceptan cargas axiales o de extracción. En construcción de domos se suelen utilizar para sistemas auxiliares o provisionales.
- Pernos. Se suelen emplear en uniones entre piezas de madera maciza y madera laminada encolada. Resultan adecuados para cargas pequeñas y grandes. Permiten la conexión entre piezas de madera a través de chapas metálicas ubicadas tanto en el interior como en el exterior.
- Pasadores. Generalmente se usan en uniones entre piezas de mediana y gran escuadría. Su ventaja frente al perno es el mejor comportamiento al fuego, siendo más fácil su ocultación. Permite conexión entre chapas de acero interiores, pero no exteriores. La colocación requiere un grado de ajuste muy alto, lo que exige mucha precisión mecanizando agujeros. Este sistema no es recomendable para el tipo de domos geodésicos que se estudian en este proyecto.
- Grapas. Son muy útiles para la conexión entre tableros y piezas de madera aserrada de pequeña escuadría, con gruesos comprendidos entre 38 y 50 mm aproximadamente. La aplicación característica es la fabricación de entramados ligeros de muros y forjados para la construcción prefabricada, por lo que sería muy favorable para la construcción de domos.
- Tirafondos. Se emplean en fijación de piezas de madera de pequeña y mediana escuadría. El comportamiento es similar al de los clavos, pero con la gran ventaja de poder resistir esfuerzos axiales y de extracción, estando especialmente indicados para estos últimos, además de resistir esfuerzos a cortante. Por lo que este tipo de unión es un buen aliado, configurando un sistema que es necesario en determinados tipos de uniones de domos geodésicos.

Conectores

Los conectores tienen la ventaja de tener mayor capacidad de transmisión de cargas que los pernos y pasadores, pero también requieren separaciones mayores. Generalmente, se recurre a ellos cuando la capacidad de los pernos por sí mismo no es suficiente.

Normalmente los conectores en estructuras de madera suelen estar patentados, como los conectores de anillo, de placa, dentados, placas de clavo, etc. Estas opciones son las más habituales en el mercado. No obstante, ninguna de ellas sería óptima para la construcción de domos geodésicos, aunque sí lo son para otro tipo de formas estructurales.

Para este proyecto se empleará como sistema principal de unión el sistema Good Karma para todas las cúpulas geodésicas, que se clasifica como una unión tipo carpintera y que irá acompañado de elementos tipo clavija como los tirafondos.

A continuación, se procede a realizar una explicación pormenorizada de la unión tipo Good Karma y posteriormente, se realiza el cálculo de diseño y dimensionamiento de las uniones de los 3 domos geodésicos, tanto su unión carpintera como sus uniones mecánicas.

2.1. DISEÑO DE LA UNIÓN GOOD KHARMA

Este epígrafe tiene como objetivo calcular la geometría de la unión tipo Good Karma, que constituye la unión más ampliamente utilizada en uniones de tipo carpinteras para domos geodésicos de madera. Posteriormente, se realizarán las comprobaciones de seguridad para verificar el correcto comportamiento estructural.

El sistema Good Karma se basa en realizar un corte en doble ángulo en ambos extremos de las piezas de madera de la estructura. Es decir, se debe de calcular el ángulo de corte en dos planos diferentes; en el plano del ancho de la pieza calcularemos el ángulo necesario para formar el triángulo, y en el plano del canto de la pieza calcularemos el ángulo que nos proporcionará la curvatura del domo deseada; denominamos a este último el ángulo axial.

A continuación, se muestra una figura donde se ilustran ambos ángulos de corte. Cabe destacar que estos ángulos que aparecen en la figura son los ángulos complementarios. Esto se debe a una razón de fabricación, puesto que las máquinas de corte utilizadas (ingletadoras) se debe de marcar el ángulo complementario, es decir, si queremos tener un corte de 60° en la pieza, en la máquina deberemos de poner que el corte sea de 30°, que sería la parte proporcional al ángulo recto que deberíamos de eliminar de la pieza para obtener la forma deseada.

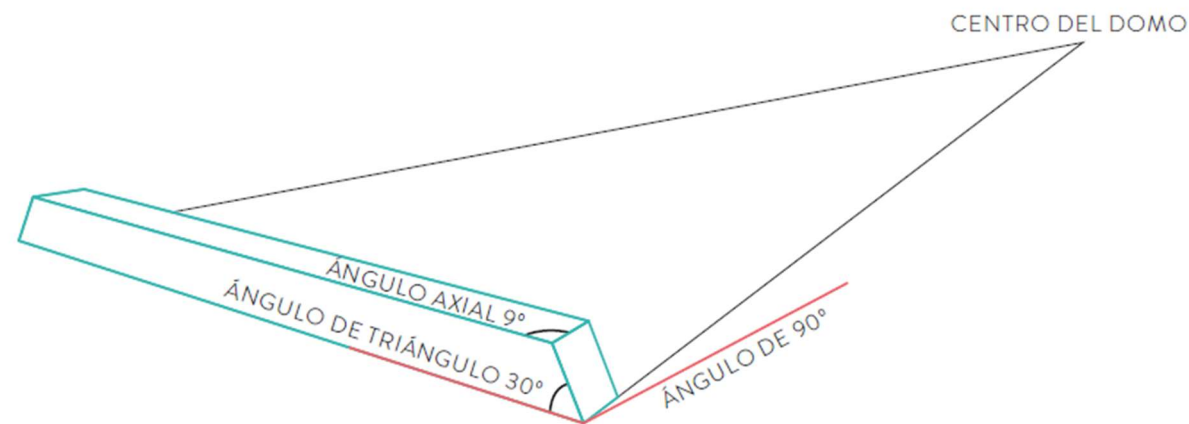


Ilustración 1. Ángulos de corte en Good Karma.

El corte se puede realizar con una ingletadora o corte con control numérico, este corte debe de contener los ángulos en los dos planos de manera simultánea, más conocido como corte a inglete con doble ángulo. Esto proporcionará una correcta triangulación del domo, además de la curvatura totalmente esférica, donde los vértices están contenidos en la esfera teórica que circunscribe la estructura.

En función de la forma del triángulo cada elemento viga tendrá unos ángulos de corte diferentes en ambos extremos, y esto determinará el número total de piezas que sean totalmente iguales incluido sus cortes, ya que el hecho de que estas piezas sean exactamente iguales es lo que supone gran interés para la estandarización de los domos.

A continuación, se procede a desarrollar la metodología de cálculo de los cortes de la unión. Dada la configuración alámbrica de la estructura que se ha obtenido hasta ahora a través de los métodos de subdivisión de esferas, se han obtenido una serie de triángulos con diferentes dimensiones repartidos de forma simétrica sobre la esfera. Estas líneas de referencia configuran los ejes sobre los que partirá cada triángulo. Este eje simula la línea de contacto entre dos triángulos en su arista contenida en la parte exterior del domo. Es decir, desde esas líneas la sección “crece” hacia el interior del triángulo en el ancho de la pieza y hacia el interior del domo en su canto. Por tanto, según este sistema de unión las piezas se deben de disponer dobles.

En el “Anejo 07. Dimensionamiento”, se ha calculado, por ejemplo, para el domo 1 de frecuencia V4 y 10 metros de diámetro, que la sección resistente debe de tener las dimensiones de 90x90 mm. Por tanto, habrá que disponer dos piezas de madera de sección 90x45mm para que ambas sumen la sección resistente deseada. Del mismo modo pasará con el resto de los domos, si la sección resistente calculada es de 100x100 mm, se deberán de disponer listones dobles de 100x50 mm apoyados en su

canto, para que unidos formen la sección resistente calculada. No obstante, al tener una disposición simétrica de las piezas de igual longitud a cada lado del eje se considera que esto no proporcionará excentricidades adicionales a la estructura, y se dimensionarán los elementos de fijación con tirafondos de manera que estas dos piezas trabajen conjuntamente, como si fueran una sola.

Para calcular el ángulo de corte denominado “ángulo de triángulo” basta con medir el ángulo que forman las aristas de los triángulos entre sí. Para que se entienda mejor, si se cortasen las piezas de madera solo con el ángulo del triángulo nos quedaría una superficie triangular totalmente plana como la que se muestra en la siguiente figura.

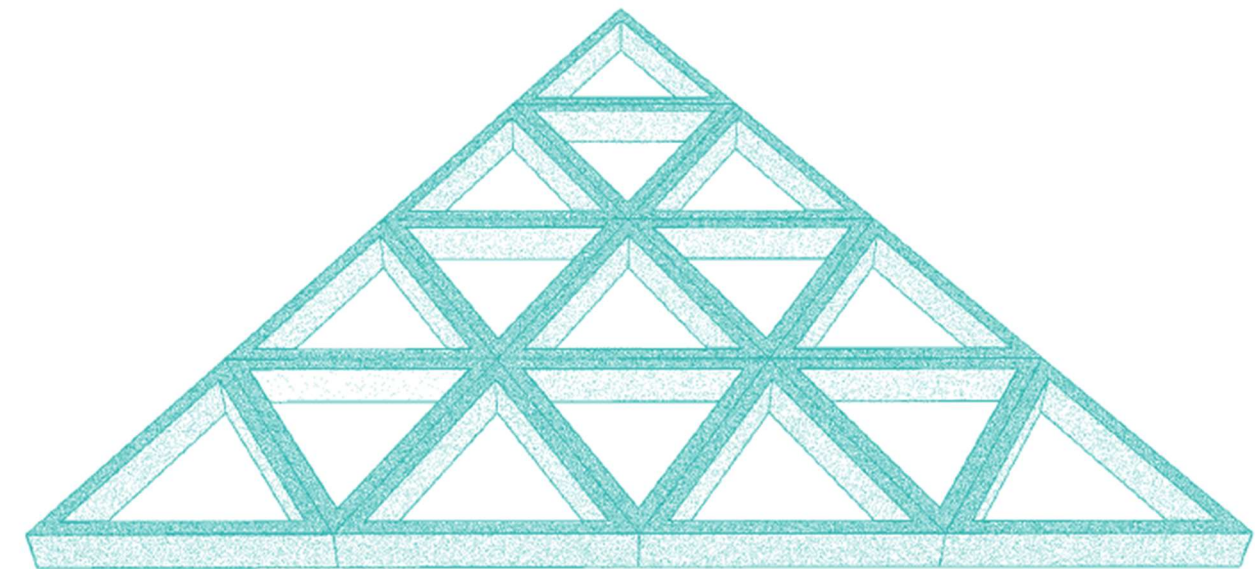


Ilustración 2. Triangulación sin curvatura.

Para configurar la curvatura esférica hay que añadir el corte en el plano del canto de la pieza, denominado el ángulo axial. Para poder calcular este ángulo basta con trazar una línea entre los vértices del triángulo de la estructura alámbrica con el centro del domo. De manera que por cada triángulo tenemos 3 líneas auxiliares que unen los vértices con el centro del domo.

Debido a que cada tipo de triángulo siempre tiene una misma disposición en el domo, es decir, nunca se encuentra girado respecto una posición u otra donde se encuentre, siempre habrá el mismo ángulo axial entre los vértices de ese mismo triángulo que se repite por la estructura. Por tanto, basta solo con hallar los ángulos axiales para cada uno de los vértices de cada tipo de triángulo.

A modo de ejemplo, en la siguiente figura se muestra un domo geodésico en V4 con las líneas auxiliares rojas que sirven para medir el ángulo axial.

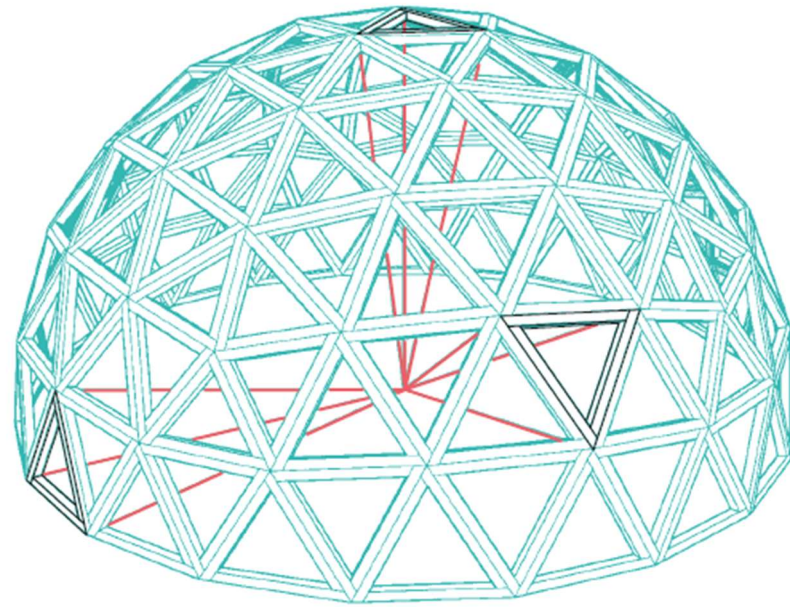


Ilustración 3. Ilustración del cálculo del ángulo axial.

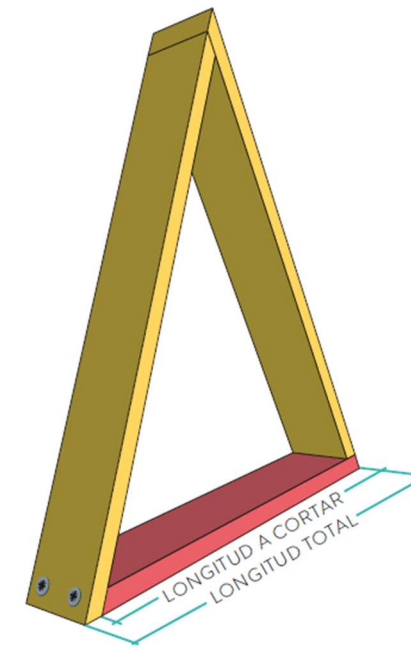


Ilustración 4. Disposición de los triángulos lado derecho testa/cara interior.



Otra característica imprescindible del sistema de unión Good Karma se basa en el orden de colocación de las piezas de madera de un mismo triángulo. Es decir, se ha de diseñar para que una de las piezas este colocada por encima de la otra en uno de los lados. La manera de tener una referencia clara es que si miramos a cualquiera de los triángulos desde la cara exterior de su disposición en el domo donde sus vértices tienen mayor longitud que los interiores, la pieza de madera que queda a la derecha debe de estar conectada con la testa de la pieza de la izquierda. Es decir, deben de estar unidas la cara o el plano interior del triángulo de la pieza de la derecha con la testa de la pieza de la izquierda.

Se muestra a continuación, una ilustración donde refleja la disposición testa/plano interior de cada pieza tal y como se ha descrito. Cabe añadir, que la longitud a cortar de los listones no será igual a la longitud total de la barra puesto que debido a esta configuración del triángulo hay que restarle el ancho de la pieza sobre la que apoya, teniendo en cuenta el coseno del ángulo en dicha longitud puesto que es una superficie inclinada.

3. DIMENSIONAMIENTO DE UNIONES EN DOMO 1

3.1. CÁLCULO GEOMÉTRICO DE LA UNIÓN CARPINTERA

A continuación, se exponen los cálculos justificativos de los triángulos diferentes que componen el domo geodésico número 1. Estos 6 triángulos están formados a partir de 16 piezas con diferentes cortes y longitudes, enumeradas de la A a la P.

En el documento 2 Planos se encontrarán los planos de fabricación de la estructura de Domo 1 obtenidos a partir de los cálculos mostrados en las siguientes tablas.

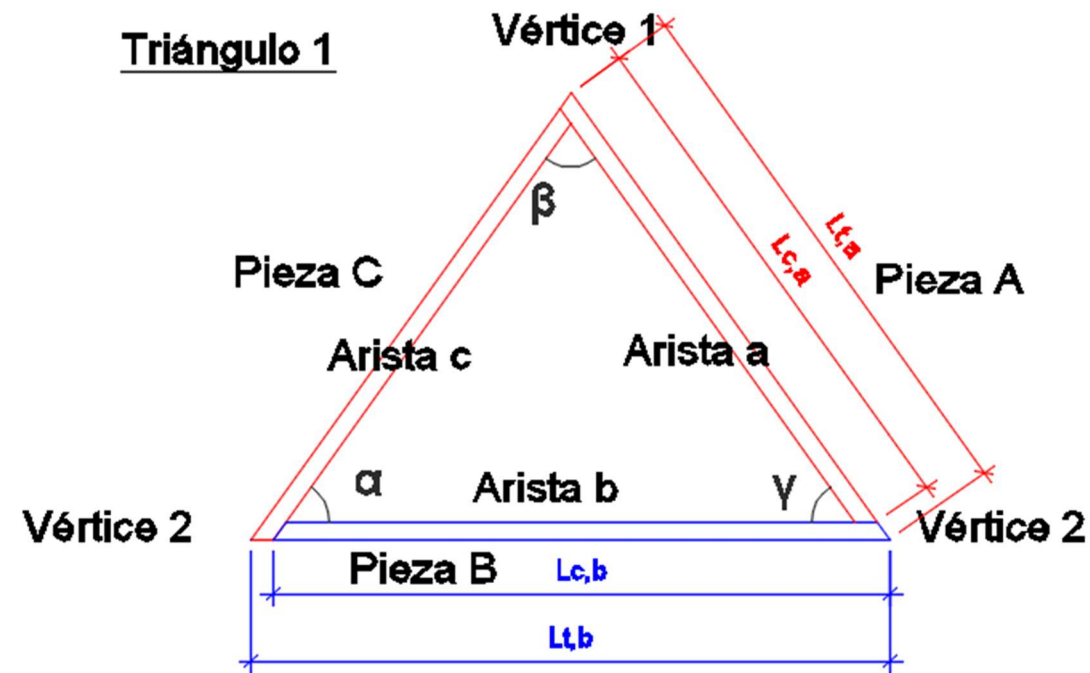


Ilustración 5. Esquema de montaje Triángulo 1 – Domo 1.

Cálculo del ángulo de triángulo del Triángulo 1			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 1 - Cálculos y mediciones			
Longitud total arista a	L	1,380	m
Longitud total arista b	L	1,606	m
Longitud total arista c	L	1,380	m
Ángulo α	α	54,40	Grados
Ángulo β	β	71,21	Grados
Ángulo γ	γ	54,40	Grados
Triángulo 1 - Dimensiones de las piezas			
Longitud de corte pieza A	L	1,324	m
Longitud de corte pieza B	L	1,551	m
Longitud de corte pieza C	L	1,332	m
Ángulo de triángulo pieza A vértice 1	A _{A,v1}	18,79	Grados
Ángulo de triángulo pieza A vértice 2	A _{A,v2}	35,60	Grados
Ángulo de triángulo pieza B vértice 2	A _{B,v2}	35,60	Grados
Ángulo de triángulo pieza C vértice 1	A _{C,v1}	18,79	Grados
Ángulo de triángulo pieza C vértice 2	A _{C,v2}	35,60	Grados

Tabla 1. Ángulos de triángulo en Triángulo 1 – Domo 1.

Cálculo del ángulo de axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 1 - Ángulo axial			
Longitud total arista a	L	1,380	m
Longitud total arista b	L	1,606	m
Longitud total arista c	L	1,380	m
Ángulo con centro de domo A	A _{A,cd}	15,86	Grados
Ángulo con centro de domo B	A _{B,cd}	18,49	Grados
Ángulo con centro de domo C	A _{C,cd}	15,86	Grados
Ángulo axial en Pieza A	A _{A,axial}	7,93	Grados
Ángulo axial en Pieza B	A _{B,axial}	9,24	Grados
Ángulo axial en Pieza C	A _{C,axial}	7,93	Grados

Tabla 2. Ángulos axiales de corte de Triángulo 1 – Domo 1.

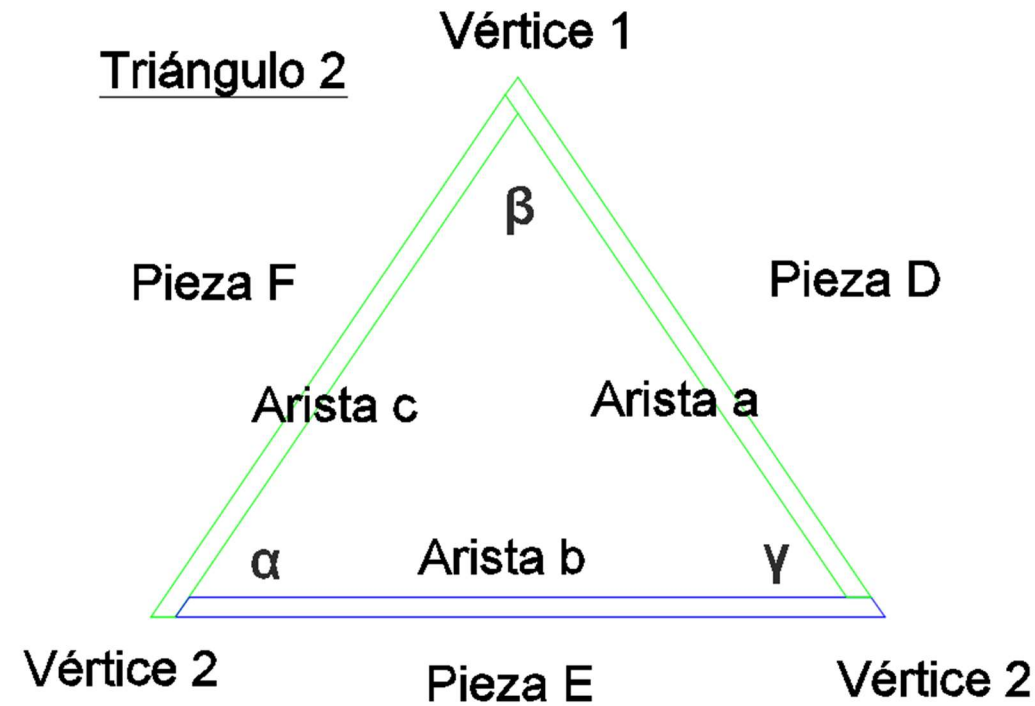


Tabla 3. Esquema de montaje triángulo 2 – Domo 1.

Cálculo del ángulo de triángulo 2			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 2 - Cálculos y mediciones			
Longitud total arista a	L	1,428	m
Longitud total arista b	L	1,606	m
Longitud total arista c	L	1,428	m
Ángulo α	α	55,76	Grados
Ángulo β	β	68,48	Grados
Ángulo γ	γ	55,76	Grados
Triángulo 2 - Dimensiones de las piezas			
Longitud de corte pieza D	L	1,373	m
Longitud de corte pieza E	L	1,552	m
Longitud de corte pieza F	L	1,379	m
Ángulo de triángulo pieza D vértice 1	A _{D,v1}	21,52	Grados
Ángulo de triángulo pieza D vértice 2	A _{D,v2}	34,24	Grados
Ángulo de triángulo pieza E vértice 2	A _{E,v2}	34,24	Grados
Ángulo de triángulo pieza F vértice 1	A _{F,v1}	21,52	Grados
Ángulo de triángulo pieza F vértice 2	A _{F,v2}	34,24	Grados

Tabla 4. Ángulos de triángulo en Triángulo 2 – Domo 1.

Cálculo del ángulo de axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 2 - Ángulo axial			
Longitud total arista a	L	1,428	m
Longitud total arista b	L	1,606	m
Longitud total arista c	L	1,428	m
Ángulo con centro de domo D	A _{D,cd}	16,41	Grados
Ángulo con centro de domo E	A _{E,cd}	18,49	Grados
Ángulo con centro de domo F	A _{F,cd}	16,41	Grados
Ángulo axial en Pieza D	A _{D,axial}	8,21	Grados
Ángulo axial en Pieza E	A _{E,axial}	9,24	Grados
Ángulo axial en Pieza F	A _{F,axial}	8,21	Grados

Tabla 5. Ángulos axiales del triángulo 2 – Domo 1.

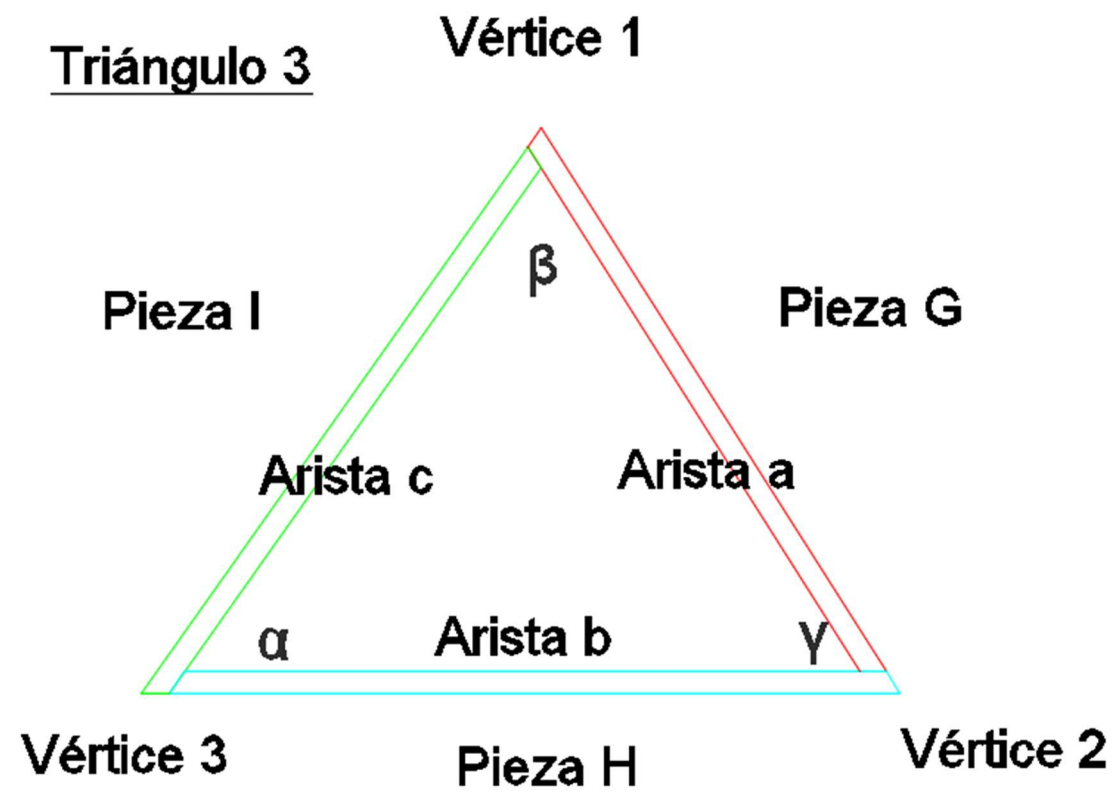


Ilustración 6. Esquema de montaje de triángulo 3 – Domo 1.

Cálculo del ángulo de axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 3 - Ángulo axial			
Longitud total arista a	L	1,380	m
Longitud total arista b	L	1,564	m
Longitud total arista c	L	1,428	m
Ángulo con centro de domo G	$A_{G,cd}$	15,86	Grados
Ángulo con centro de domo H	$A_{H,cd}$	18,00	Grados
Ángulo con centro de domo I	$A_{I,cd}$	16,41	Grados
Ángulo axial en Pieza G	$A_{G,axial}$	7,93	Grados
Ángulo axial en Pieza H	$A_{H,axial}$	9,00	Grados
Ángulo axial en Pieza I	$A_{I,axial}$	8,21	Grados

Tabla 7. Ángulos axiales en Triángulo 3.

Cálculo del ángulo de triángulo 3			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 3 - Cálculos y mediciones			
Longitud total arista a	L	1,380	m
Longitud total arista b	L	1,564	m
Longitud total arista c	L	1,428	m
Ángulo α	α	54,69	Grados
Ángulo β	β	67,71	Grados
Ángulo γ	γ	57,60	Grados
Triángulo 3 - Dimensiones de las piezas			
Longitud de corte pieza G	L	1,326	m
Longitud de corte pieza H	L	1,516	m
Longitud de corte pieza I	L	1,379	m
Ángulo de triángulo pieza G vértice 1	$A_{G,v1}$	22,29	Grados
Ángulo de triángulo pieza G vértice 2	$A_{G,v2}$	32,40	Grados
Ángulo de triángulo pieza H vértice 2	$A_{H,v2}$	32,40	Grados
Ángulo de triángulo pieza H vértice 3	$A_{H,v3}$	35,31	Grados
Ángulo de triángulo pieza I vértice 3	$A_{I,v3}$	35,31	Grados
Ángulo de triángulo pieza I vértice 1	$A_{I,v1}$	22,29	Grados

Tabla 6. Ángulos de triángulo en Triángulo 3.

Triángulo 4

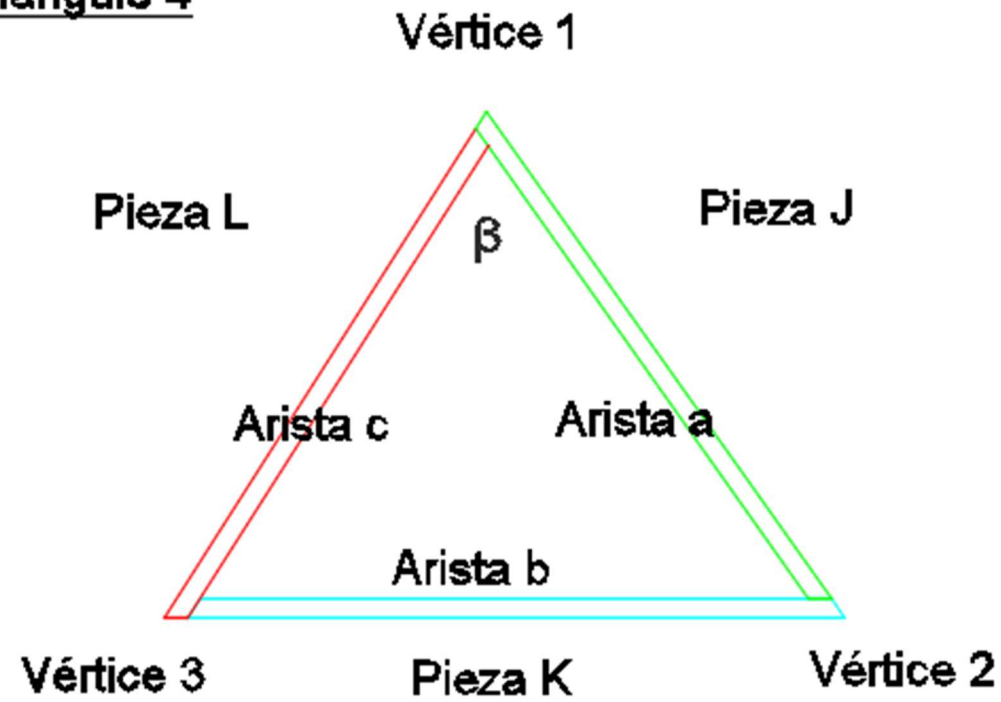


Ilustración 7. Esquema de montaje de triángulo 4 – Domo 1.

Cálculo del ángulo de axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 4 - Ángulo axial			
Longitud total arista a	L	1,380	m
Longitud total arista b	L	1,564	m
Longitud total arista c	L	1,428	m
Ángulo con centro de domo J	$A_{J,cd}$	15,86	Grados
Ángulo con centro de domo K	$A_{K,cd}$	18,00	Grados
Ángulo con centro de domo L	$A_{L,cd}$	16,41	Grados
Ángulo axial en Pieza J	$A_{J,axial}$	7,93	Grados
Ángulo axial en Pieza K	$A_{K,axial}$	9,00	Grados
Ángulo axial en Pieza L	$A_{L,axial}$	8,21	Grados

Tabla 9. Ángulos axiales en Triángulo 4 – Domo 1.

Cálculo del ángulo de triángulo 4			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 3 - Cálculos y mediciones			
Longitud total arista a	L	1,428	m
Longitud total arista b	L	1,564	m
Longitud total arista c	L	1,380	m
Ángulo α	α	57,60	Grados
Ángulo β	β	67,71	Grados
Ángulo γ	γ	54,69	Grados
Triángulo 3 - Dimensiones de las piezas			
Longitud de corte pieza J	L	1,372	m
Longitud de corte pieza K	L	1,516	m
Longitud de corte pieza L	L	1,331	m
Ángulo de triángulo pieza J vértice 1	$A_{J,v1}$	22,29	Grados
Ángulo de triángulo pieza J vértice 2	$A_{J,v2}$	35,31	Grados
Ángulo de triángulo pieza K vértice 2	$A_{K,v2}$	35,31	Grados
Ángulo de triángulo pieza K vértice 3	$A_{K,v3}$	32,40	Grados
Ángulo de triángulo pieza L vértice 3	$A_{L,v3}$	32,40	Grados
Ángulo de triángulo pieza L vértice 1	$A_{L,v1}$	22,29	Grados

Tabla 8. Ángulos de triángulo en Triángulo 4 – Domo 1.

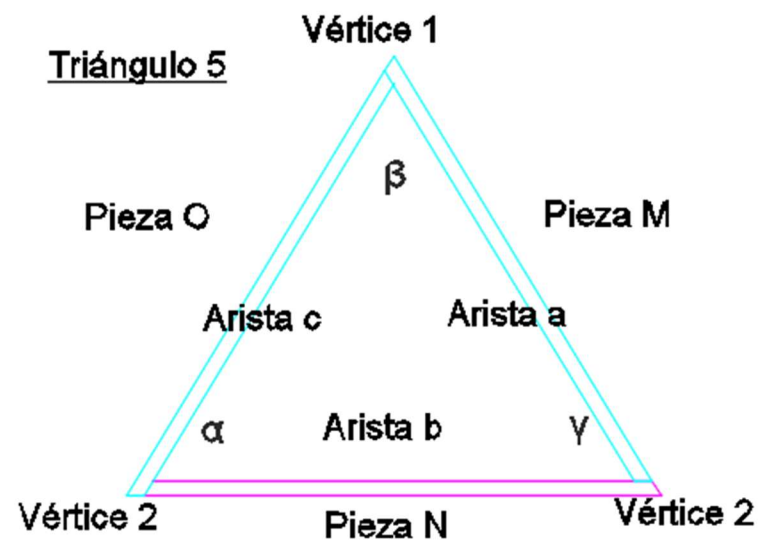


Ilustración 8. Esquema de montaje de triángulo 5 – Domo 1.

Cálculo del ángulo de triángulo 5			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 4 - Cálculos y mediciones			
Longitud total arista a	L	1,564	m
Longitud total arista b	L	1,625	m
Longitud total arista c	L	1,564	m
Ángulo α	α	58,72	Grados
Ángulo β	β	62,56	Grados
Ángulo γ	γ	58,72	Grados
Triángulo 4 - Dimensiones de las piezas			
Longitud de corte pieza M	L	1,512	m
Longitud de corte pieza N	L	1,572	m
Longitud de corte pieza O	L	1,514	m
Ángulo de triángulo pieza M vértice 1	$A_{M,v1}$	27,44	Grados
Ángulo de triángulo pieza M vértice 2	$A_{M,v2}$	31,28	Grados
Ángulo de triángulo pieza N vértice 2	$A_{N,v2}$	31,28	Grados
Ángulo de triángulo pieza O vértice 2	$A_{O,v2}$	31,28	Grados
Ángulo de triángulo pieza O vértice 1	$A_{O,v1}$	27,44	Grados

Tabla 10. Ángulos de triángulo en Triángulo 5 – Domo 1.

Cálculo del ángulo de axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 5 - Ángulo axial			
Longitud total arista a	L	1,564	m
Longitud total arista b	L	1,625	m
Longitud total arista c	L	1,564	m
Ángulo con centro de domo M	$A_{M,cd}$	18,00	Grados
Ángulo con centro de domo N	$A_{N,cd}$	18,70	Grados
Ángulo con centro de domo O	$A_{O,cd}$	18,00	Grados
Ángulo axial en Pieza M	$A_{M,axial}$	9,00032	Grados
Ángulo axial en Pieza N	$A_{N,axial}$	9,34971	Grados
Ángulo axial en Pieza O	$A_{O,axial}$	9,00032	Grados

Tabla 11. Ángulos axiales en Triángulo 5 – Domo 1.

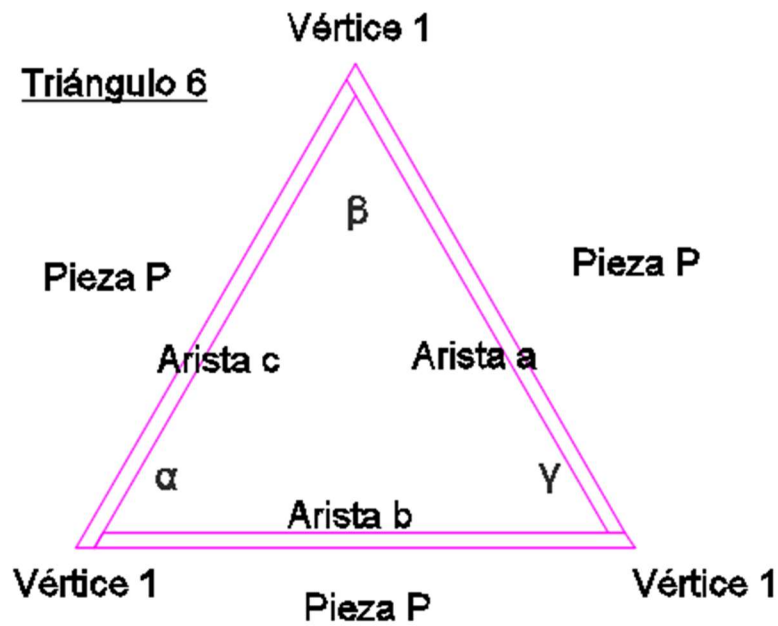


Ilustración 9. Esquema de montaje de triángulo 6 – Domo 1.

Cálculo del ángulo de triángulo 6			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 5 - Cálculos y mediciones			
Longitud total arista a	L	1,625	m
Longitud total arista b	L	1,625	m
Longitud total arista c	L	1,625	m
Ángulo α	α	60,00	Grados
Ángulo β	β	60,00	Grados
Ángulo γ	γ	60,00	Grados
Triángulo 5 - Dimensiones de las piezas			
Longitud de corte pieza P	L _{c,P}	1,573	m
Ángulo de triángulo pieza P vértice 1	A _{P,v1}	30,00	Grados

Tabla 12. Ángulos de triángulo en Triángulo 6 – Domo 1.

Cálculo del ángulo de axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 6 - Ángulo axial			
Longitud total arista a	L	1,625	m
Longitud total arista a	L	1,625	m
Longitud total arista a	L	1,625	m
Ángulo con centro de domo P	A _{P,cd}	18,70	Grados
Ángulo axial en Pieza P	A _{P,axial}	9,35	Grados

Tabla 13. Ángulos axiales en Triángulo 6 – Domo 1.

Por último, se calculan los ángulos que también son necesarios para las piezas triangulares de la puerta. Diferenciamos entre los triángulos laterales superiores y los triángulos laterales inferiores. Por otro lado, también tenemos las piezas denominadas P1, P2, P3, P4, P5 y P6, según planos.

Cálculo del ángulo de triángulos laterales superior de puerta			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo lateral superior 1 - Cálculos y mediciones			
Longitud total arista a	L	1,427	m
Longitud total arista b	L	1,321	m
Longitud total arista c	L	0,552	m
Ángulo α	α	89,54	Grados
Ángulo β	β	67,72	Grados
Ángulo γ	γ	22,74	Grados
Triángulo lateral superior 1 - Cálculos y mediciones			
Longitud de corte pieza A	L	1,311	m
Longitud de corte pieza B	L	1,276	m
Longitud de corte pieza C	L	0,503	m
Ángulo de triángulo pieza A vértice 1	A _{A,v1}	22,28	Grados
Ángulo de triángulo pieza A vértice 2	A _{A,v2}	67,26	Grados
Ángulo de triángulo pieza B vértice 2	A _{B,v2}	67,26	Grados
Ángulo de triángulo pieza C vértice 1	A _{C,v1}	22,28	Grados
Ángulo de triángulo pieza C vértice 2	A _{C,v2}	0,46	Grados

Tabla 14. Ángulos de triángulo de las piezas laterales superiores en puerta - Domo 1.

Cálculo del ángulo de triángulos laterales inferior de puerta			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo lateral inferior 1 - Cálculos y mediciones			
Longitud total arista a	L	1,564	m
Longitud total arista b	L	0,742	m
Longitud total arista c	L	1,389	m
Ángulo α	α	89,13	Grados
Ángulo β	β	28,31	Grados
Ángulo γ	γ	62,56	Grados
Triángulo lateral superior 1 - Cálculos y mediciones			
Longitud de corte pieza A	L	1,514	m
Longitud de corte pieza B	L	0,697	m
Longitud de corte pieza C	L	1,294	m
Ángulo de triángulo pieza A vértice 1	$A_{A,v1}$	61,69	Grados
Ángulo de triángulo pieza A vértice 2	$A_{A,v2}$	27,44	Grados
Ángulo de triángulo pieza B vértice 2	$A_{B,v2}$	27,44	Grados
Ángulo de triángulo pieza C vértice 1	$A_{C,v1}$	61,69	Grados
Ángulo de triángulo pieza C vértice 2	$A_{C,v2}$	0,87	Grados

Tabla 15. Ángulos de triángulo de las piezas laterales inferiores en puerta - Domo 1.

Cálculo del ángulo de axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
P1 Y P2 - Ángulo axial			
Longitud total arista a	L	1,427	m
Longitud total arista a	L	1,427	m
Longitud total arista a	L	1,427	m
Ángulo con centro de domo P	$A_{P,cd}$	16,41	Grados
Ángulo axial en Pieza P	$A_{P,axial}$	8,21	Grados

Tabla 16. Cálculo del ángulo axial de las piezas P1 y P2 - Domo 1.

Cálculo del ángulo de axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
P3 Y P4 - Ángulo axial			
Longitud total arista a	L	1,514	m
Longitud total arista a	L	1,514	m
Longitud total arista a	L	1,514	m
Ángulo con centro de domo P	$A_{P,cd}$	17,41	Grados
Ángulo axial en Pieza P	$A_{P,axial}$	8,71	Grados

Tabla 17. Cálculo del ángulo axial de las piezas P3 y P4 - Domo 1.

Cálculo del ángulo de axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
P5 Y P6 - Ángulo axial			
Longitud total arista a	L	0,742	m
Longitud total arista a	L	0,742	m
Longitud total arista a	L	0,742	m
Ángulo con centro de domo P	$A_{P,cd}$	8,51	Grados
Ángulo axial en Pieza P	$A_{P,axial}$	4,25	Grados

Tabla 18. Cálculo del ángulo axial de las piezas P5 y P6 - Domo 1.

3.2. DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS UNIONES

Tras conocer la forma física de los cortes de las uniones se pretende ahora realizar todos los cálculos justificativos necesarios para comprobar el adecuado comportamiento estructural de las uniones mecánicas del domo geodésico.

Se deberá de comprobar el funcionamiento estructural de los siguientes elementos:

- Uniones mecánicas:
 - Tirafondos para el montaje de triángulos.

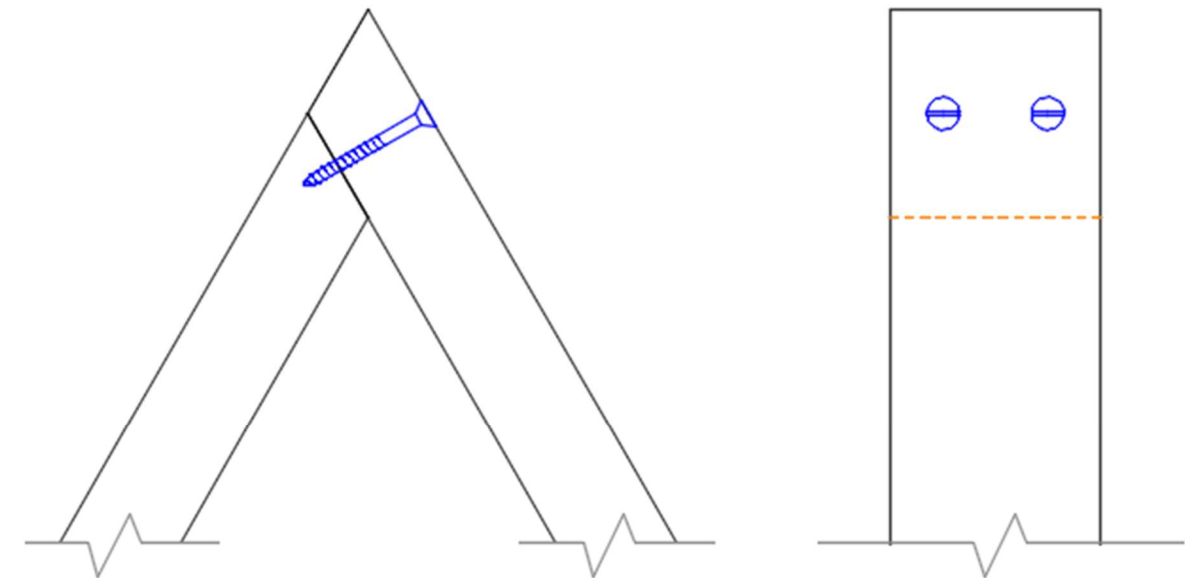


Ilustración 10. Unión para el montaje de triángulos.

- Tirafondos para la unión entre triángulos.

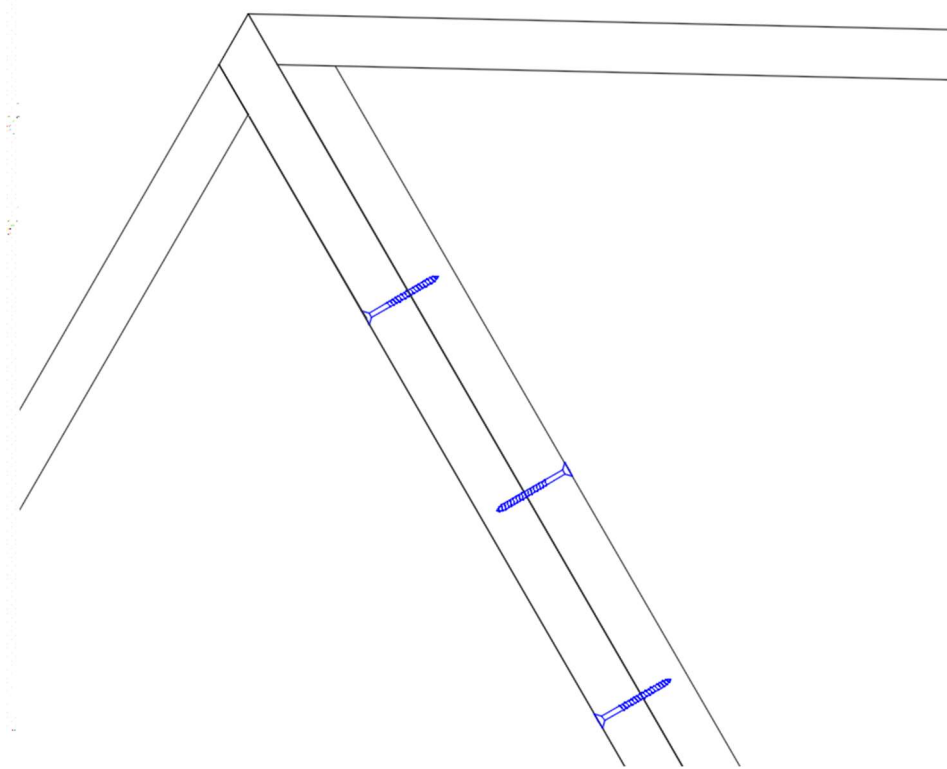


Ilustración 11. Unión entre triángulos.

3.2.1. UNIÓN MECÁNICA PARA EL MONTAJE DE TRIÁNGULOS

Este elemento de fijación se empleará para montar los triángulos a partir de las piezas de madera cortadas con doble ángulo. La función principal de este elemento será la de garantizar la correcta sujeción entre las piezas ante los principales esfuerzos a las que estará. Los esfuerzos al corte de esta pieza no serán muy elevados.

Dividiremos el análisis en tres partes principales; primero será necesario conocer la ubicación y las dimensiones del elemento de fijación, lo segundo la resistencia del elemento y en tercer lugar las tensiones de cálculo a las que estará sometida el elemento y su comprobación.

Dado que la misión principal del elemento es mantener unidas las piezas ante los esfuerzos de tracción se ha determinado que el elemento mecánico más adecuado será el uso de tirafondos. El elemento atravesará de manera perpendicular la cara superior de una de las piezas para conectar con la testa de la pieza a la que se quiere unir. Será necesaria la colocación de 2 tirafondos para impedir el giro torsional durante su ejecución y garantizar la fijación.

Para determinar las dimensiones del elemento de fijación a comprobar, lo primero será necesario conocer las separaciones mínimas y longitudes de penetración que se han de cumplir según el CTE.

Con carácter general los tirafondos deben de tener una penetración mínima de la parte roscada de seis veces el diámetro de la pieza. Con el cumplimiento de las separaciones y distancias mínimas a la testa de la siguiente tabla, hallaremos el diámetro máximo que deberemos de colocar según condiciones geométricas.

Tabla 8.6 - Separaciones y distancias a la testa y a los bordes mínimas en tirafondos cargados axialmente			
Separación mínima entre tirafondos en un plano paralelo a la fibra	Separación mínima entre tirafondos en dirección perpendicular a un plano paralelo a la fibra.	Distancia mínima a la testa desde el centro de gravedad de la parte roscada del tirafondo en la pieza.	Distancia mínima al borde desde el centro de gravedad de la parte roscada del tirafondo en la pieza.
a_1	a_2	$a_{1,CG}$	$a_{2,CG}$
$7d$	$5d$	$10d$	$4d$

Tabla 19. Separaciones y distancias a la testa y a los bordes mínimas en tirafondos cargados axialmente.

Dadas la siguiente ilustración, se definen las características geométricas y limitaciones del tirafondo:

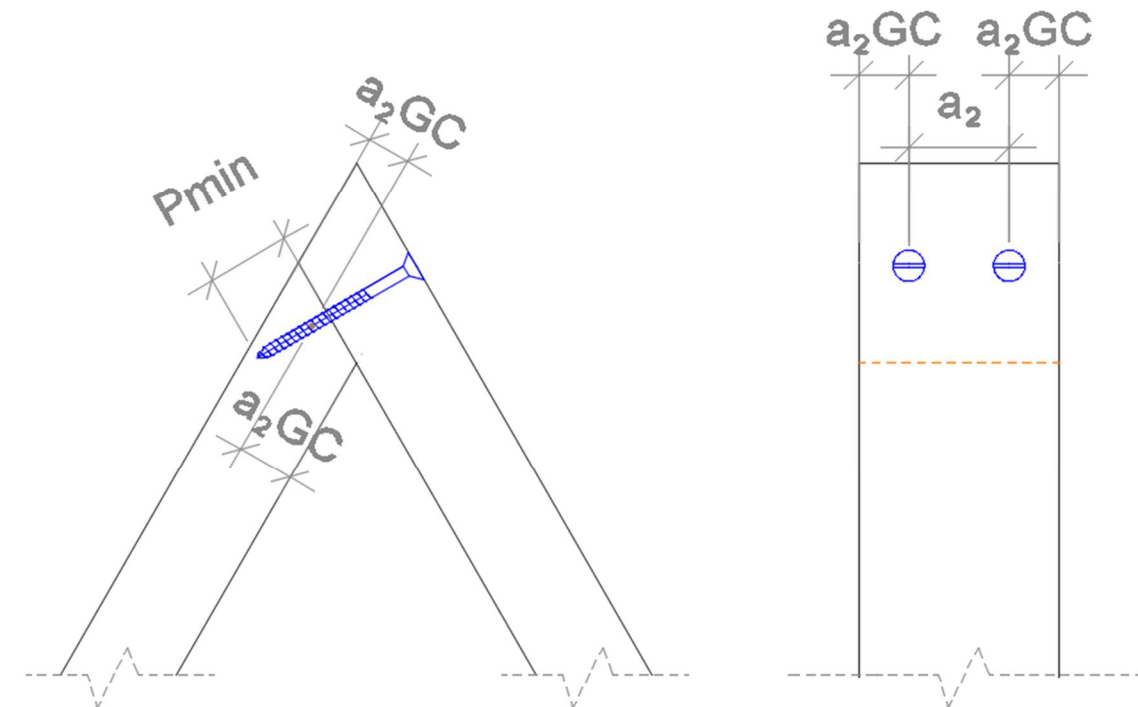


Ilustración 12. Separaciones mínimas a carga axial Tirafondo.

Dimensiones y separaciones mínimas de los Tirafondos			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Dimensiones tirafondos en montaje de triángulos			
Tirafondo con cabeza avellanada con ranura	DIN 97	-	-
Longitud	L	70	mm
Diámetro	d	5	mm
Penetración mínima parte roscada (10d)	P _{min}	50	mm
Separación mínima en un plano perpendicular (5d)	a ₂	25	mm
Separación mínima al borde (4d)	a _{2,CG}	20	mm
Canto de la pieza de madera	h	90	mm
Ancho de la pieza de madera	b	45	mm
Cumple las dimensiones de canto		CUMPLE	
Cumple las dimensiones de ancho		CUMPLE	

Tabla 20. Dimensiones de tirafondos - montaje de triángulos – Domo 1.

3.2.1.1. Comprobación a carga axial

Para comprobar la carga axial del tirafondo se realizarán las comprobaciones de resistencia al arranque de la unión, al punzonamiento y a tracción.

Para la comprobación al arranque se utilizará la siguiente expresión:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{n_{ef} f_{ax,k} d_{ef}}{1,2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8}$$

$F_{ax,\alpha,Rk}$ valor característico de la resistencia al arranque de la unión, para el ángulo α ;
 $f_{ax,k}$ valor característico de la resistencia al arranque con un ángulo α con respecto a la dirección de las fibras
 l_{ef} longitud de penetración en la pieza de punta de la parte roscada,
 ρ_k densidad característica;
 α ángulo entre el eje del tirafondo y la dirección de la fibra, con $\alpha \geq 30^\circ$.
 n_{ef} número eficaz de tirafondos;
 $n_{ef} = n^{0,9}$
 siendo n el número de tirafondos actuando conjuntamente en la unión.

$f_{ax,k}$ valor característico de la resistencia al arranque perpendicular a la fibra. Este valor debe ser proporcionado por el fabricante de los tirafondos o determinado de acuerdo con la norma UNE-EN 14592:2009+A1:2012 para la densidad asociada ρ_a ;
 ρ_a densidad asociada a $f_{ax,k}$,

Para hallar el valor característico de la resistencia al punzonamiento se empleará la siguiente expresión:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef} f_{head,k} d_h^2 \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8}$$

siendo:

$F_{ax,\alpha,Rk}$ valor característico de la resistencia a punzonamiento de la conexión con un ángulo α con respecto a la fibra en N, con $\alpha \geq 30^\circ$.
 d_h diámetro de la cabeza del tirafondo

$f_{head,k}$ Valor característico de la resistencia al arranque de la cabeza del tirafondo

Por último, para hallar el valor característico de la resistencia a tracción de la conexión (arranque de la cabeza del tirafondo o capacidad de tracción del fuste), se empleará la siguiente expresión:

$$F_{t,Rk} = n_{ef} f_{tens,k}$$

$f_{tens,k}$ valor característico de la resistencia a tracción del tirafondo Este valor debe ser proporcionado por el fabricante de los tirafondos o determinado de acuerdo con la norma UNE-EN 14592:2009+A1:2012;

Según los datos recogidos en la ficha técnica del fabricante "Index Fixing Systems" de tirafondo se han calculado los siguientes valores característicos de resistencia:

Capacidad de carga axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia al arranque			
Diámetro del tirafondo	d	5	mm
Número eficaz de tirafondos	n_{ef}	1,866	-
Número de tirafondos	n	2	-
Resistencia característica al arranque perpendicular	$f_{ax,k}$	25,04	MPa
Densidad asociada a la resistencia característica de arranque perpendicular	ρ_a	550	kg/m ³
Ángulo entre el tirafondo y la dirección de la fibra	α	29	grados
Longitud de penetración de la parte roscada (10d)	l_{ef}	50	mm
Densidad característica	ρ_k	550	kg/m ³
Coefficiente corrector por diámetro	k_d	0,625	
Resistencia característica de arranque de la unión	$F_{ax,\alpha,Rk}$	8,10	kN
Resistencia a punzonamiento			
Diámetro de la cabeza del tirafondo	d_h	12	mm
Número eficaz de tirafondos	n_{ef}	1,866	-
Número de tirafondos	n	2	-
Resistencia característica al arranque de la cabeza del tirafondo	$f_{head,k}$	28,14	MPa
Resistencia característica al punzonamiento	$F_{ax,\alpha,Rk}$	7,56	kN

Resistencia a tracción			
Número eficaz de tirafondos	n_{ef}	1,866	-
Resistencia en tracción característica	$f_{tens,k}$	8,76	kN
Resistencia característica a tracción	$F_{t,Rk}$	16,35	kN

Tabla 21. Resistencias características de la capacidad de carga axial. Montaje de triángulos – Domo 1.

A continuación, se muestran las comprobaciones de resistencia de los tres esfuerzos. De forma conservadora, la carga axial de los conectores se supone como la mitad del esfuerzo máximo a tracción de cálculo, puesto que las piezas son dobles, se estima que llega la mitad de la carga a cada elemento de fijación.

Comprobaciones de la carga axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Comprobación al arranque de la unión			
Resistencia característica de arranque de la unión	$F_{ax,\alpha,Rk}$	8,10	kN
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,9	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo de arranque de la unión	$F_{ax,\alpha,Rd}$	5,61	kN
Tracción perpendicular a las fibras	N_d	5,065	kN
Comprobación al arranque de la unión		CUMPLE	
Comprobación a punzonamiento			
Resistencia característica al punzonamiento	$F_{ax,\alpha,Rk}$	7,56	kN
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,9	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo a punzonamiento	$F_{ax,\alpha,Rd}$	5,23	kN
Tracción perpendicular a las fibras	N_d	5,065	kN
Comprobación al arranque de la unión		CUMPLE	
Comprobación a tracción			
Resistencia característica a tracción	$F_{t,Rk}$	16,35	kN
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,9	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo de tracción	$F_{ax,\alpha,Rd}$	11,32	kN
Tracción perpendicular a las fibras	N_d	5,065	kN
Comprobación al arranque de la unión		CUMPLE	

Tabla 22. Comprobaciones de la capacidad de carga axial en montaje de triángulos – Domo 1.

Los esfuerzos de cálculo sobre los que se ha comprobado la estructura han sido obtenidos desde los esfuerzos de cálculo generales de la estructura, entendiendo que queda del lado conservador. Puesto que para analizar los esfuerzos en la unión se debería de realizar un modelo específico para obtener mejores aproximaciones de la distribución de cargas en la unión Good Kharma. Las verificaciones de

resistencia se han realizado sin tener en cuenta este reparto de cargas en la unión, por tanto, quedan del lado más desfavorable.

Se puede observar que, con dos tirafondos de 8 cm de largo, 5 mm de diámetro y una cabeza de 10 mm, con penetración mínima de 8 diámetros, cumple con la verificación de seguridad estructural marcada por el CTE SE-M.

3.2.2. UNIÓN MECÁNICA PARA LA UNIÓN ENTRE TRIÁNGULOS

La unión entre triángulos se materializará con la colocación de tirafondos al tresbolillo desde ambas caras internas del triángulo con una colocación perpendicular a la fibra. Las piezas de madera de la estructura trabajan fundamentalmente a axil, por lo que este axil deberá de ser soportado con la resistencia al corte de los tirafondos debido a que son perpendiculares a la pieza.

Por tanto, las verificaciones de seguridad estructural se centrarán en comprobar capacidad de carga lateral, que siguen las siguientes consideraciones:

- En el cálculo de la capacidad de carga lateral el efecto de la parte roscada del tirafondo se tendrá en cuenta utilizando su diámetro eficaz.
- En tirafondos con la caña lisa (zona no roscada), cuyo diámetro en la parte roscada es igual al de la caña se aplican las reglas definidas en el apartado 8.3.1. del CTE-SE-M, siempre que se cumpla lo siguiente:
 - El diámetro eficaz se tome como el diámetro de la caña.
 - La penetración de la pieza de punta de la caña no sea inferior a $4d$.
- Dado que el tirafondos utilizado tiene un diámetro 8 mm se emplearán las reglas definidas en el apartado 8.3.4.1. de carga lateral en pernos.
- Puesto que el diámetro es superior a 6 mm se requerirá un pretaladro que cumpla las siguientes condiciones:
 - El orificio de alojamiento de la caña tendrá el mismo diámetro que la caña y la misma profundidad que la longitud de la parte no roscada.
 - El orificio de alojamiento de la parte roscada debe de tener un diámetro de aproximadamente el 70% del diámetro de la caña.

La unión entre dos piezas mediante un tirafondo se considera una unión en cortadura simple. Para calcular la resistencia característica de la capacidad de carga por plano de cortante y por elemento de fijación se toma como el menor valor de los obtenidos en cada grupo de expresiones, cada expresión corresponde con un modo de fallo diferente. En la ilustración siguiente se muestran los modos de fallo y las expresiones de cálculo de la capacidad de carga lateral en cortadura simple:

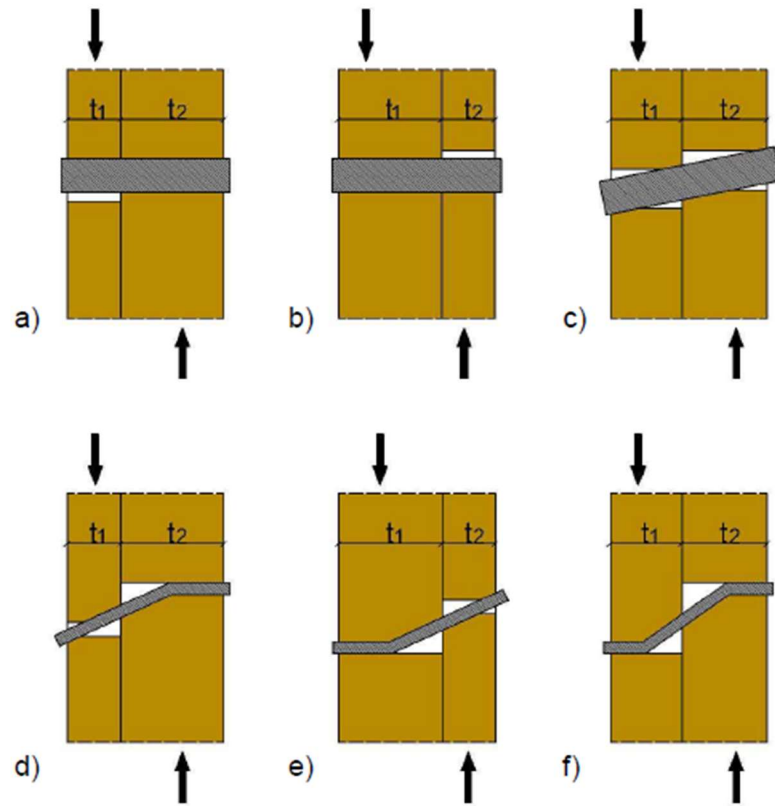


Ilustración 13. Modos de fallo en cortadura simple.

$$F_{v,Rk} = \min \left[\begin{array}{l} \frac{f_{h,1k} \cdot t_1 \cdot d}{f_{h,2k} \cdot t_2 \cdot d} \\ \frac{f_{h,1k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right) + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2} - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4,5 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] \\ 1,05 \cdot \frac{f_{h,1k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4,5 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] \\ 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1k} \cdot d} \end{array} \right]$$

siendo:

$$\beta = \frac{f_{h,2k}}{f_{h,1k}}$$

donde:

- d diámetro del elemento de fijación;
- t_i espesor del tablero o de la pieza o profundidad de penetración, referida a la pieza 1 ó 2, véanse apartados 8.3.2 a 8.3.6;
- f_{h,i,k} resistencia característica al aplastamiento en la pieza i; véanse los apartados 8.3.1.1.2 y 8.3.2.1.3;
- M_{y,Rk} momento plástico característico, véanse apartados 8.3.2 a 8.3.6;
- F_{v,Rk} capacidad de carga por plano de cortante y por elemento de fijación;

Debido a que el tirafondo utilizado tiene un diámetro superior a 6 mm, a efectos de cálculos se considera como un perno. Por tanto, se utilizan las siguientes expresiones para hallar su momento plástico y su resistencia característica al aplastamiento:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^{2,6}$$

siendo:

- f_{u,k} resistencia característica a tracción, [N/mm²].
- d diámetro del perno, [mm].

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

donde:

- ρ_k densidad característica de la madera, [kg/m³];
- d diámetro del perno, [mm].

Los resultados del valor de la capacidad de carga lateral según las expresiones anteriores son los siguientes:

Dimensiones y separaciones mínimas de los Tirafondos			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Dimensiones tirafondos en unión de triángulos			
Tirafondo con cabeza avellanada con ranura	DIN 97	-	-
Longitud	L	8	cm
Diámetro	d	5	mm
Penetración mínima parte roscada	P _{min}	50	mm
Separación mínima en un plano perpendicular	a ₂	25	mm
Separación mínima al borde	a _{2,CG}	20	mm
Longitudes mínimas en dirección canto de la pieza	h	40	mm
Longitudes mínimas en dirección ancho de la pieza	b	40	mm
Canto de la pieza de madera		90	mm
Ancho de la pieza de madera		45	mm
Cumple las dimensiones de canto		CUMPLE	
Cumple las dimensiones de ancho		CUMPLE	

Tabla 23. Dimensiones y separaciones mínimas en la unión de triángulos - Domo 1.

Capacidad de carga lateral			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Cálculo capacidad de carga lateral - unión entre triángulos			
Densidad de la madera	ρ_k	550	kg/m ³
Resistencia al aplastamiento pieza 1	$f_{h,1,k}$	42,85	MPa
Resistencia al aplastamiento pieza 2	$f_{h,2,k}$	42,85	MPa
Espesor pieza 1	t_1	45	mm
Espesor pieza 2	t_2	45	mm
Diámetro del elemento de fijación	d	5	mm
Relación de resistencias pieza 2/pieza 1	β	1	-
Resistencia a tracción del tirafondo	f_u	550	MPa
Momento plástico característico	$M_{y,Rk}$	10834	N.mm
Modos de rotura por carga lateral por simple cortadura			
Modo de fallo 1	MR1	9,64	kN
Modo de fallo 2	MR2	9,64	kN
Modo de fallo 3	MR3	3,99	kN
Modo de fallo 4	MR4	3,65	kN
Modo de fallo 5	MR5	3,65	kN
Modo de fallo 6	MR6	2,48	kN
Resistencias de cálculo a carga lateral			
Resistencia característica de carga lateral	$F_{v,Rk}$	2,48	kN
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,9	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo de carga lateral	$F_{ax,\alpha,Rd}$	1,72	kN
Nº de tirafondos	n	8	-
Diámetro del elemento de fijación	d	5	mm

Tabla 24. Capacidad de carga lateral - unión entre triángulos – Domo 1.

Según los cálculos la resistencia de carga lateral por cada tirafondo es de 1,72 kN. Se entiende que cumple sobradamente con el esfuerzo de rasante que será transmitido al elemento, por tanto, no es necesario realizar comprobación alguna.

No obstante, se dispondrán de 8 tirafondos de 5 mm de diámetro con pretaladro por motivos funcionales, estos deberán de tener una longitud de 8 cm y estar distribuidos al tresbolillo y equidistantes entre sí.

4. DIMENSIONAMIENTO DE UNIONES EN DOMO 2

4.1. CÁLCULO GEOMÉTRICO DE LA UNIÓN CARPINTERA

A continuación, se exponen los cálculos justificativos de los triángulos diferentes que componen el domo geodésico número 2. Estos 2 triángulos están formados a partir de 4 piezas con diferentes cortes y longitudes, enumeradas de la A a la D.

En el documento 2 Planos se encontrarán los planos de fabricación de la estructura de Domo 2 basados a partir de los cálculos mostrados en las siguientes tablas.

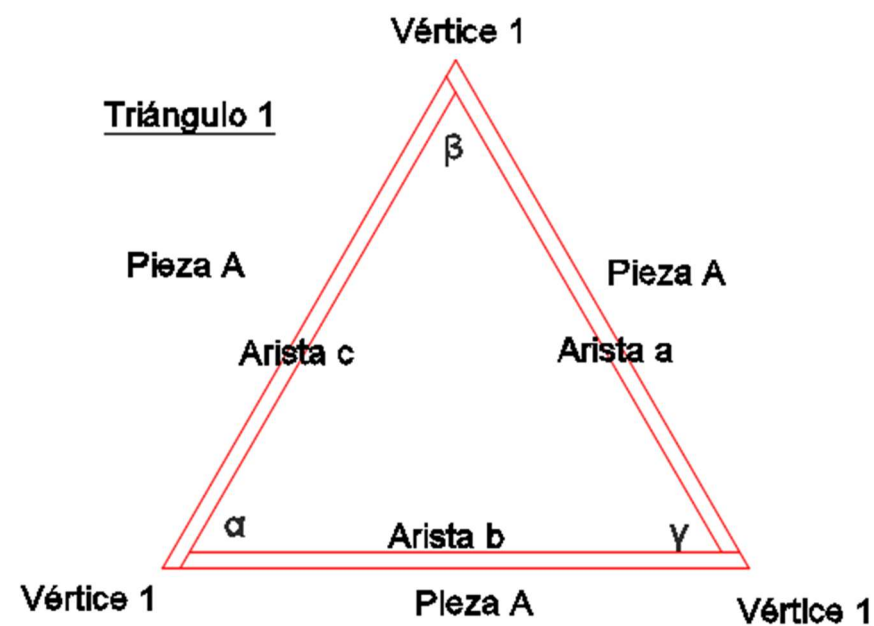


Ilustración 14. Esquema de montaje Triángulo 1 – Domo 2.

Cálculo del ángulo de triángulo del Triángulo 1			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 1 - Cálculos y mediciones			
Longitud total arista a	L	1,854	m
Longitud total arista b	L	1,854	m
Longitud total arista c	L	1,854	m
Ángulo α	α	60,00	Grados
Ángulo β	β	60,00	Grados
Ángulo γ	γ	60,00	Grados
Triángulo 1 - Dimensiones de las piezas			
Longitud de corte pieza A	L	1,796	m
Ángulo de triángulo pieza A vértice 1	$A_{A,v1}$	30,00	Grados

Tabla 25. Ángulos de triángulo en Triángulo 1 – Domo 2.

Cálculo del ángulo de axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 1 - Ángulo axial			
Longitud total arista a	L	1,854	m
Longitud total arista b	L	1,854	m
Longitud total arista c	L	1,854	m
Ángulo con centro de domo A	$A_{A,cd}$	36,00	Grados
Ángulo axial en Pieza A	$A_{A,axial}$	18,00	Grados

Tabla 26. Ángulos axiales de corte de Triángulo 1 – Domo 2.

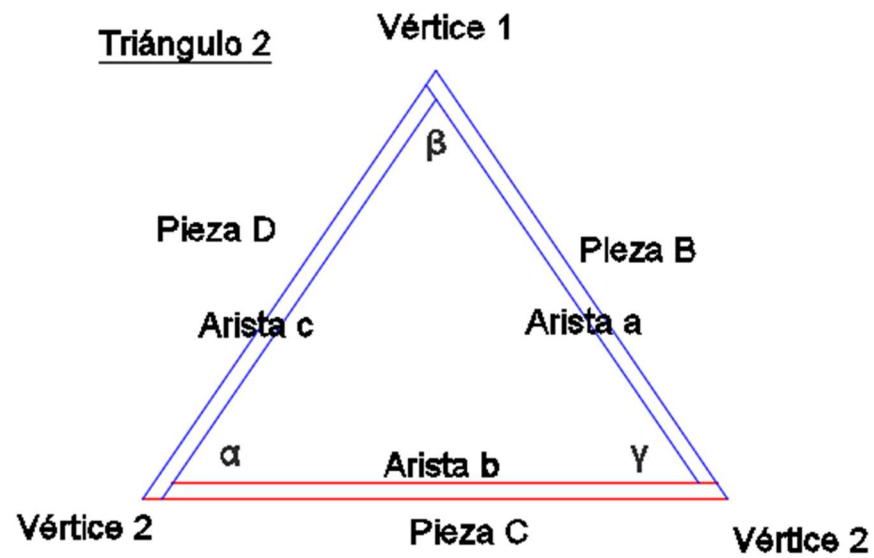


Tabla 27. Esquema de montaje triángulo 2 – Domo 2.

Cálculo del ángulo de triángulo 2			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 2 - Cálculos y mediciones			
Longitud total arista a	L	1,640	m
Longitud total arista b	L	1,854	m
Longitud total arista c	L	1,640	m
Ángulo α	α	55,57	Grados
Ángulo β	β	68,87	Grados
Ángulo γ	γ	55,57	Grados
Triángulo 2 - Dimensiones de las piezas			
Longitud de corte pieza D	L	1,579	m
Longitud de corte pieza E	L	1,794	m
Longitud de corte pieza F	L	1,586	m
Ángulo de triángulo pieza D vértice 1	$A_{B,v1}$	21,13	Grados
Ángulo de triángulo pieza D vértice 2	$A_{B,v2}$	34,43	Grados
Ángulo de triángulo pieza E vértice 2	$A_{C,v2}$	34,43	Grados
Ángulo de triángulo pieza F vértice 1	$A_{D,v1}$	21,13	Grados
Ángulo de triángulo pieza F vértice 2	$A_{D,v2}$	34,43	Grados

Tabla 28. Ángulos de triángulo en Triángulo 2 – Domo 2.

Cálculo del ángulo de axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 2 - Ángulo axial			
Longitud total arista a	L	1,640	m
Longitud total arista b	L	1,854	m
Longitud total arista c	L	1,640	m
Ángulo con centro de domo D	$A_{B,cb}$	31,72	Grados
Ángulo con centro de domo E	$A_{C,cc}$	36,00	Grados
Ángulo con centro de domo F	$A_{F,cd}$	31,72	Grados
Ángulo axial en Pieza D	$A_{B,axial}$	15,86	Grados
Ángulo axial en Pieza E	$A_{C,axial}$	18,00	Grados
Ángulo axial en Pieza F	$A_{D,axial}$	15,86	Grados

Tabla 29. Ángulos axiales del triángulo 2 – Domo 2.

4.2. DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS UNIONES

Tras conocer la forma física de los cortes de las uniones se pretende ahora realizar todos los cálculos justificativos necesarios para comprobar el adecuado comportamiento estructural de las uniones mecánicas del domo geodésico.

Se deberá de comprobar el funcionamiento estructural de los siguientes elementos:

- Uniones mecánicas:
 - Tirafondos para el montaje de triángulos.

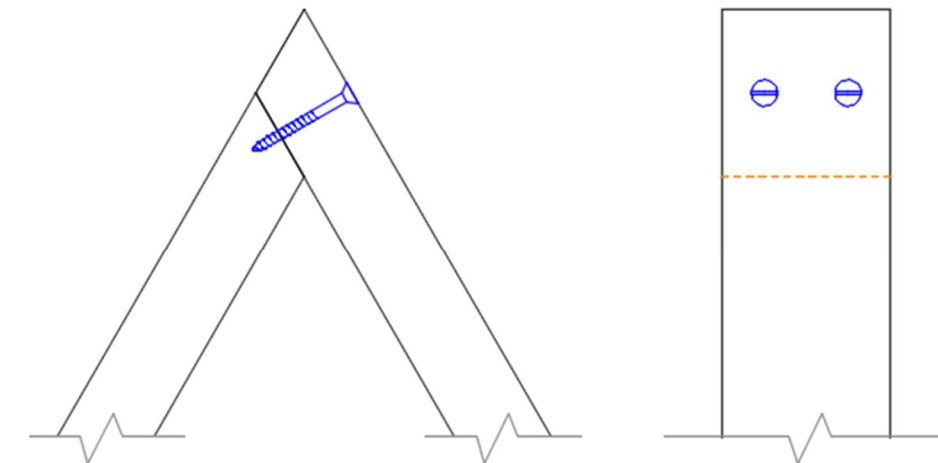


Ilustración 15. Unión para el montaje de triángulos -domo 2.

- o Tirafondos para la unión entre triángulos.

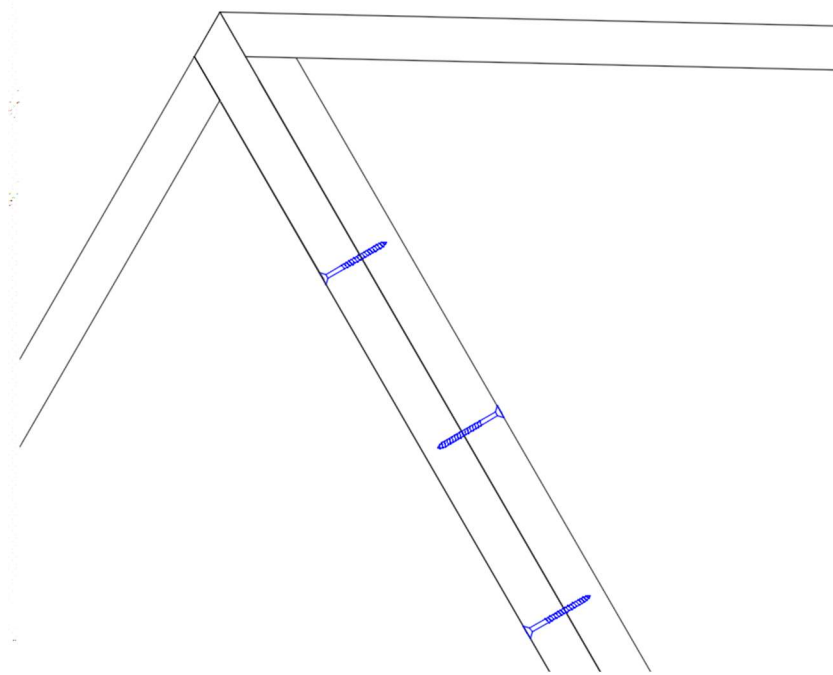


Ilustración 16. Unión entre triángulos – Domo 2.

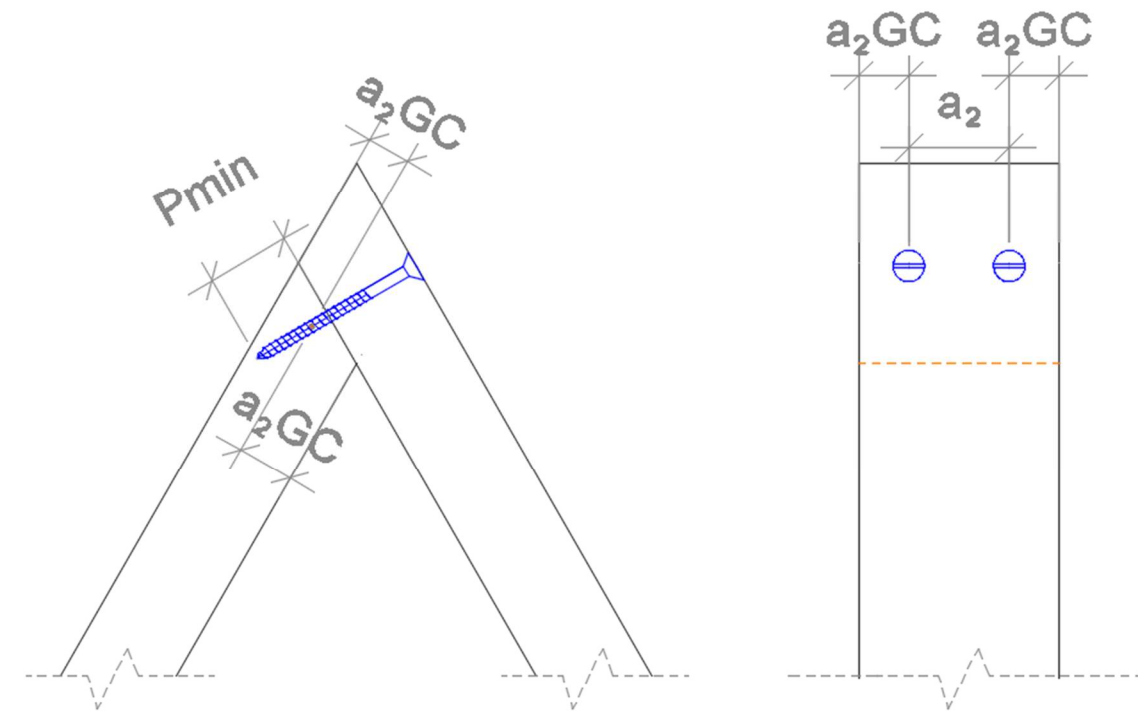


Ilustración 17. Separaciones mínimas a carga axial Tirafondo.

4.2.1. UNIÓN MECÁNICA PARA EL MONTAJE DE TRIÁNGULOS

Este elemento de fijación se empleará para montar los triángulos a partir de las piezas de madera cortadas con doble ángulo. Dividiremos el análisis en tres partes principales del mismo modo que se ha realizado la estructura 1.

Con carácter general los tirafondos deben de tener una penetración mínima de la parte roscada de seis veces el diámetro de la pieza. Con el cumplimiento de las separaciones y distancias mínimas a la testa de la siguiente tabla, hallaremos el diámetro máximo que deberemos de colocar según condiciones geométricas.

Tabla 8.6 - Separaciones y distancias a la testa y a los bordes mínimas en tirafondos cargados axialmente

Separación mínima entre tirafondos en un plano paralelo a la fibra	Separación mínima entre tirafondos en dirección perpendicular a un plano paralelo a la fibra.	Distancia mínima a la testa desde el centro de gravedad de la parte roscada del tirafondo en la pieza.	Distancia mínima al borde desde el centro de gravedad de la parte roscada del tirafondo en la pieza.
a_1	a_2	$a_{1,CG}$	$a_{2,CG}$
$7d$	$5d$	$10d$	$4d$

Tabla 30. Separaciones y distancias a la testa y a los bordes mínimas en tirafondos cargados axialmente.

Dadas la siguiente ilustración, se definen las características geométricas y limitaciones del tirafondo:

Dimensiones y separaciones mínimas de los Tirafondos			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Dimensiones tirafondos en unión de triángulos			
Tirafondo con cabeza avellanada con ranura	DIN 97	-	-
Longitud	L	8	cm
Diámetro	d	6	mm
Penetración mínima parte roscada	P_{min}	60	mm
Separación mínima en un plano perpendicular	a_2	30	mm
Separación mínima al borde	$a_{2,CG}$	24	mm
Longitudes mínimas en dirección canto de la pieza	h	48	mm
Longitudes mínimas en dirección ancho de la pieza	b	48	mm
Canto de la pieza de madera		100	mm
Ancho de la pieza de madera		50	mm
Cumple las dimensiones de canto		CUMPLE	
Cumple las dimensiones de ancho		CUMPLE	

Tabla 31. Dimensiones de tirafondos - montaje de triángulos – Domo 2.

4.2.1.1. Comprobación a carga axial

Para comprobar la carga axial del tirafondo se realizarán las comprobaciones de resistencia al arranque de la unión, al punzonamiento y a tracción.

Para la comprobación al arranque se utilizará la siguiente expresión:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{n_{ef} f_{ax,k} d_{l_{ef}}}{1,2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8}$$

$F_{ax,\alpha,Rk}$ valor característico de la resistencia al arranque de la unión, para el ángulo α ;
 $f_{ax,\alpha,k}$ valor característico de la resistencia al arranque con un ángulo α con respecto a la dirección de las fibras
 l_{ef} longitud de penetración en la pieza de punta de la parte roscada,
 ρ_k densidad característica;
 α ángulo entre el eje del tirafondo y la dirección de la fibra, con $\alpha \geq 30^\circ$.
 n_{ef} número eficaz de tirafondos;
 $n_{ef} = n^{0,9}$
 siendo n el número de tirafondos actuando conjuntamente en la unión.

$f_{ax,k}$ valor característico de la resistencia al arranque perpendicular a la fibra. Este valor debe ser proporcionado por el fabricante de los tirafondos o determinado de acuerdo con la norma UNE-EN 14592:2009+A1:2012 para la densidad asociada ρ_a ;
 ρ_a densidad asociada a $f_{ax,k}$,

Para hallar el valor característico de la resistencia al punzonamiento se empleará la siguiente expresión:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef} f_{head,k} d_h^2 \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8}$$

siendo:
 $F_{ax,\alpha,Rk}$ valor característico de la resistencia a punzonamiento de la conexión con un ángulo α con respecto a la fibra en N, con $\alpha \geq 30^\circ$.
 d_h diámetro de la cabeza del tirafondo

$f_{head,k}$ Valor característico de la resistencia al arranque de la cabeza del tirafondo

Por último, para hallar el valor característico de la resistencia a tracción de la conexión (arranque de la cabeza del tirafondo o capacidad de tracción del fuste), se empleará la siguiente expresión:

$$F_{t,Rk} = n_{ef} f_{tens,k}$$

$f_{tens,k}$ valor característico de la resistencia a tracción del tirafondo Este valor debe ser proporcionado por el fabricante de los tirafondos o determinado de acuerdo con la norma UNE-EN 14592:2009+A1:2012;

Según los datos recogidos en la ficha técnica del fabricante de tirafondo se han calculado los siguientes valores característicos de resistencia:

Capacidad de carga axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia al arranque			
Diámetro del tirafondo	d	6	mm
Número eficaz de tirafondos	n_{ef}	1,866	-
Número de tirafondos	n	2	-
Resistencia característica al arranque perpendicular	$f_{ax,k}$	25,04	MPa
Densidad asociada a la resistencia característica de arranque perpendicular	ρ_a	550	kg/m ³
Ángulo entre el tirafondo y la dirección de la fibra	α	29	grados
Longitud de penetración de la parte roscada (10d)	l_{ef}	50	mm
Densidad característica	ρ_k	550	kg/m ³
Coefficiente corrector por diámetro	k_d	0,625	
Resistencia característica de arranque de la unión	$F_{ax,\alpha,Rk}$	8,10	kN
Resistencia a punzonamiento			
Diámetro de la cabeza del tirafondo	d_h	12	mm
Número eficaz de tirafondos	n_{ef}	1,866	-
Número de tirafondos	n	2	-
Resistencia característica al arranque de la cabeza del tirafondo	$f_{head,k}$	28,14	MPa
Resistencia característica al punzonamiento	$F_{ax,\alpha,Rk}$	7,56	kN
Resistencia a tracción			
Número eficaz de tirafondos	n_{ef}	1,866	-
Resistencia en tracción característica	$f_{tens,k}$	8,76	kN
Resistencia característica a tracción	$F_{t,Rk}$	16,35	kN

Tabla 32. Separaciones mínimas en uniones entre triángulos - Domo 2.

A continuación, se muestran las comprobaciones de resistencia de los tres esfuerzos. De forma conservadora, la carga axial de los conectores se supone como la mitad del esfuerzo máximo a tracción de cálculo, puesto que las piezas son dobles, se estima que llega la mitad de la carga a cada elemento de fijación.

Comprobaciones de la carga axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Comprobación al arranque de la unión			
Resistencia característica de arranque de la unión	$F_{ax,\alpha,Rk}$	8,10	kN
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,9	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo de arranque de la unión	$F_{ax,\alpha,Rd}$	5,61	kN
Tracción perpendicular a las fibras	N_d	4,755	kN
Comprobación al arranque de la unión		CUMPLE	

Comprobación a punzonamiento			
Resistencia característica al punzonamiento	$F_{ax,\alpha,Rk}$	7,56	kN
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,9	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo a punzonamiento	$F_{ax,\alpha,Rd}$	5,23	kN
Tracción perpendicular a las fibras	N_d	4,755	kN
Comprobación al arranque de la unión		CUMPLE	
Comprobación a tracción			
Resistencia característica a tracción	$F_{t,Rk}$	16,35	kN
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,9	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo de tracción	$F_{ax,\alpha,Rd}$	11,32	kN
Tracción perpendicular a las fibras	N_d	4,755	kN
Comprobación al arranque de la unión		CUMPLE	

Tabla 33. Comprobaciones de la capacidad de carga axial en montaje de triángulos – Domo 2.

Los esfuerzos de cálculo sobre los que se ha comprobado la estructura han sido obtenidos desde los esfuerzos de cálculo generales de la estructura, entendiendo que queda del lado conservador. Puesto que para analizar los esfuerzos en la unión se debería de realizar un modelo específico para obtener mejores aproximaciones de la distribución de cargas en la unión Good Kharma. Las verificaciones de resistencia se han realizado sin tener en cuenta este reparto de cargas en la unión, por tanto, quedan del lado más desfavorable.

Se puede observar que, con dos tirafondos de 7 cm de largo, 8 mm de diámetro y una cabeza de 16 mm, con penetración mínima de 8 diámetros, cumple con la verificación de seguridad estructural marcada por el CTE SE-M.

4.2.2. UNIÓN MECÁNICA PARA LA UNIÓN ENTRE TRIÁNGULOS

La unión entre triángulos se materializará con la colocación de tirafondos al tresbolillo desde ambas caras internas del triángulo con una colocación perpendicular a la fibra. Las piezas de madera de la estructura trabajan fundamentalmente a axil, por lo que este axil deberá de ser soportado con la resistencia al corte de los tirafondos debido a que son perpendiculares a la pieza.

Siguiendo las mismas especificaciones que para la estructura 1, se exponen a continuación los resultados y comprobaciones del dimensionamiento de este tipo de unión mecánica.

En la ilustración siguiente se muestran los modos de fallo y las expresiones de cálculo de la capacidad de carga lateral en cortadura simple:

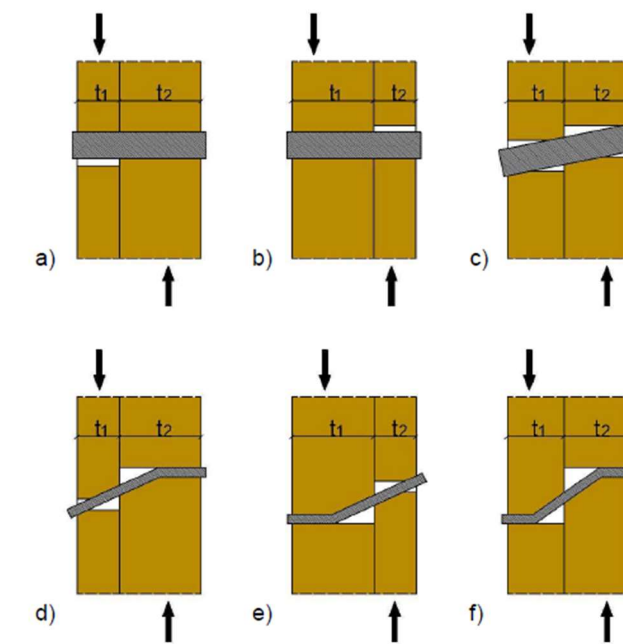


Ilustración 18. Modos de fallo en cortadura simple.

$$F_{v,Rk} = \min \left[\begin{aligned} & \frac{f_{h,1k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right)} + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] \\ & 1,05 \cdot \frac{f_{h,1k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4,5 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] \\ & 1,05 \cdot \frac{f_{h,1k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4,5 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] \\ & 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1k} \cdot d} \end{aligned} \right]$$

siendo:

$$\beta = \frac{f_{h,2k}}{f_{h,1k}}$$

donde:

- d diámetro del elemento de fijación;
- t_i espesor del tablero o de la pieza o profundidad de penetración, referida a la pieza 1 ó 2, véanse apartados 8.3.2 a 8.3.6;
- $f_{h,i,k}$ resistencia característica al aplastamiento en la pieza i; véanse los apartados 8.3.1.1.2 y 8.3.2.1.3;
- $M_{y,Rk}$ momento plástico característico, véanse apartados 8.3.2 a 8.3.6;
- $F_{v,Rk}$ capacidad de carga por plano de cortante y por elemento de fijación;

Debido a que el tirafondo utilizado tiene un diámetro superior a 6 mm, a efectos de cálculos se considera como un perno. Por tanto, se utilizan las siguientes expresiones para hallar su momento plástico y su resistencia característica al aplastamiento:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^2 \cdot l$$

siendo:

$f_{u,k}$ resistencia característica a tracción, [N/mm²].

d diámetro del perno, [mm].

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

donde:

ρ_k densidad característica de la madera, [kg/m³];

d diámetro del perno, [mm].

Los resultados del valor de la capacidad de carga lateral según las expresiones anteriores son los siguientes:

Dimensiones y separaciones mínimas de los Tirafondos			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Dimensiones tirafondos en montaje de triángulos			
Tirafondo con cabeza avellanada con ranura	DIN 97	-	-
Longitud	L	70	mm
Diámetro	d	6	mm
Penetración mínima parte roscada (10d)	P_{min}	60	mm
Separación mínima en un plano perpendicular (5d)	a_2	30	mm
Separación mínima al borde (4d)	$a_{2,CG}$	24	mm
Canto de la pieza de madera	h	100	mm
Ancho de la pieza de madera	b	50	mm
Cumple las dimensiones de canto		CUMPLE	
Cumple las dimensiones de ancho		CUMPLE	

Tabla 34. Separaciones mínimas en uniones con tirafondos entre triángulos - Domo 2.

Capacidad de carga lateral			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Cálculo capacidad de carga lateral - unión entre triángulos			
Densidad de la madera	ρ_k	550	kg/m ³
Resistencia al aplastamiento pieza 1	$f_{h,1,k}$	42,39	MPa
Resistencia al aplastamiento pieza 2	$f_{h,2,k}$	42,39	MPa
Espesor pieza 1	t_1	50	mm
Espesor pieza 2	t_2	50	mm
Diámetro del elemento de fijación	d	6	mm
Relación de resistencias pieza 2/pieza 1	β	1	-
Resistencia a tracción del tirafondo	f_u	550	MPa

Momento plástico característico	$M_{y,Rk}$	17405	N.mm
Modos de rotura por carga lateral por simple cortadura			
Modo de fallo 1	MR1	12,72	kN
Modo de fallo 2	MR2	12,72	kN
Modo de fallo 3	MR3	5,27	kN
Modo de fallo 4	MR4	4,85	kN
Modo de fallo 5	MR5	4,85	kN
Modo de fallo 6	MR6	3,42	kN
Capacidad de carga lateral			
Resistencia característica de carga lateral	$F_{v,Rk}$	3,42	kN
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,9	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo de carga lateral	$F_{ax,\alpha,Rd}$	2,37	kN
Nº de tirafondos	n	8	-
Diámetro del elemento de fijación	d	6	mm

Tabla 35. Capacidad de carga lateral - unión entre triángulos - Domo 2.

Según los cálculos la resistencia de carga lateral por cada tirafondo es de 2,37 kN. Se entiende que cumple sobradamente con el esfuerzo de rasante que será transmitido al elemento, por tanto, no es necesario realizar comprobación alguna.

No obstante, se dispondrán de 8 tirafondos de 6 mm de diámetro con pretaladro por motivos funcionales, estos deberán de tener una longitud de 8 cm y estar distribuidos al tresbolillo y equidistantes entre sí.

5. DIMENSIONAMIENTO DE UNIONES EN DOMO 3

5.1. CÁLCULO GEOMÉTRICO DE LA UNIÓN CARPINTERA

A continuación, se exponen los cálculos justificativos de los triángulos diferentes que componen el domo geodésico número 2. Estos 2 triángulos están formados a partir de 6 piezas con diferentes cortes y longitudes, enumeradas de la A a la F.

En el documento 2 Planos se encontrarán los planos de fabricación de la estructura de Domo 3 basados a partir de los cálculos mostrados en las siguientes tablas.

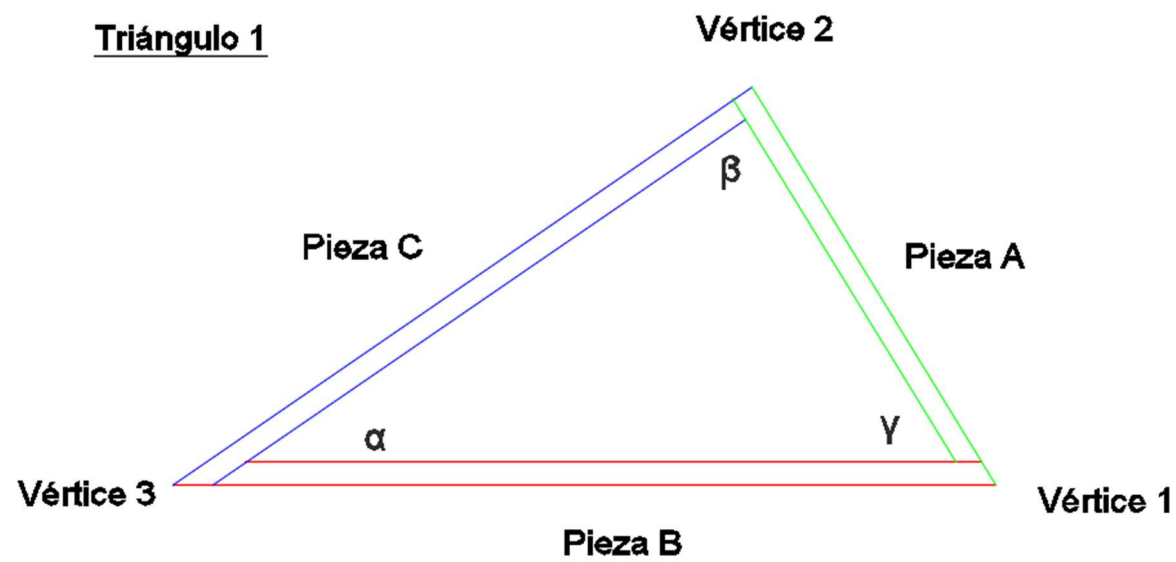


Ilustración 19. Esquema de montaje Triángulo 1 – Domo 3.

Cálculo del ángulo de triángulo del Triángulo 1			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 1 - Cálculos y mediciones			
Longitud total arista a	L	1,452	m
Longitud total arista b	L	2,564	m
Longitud total arista c	L	2,186	m
Ángulo α	α	34,44	Grados
Ángulo β	β	87,15	Grados
Ángulo γ	γ	58,40	Grados
Triángulo 1 - Dimensiones de las piezas			
Longitud de corte pieza A	L	1,369	m
Longitud de corte pieza B	L	2,440	m
Longitud de corte pieza C	L	2,116	m
Ángulo de triángulo pieza A vértice 1	$A_{A,v1}$	2,85	Grados
Ángulo de triángulo pieza A vértice 2	$A_{A,v2}$	31,60	Grados
Ángulo de triángulo pieza B vértice 2	$A_{B,v2}$	31,60	Grados
Ángulo de triángulo pieza C vértice 1	$A_{C,v1}$	2,85	Grados
Ángulo de triángulo pieza C vértice 2	$A_{C,v2}$	55,56	Grados

Tabla 36. Ángulos de triángulo en Triángulo 1 – Domo 3.

Cálculo del ángulo de axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 1 - Ángulo axial			
Longitud total arista a	L	1,452	m
Longitud total arista b	L	2,564	m
Longitud total arista c	L	2,186	m
Ángulo con centro de domo A	$A_{A,cd}$	20,91	Grados
Ángulo con centro de domo B	$A_{B,cd}$	37,38	Grados
Ángulo con centro de domo C	$A_{C,cd}$	31,72	Grados
Ángulo axial en Pieza A	$A_{A,axial}$	10,45	Grados
Ángulo axial en Pieza B	$A_{B,axial}$	18,69	Grados
Ángulo axial en Pieza C	$A_{C,axial}$	15,86	Grados

Tabla 37. Ángulos axiales de corte de Triángulo 1 – Domo 3.

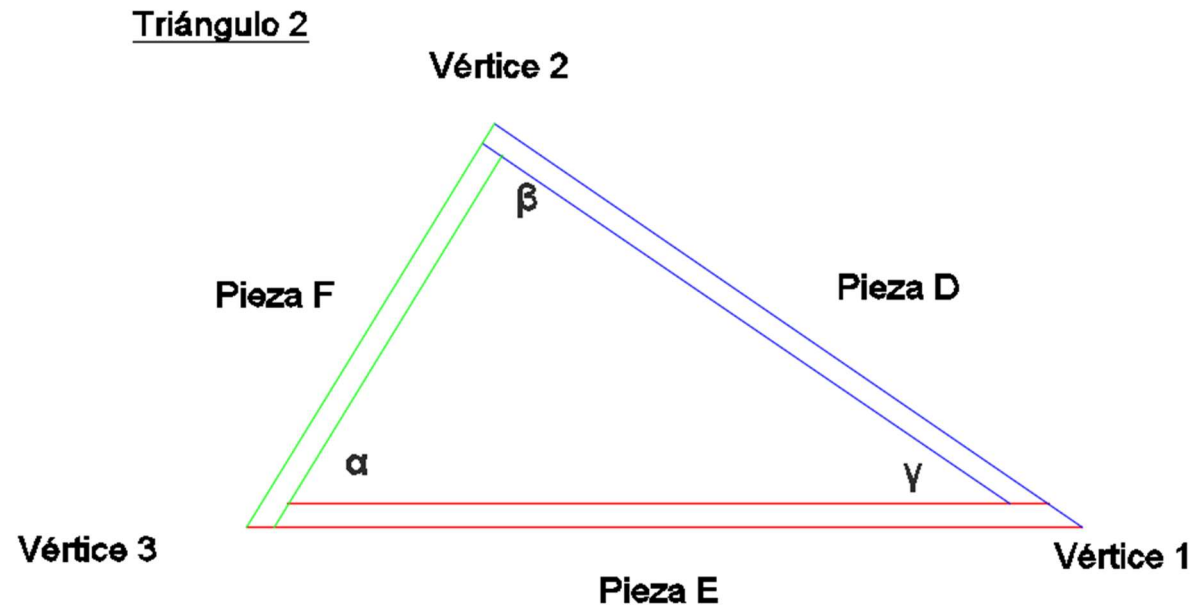


Tabla 38. Esquema de montaje triángulo 2 – Domo 3.

Cálculo del ángulo de triángulo 2			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 2 - Cálculos y mediciones			
Longitud total arista a	L	2,186	m
Longitud total arista b	L	2,564	m
Longitud total arista c	L	1,452	m
Ángulo α	α	58,40	Grados
Ángulo β	β	87,15	Grados
Ángulo γ	γ	34,44	Grados
Triángulo 2 - Dimensiones de las piezas			
Longitud de corte pieza D	L	2,062	m
Longitud de corte pieza E	L	2,481	m
Longitud de corte pieza F	L	1,382	m
Ángulo de triángulo pieza D vértice 1	$A_{D,v1}$	2,85	Grados
Ángulo de triángulo pieza D vértice 2	$A_{D,v2}$	55,56	Grados
Ángulo de triángulo pieza E vértice 2	$A_{E,v2}$	55,56	Grados
Ángulo de triángulo pieza F vértice 1	$A_{F,v1}$	2,85	Grados
Ángulo de triángulo pieza F vértice 2	$A_{F,v2}$	31,60	Grados

Tabla 39. Ángulos de triángulo en Triángulo 2 – Domo 3.

Cálculo del ángulo de axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Triángulo 2 - Ángulo axial			
Longitud total arista a	L	2,186	m
Longitud total arista b	L	2,564	m
Longitud total arista c	L	1,452	m
Ángulo con centro de domo D	$A_{D,cd}$	31,72	Grados
Ángulo con centro de domo E	$A_{E,cd}$	37,38	Grados
Ángulo con centro de domo F	$A_{F,cd}$	20,91	Grados
Ángulo axial en Pieza D	$A_{D,axial}$	15,86	Grados
Ángulo axial en Pieza E	$A_{E,axial}$	18,69	Grados
Ángulo axial en Pieza F	$A_{F,axial}$	10,45	Grados

Tabla 40. Ángulos axiales del triángulo 2 – Domo 3.

5.2. DIMENSIONAMIENTO ESTRUCTURAL DE LAS UNIONES

Tras conocer la forma física de los cortes de las uniones se pretende ahora realizar todos los cálculos justificativos necesarios para comprobar el adecuado comportamiento estructural de las uniones mecánicas del domo geodésico.

Se deberá de comprobar el funcionamiento estructural de los siguientes elementos:

- Uniones mecánicas:
 - Tirafondos para el montaje de triángulos.

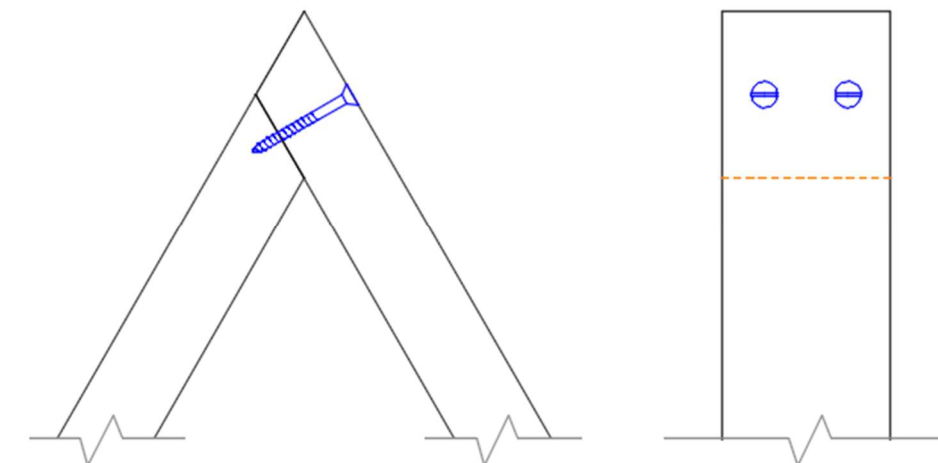


Ilustración 20. Unión para el montaje de triángulos -Domo 3.

- o Tirafondos para la unión entre triángulos.

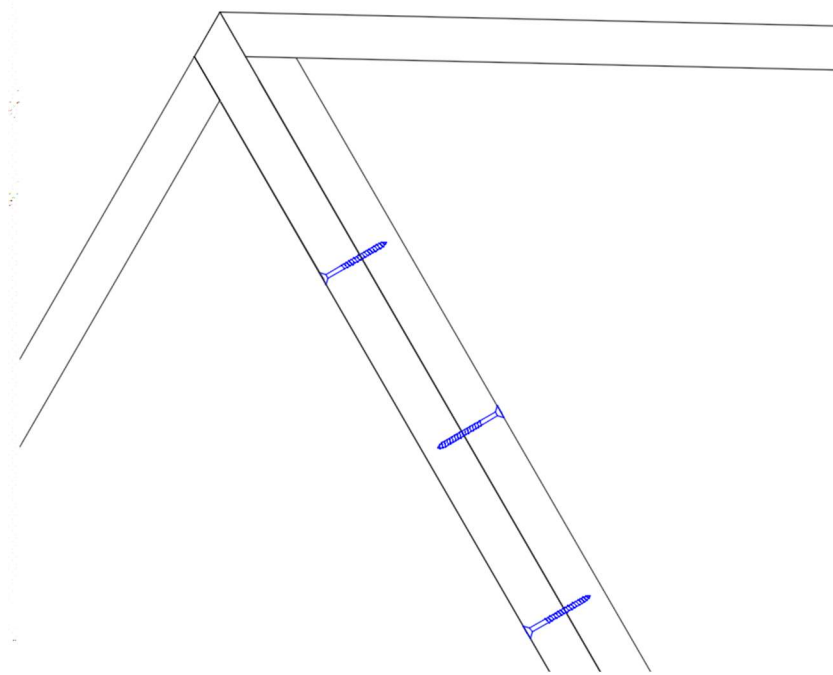


Ilustración 21. Unión entre triángulos – Domo 3.

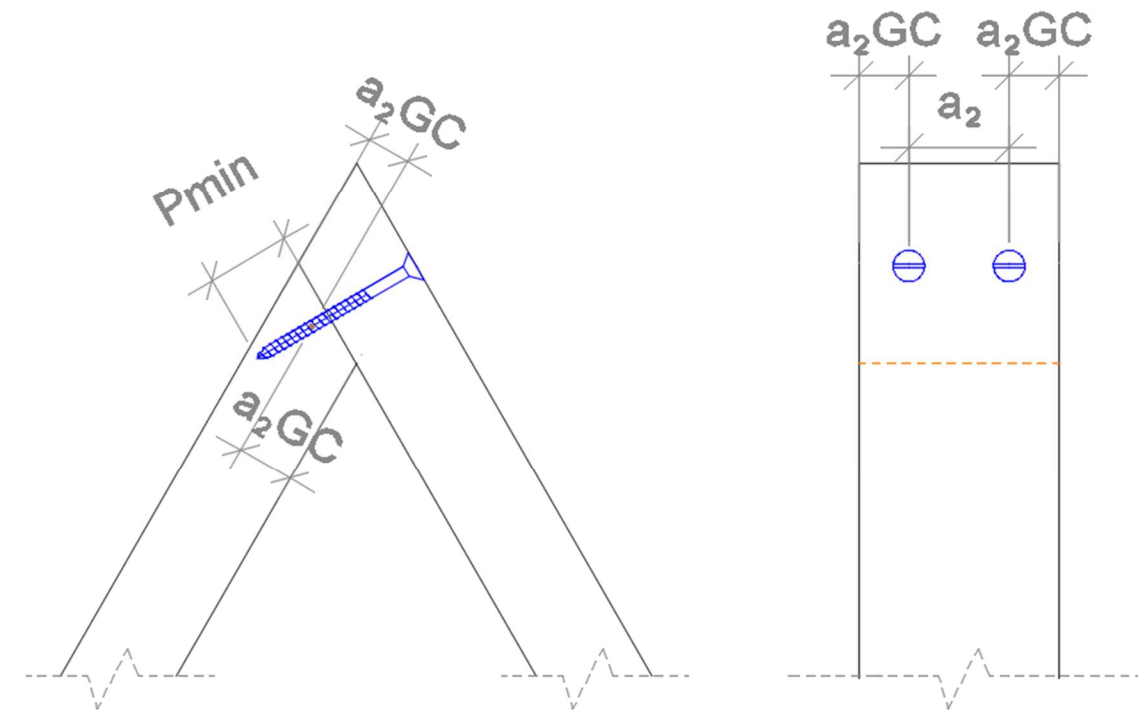


Ilustración 22. Separaciones mínimas a carga axial Tirafondo.

5.2.1. UNIÓN MECÁNICA PARA EL MONTAJE DE TRIÁNGULOS

Este elemento de fijación se empleará para montar los triángulos a partir de las piezas de madera cortadas con doble ángulo. Dividiremos el análisis en tres partes principales del mismo modo que se ha realizado la estructura 1.

Con carácter general los tirafondos deben de tener una penetración mínima de la parte roscada de seis veces el diámetro de la pieza. Con el cumplimiento de las separaciones y distancias mínimas a la testa de la siguiente tabla, hallaremos el diámetro máximo que deberemos de colocar según condiciones geométricas.

Tabla 8.6 - Separaciones y distancias a la testa y a los bordes mínimas en tirafondos cargados axialmente

Separación mínima entre tirafondos en un plano paralelo a la fibra	Separación mínima entre tirafondos en dirección perpendicular a un plano paralelo a la fibra.	Distancia mínima a la testa desde el centro de gravedad de la parte roscada del tirafondo en la pieza.	Distancia mínima al borde desde el centro de gravedad de la parte roscada del tirafondo en la pieza.
a_1	a_2	$a_{1,CG}$	$a_{2,CG}$
$7d$	$5d$	$10d$	$4d$

Tabla 41. Separaciones y distancias a la testa y a los bordes mínimas en tirafondos cargados axialmente.

Dadas la siguiente ilustración, se definen las características geométricas y limitaciones del tirafondo:

Dimensiones y separaciones mínimas de los Tirafondos			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Dimensiones tirafondos en unión de triángulos			
Tirafondo con cabeza avellanada con ranura	DIN 97	-	-
Longitud	L	8	cm
Diámetro	d	8	mm
Penetración mínima parte roscada	P_{min}	80	mm
Separación mínima en un plano perpendicular	a_2	40	mm
Separación mínima al borde	$a_{2,CG}$	32	mm
Longitudes mínimas en dirección canto de la pieza	h	64	mm
Longitudes mínimas en dirección ancho de la pieza	b	64	mm
Canto de la pieza de madera		140	mm
Ancho de la pieza de madera		70	mm
Cumple las dimensiones de canto		CUMPLE	
Cumple las dimensiones de ancho		CUMPLE	

Tabla 42. Dimensiones de tirafondos - montaje de triángulos – Domo 3.

5.2.1.1. Comprobación a carga axial

Para comprobar la carga axial del tirafondo se realizarán las comprobaciones de resistencia al arranque de la unión, al punzonamiento y a tracción.

Para la comprobación al arranque se utilizará la siguiente expresión:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = \frac{n_{ef} f_{ax,k} d_{ef}}{1,2 \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha} \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8}$$

$F_{ax,\alpha,Rk}$ valor característico de la resistencia al arranque de la unión, para el ángulo α ;
 $f_{ax,\alpha,k}$ valor característico de la resistencia al arranque con un ángulo α con respecto a la dirección de las fibras
 l_{ef} longitud de penetración en la pieza de punta de la parte roscada,
 ρ_k densidad característica;
 α ángulo entre el eje del tirafondo y la dirección de la fibra, con $\alpha \geq 30^\circ$.
 n_{ef} número eficaz de tirafondos;
 $n_{ef} = n^{0,9}$
 siendo n el número de tirafondos actuando conjuntamente en la unión.

$f_{ax,k}$ valor característico de la resistencia al arranque perpendicular a la fibra. Este valor debe ser proporcionado por el fabricante de los tirafondos o determinado de acuerdo con la norma UNE-EN 14592:2009+A1:2012 para la densidad asociada ρ_a ;
 ρ_a densidad asociada a $f_{ax,k}$,

Para hallar el valor característico de la resistencia al punzonamiento se empleará la siguiente expresión:

$$F_{ax,\alpha,Rk} = n_{ef} f_{head,k} d_n^2 \left(\frac{\rho_k}{\rho_a} \right)^{0,8}$$

siendo:
 $F_{ax,\alpha,Rk}$ valor característico de la resistencia a punzonamiento de la conexión con un ángulo α con respecto a la fibra en N, con $\alpha \geq 30^\circ$.
 d_h diámetro de la cabeza del tirafondo

$f_{head,k}$ Valor característico de la resistencia al arranque de la cabeza del tirafondo

Por último, para hallar el valor característico de la resistencia a tracción de la conexión (arranque de la cabeza del tirafondo o capacidad de tracción del fuste), se empleará la siguiente expresión:

$$F_{t,Rk} = n_{ef} f_{tens,k}$$

$f_{tens,k}$ valor característico de la resistencia a tracción del tirafondo Este valor debe ser proporcionado por el fabricante de los tirafondos o determinado de acuerdo con la norma UNE-EN 14592:2009+A1:2012;

Según los datos recogidos en la ficha técnica del fabricante de tirafondo se han calculado los siguientes valores característicos de resistencia:

Capacidad de carga axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Resistencia al arranque			
Diámetro del tirafondo	d	8	mm
Número eficaz de tirafondos	n_{ef}	1,866	-
Número de tirafondos	n	2	-
Resistencia característica al arranque perpendicular	$f_{ax,k}$	18,89	MPa
Densidad asociada a la resistencia característica de arranque perpendicular	ρ_a	550	kg/m ³
Ángulo entre el tirafondo y la dirección de la fibra	α	29	grados
Longitud de penetración de la parte roscada (10d)	l_{ef}	80	mm
Densidad característica	ρ_k	550	kg/m ³
Coefficiente corrector por diámetro	k_d	1	
Resistencia característica de arranque de la unión	$F_{ax,\alpha,Rk}$	15,65	kN
Resistencia a punzonamiento			
Diámetro de la cabeza del tirafondo	d_h	16	mm
Número eficaz de tirafondos	n_{ef}	1,866	-
Número de tirafondos	n	2	-
Resistencia característica al arranque de la cabeza del tirafondo	$f_{head,k}$	28,14	MPa
Resistencia característica al punzonamiento	$F_{ax,\alpha,Rk}$	13,44	kN
Resistencia a tracción			
Número eficaz de tirafondos	n_{ef}	1,866	-
Resistencia en tracción característica	$f_{tens,k}$	8,76	kN
Resistencia característica a tracción	$F_{t,Rk}$	16,35	kN

Tabla 43. Resistencias características de la capacidad de carga axial. Montaje de triángulos – Domo 3.

A continuación, se muestran las comprobaciones de resistencia de los tres esfuerzos. De forma conservadora, la carga axial de los conectores se supone como la mitad del esfuerzo máximo a tracción de cálculo, puesto que las piezas son dobles, se estima que llega la mitad de la carga a cada elemento de fijación.

Comprobaciones de la carga axial			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Comprobación al arranque de la unión			
Resistencia característica de arranque de la unión	$F_{ax,\alpha,Rk}$	15,65	kN
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,9	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo de arranque de la unión	$F_{ax,\alpha,Rd}$	10,83	kN
Tracción perpendicular a las fibras	N_d	8,23	kN
Comprobación al arranque de la unión		CUMPLE	

Comprobación a punzonamiento			
Resistencia característica al punzonamiento	$F_{ax,\alpha,Rk}$	13,44	kN
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,9	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo a punzonamiento	$F_{ax,\alpha,Rd}$	9,31	kN
Tracción perpendicular a las fibras	N_d	8,23	kN
Comprobación al arranque de la unión		CUMPLE	
Comprobación a tracción			
Resistencia característica a tracción	$F_{t,Rk}$	16,35	kN
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,9	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo de tracción	$F_{ax,\alpha,Rd}$	11,32	kN
Tracción perpendicular a las fibras	N_d	8,23	kN
Comprobación al arranque de la unión		CUMPLE	

Tabla 44. Comprobaciones de la capacidad de carga axial en montaje de triángulos – Domo 3.

Se puede observar que, con dos tirafondos de 7 cm de largo, 8 mm de diámetro y una cabeza de 16 mm, con penetración mínima de 8 diámetros, cumple con la verificación de seguridad estructural marcada por el CTE SE-M.

5.2.2. UNIÓN MECÁNICA PARA LA UNIÓN ENTRE TRIÁNGULOS

La unión entre triángulos se materializará con la colocación de tirafondos al tresbolillo desde ambas caras internas del triángulo con una colocación perpendicular a la fibra. Las piezas de madera de la estructura trabajan fundamentalmente a axil, por lo que este axil deberá de ser soportado con la resistencia al corte de los tirafondos debido a que son perpendiculares a la pieza.

Siguiendo las mismas especificaciones que para la estructura 1, se exponen a continuación los resultados y comprobaciones del dimensionamiento de este tipo de unión mecánica.

En la ilustración siguiente se muestran los modos de fallo y las expresiones de cálculo de la capacidad de carga lateral en cortadura simple:

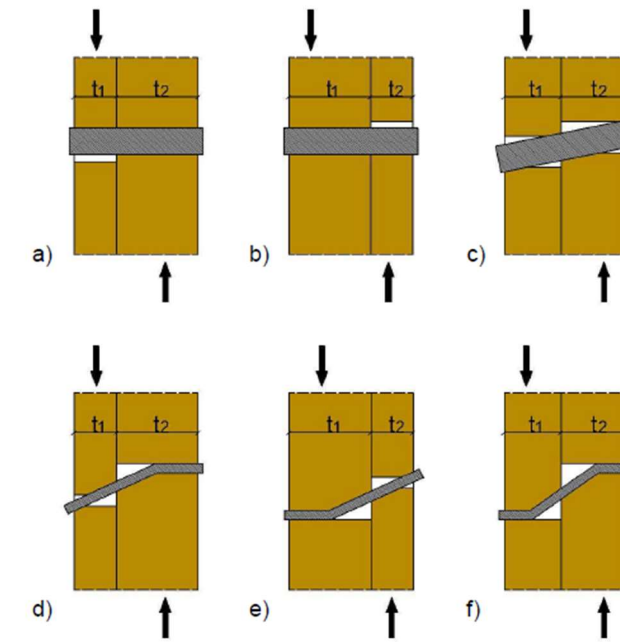


Ilustración 23. Modos de fallo en cortadura simple.

$$F_{v,Rk} = \min \left[\begin{aligned} & \frac{f_{h,1k} \cdot t_1 \cdot d}{1 + \beta} \cdot \left[\sqrt{\beta + 2 \cdot \beta^2 \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} + \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 \right)} + \beta^3 \cdot \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^2 - \beta \cdot \left(1 + \frac{t_2}{t_1} \right) \right] \\ & 1,05 \cdot \frac{f_{h,1k} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta \cdot (1 + \beta) + \frac{4,5 \cdot \beta \cdot (2 + \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1k} \cdot d \cdot t_1^2}} - \beta \right] \\ & 1,05 \cdot \frac{f_{h,1k} \cdot t_2 \cdot d}{1 + 2 \cdot \beta} \cdot \left[\sqrt{2 \cdot \beta^2 \cdot (1 + \beta) + \frac{4,5 \cdot \beta \cdot (1 + 2 \cdot \beta) \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,1k} \cdot d \cdot t_2^2}} - \beta \right] \\ & 1,15 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \beta}{1 + \beta}} \cdot \sqrt{2 \cdot M_{y,Rk} \cdot f_{h,1k} \cdot d} \end{aligned} \right]$$

siendo:

$$\beta = \frac{f_{h,2k}}{f_{h,1k}}$$

donde:

- d diámetro del elemento de fijación;
- t_i espesor del tablero o de la pieza o profundidad de penetración, referida a la pieza 1 ó 2, véanse apartados 8.3.2 a 8.3.6;
- $f_{h,i,k}$ resistencia característica al aplastamiento en la pieza i; véanse los apartados 8.3.1.1.2 y 8.3.2.1.3;
- $M_{y,Rk}$ momento plástico característico, véanse apartados 8.3.2 a 8.3.6;
- $F_{v,Rk}$ capacidad de carga por plano de cortante y por elemento de fijación;

Debido a que el tirafondo utilizado tiene un diámetro superior a 6 mm, a efectos de cálculos se considera como un perno. Por tanto, se utilizan las siguientes expresiones para hallar su momento plástico y su resistencia característica al aplastamiento:

$$M_{y,Rk} = 0,3 \cdot f_{u,k} \cdot d^2 \cdot l$$

siendo:

$f_{u,k}$ resistencia característica a tracción, [N/mm²].

d diámetro del perno, [mm].

$$f_{h,0,k} = 0,082 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \cdot \rho_k \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

donde:

ρ_k densidad característica de la madera, [kg/m³];

d diámetro del perno, [mm].

Los resultados del valor de la capacidad de carga lateral según las expresiones anteriores son los siguientes:

Dimensiones y separaciones mínimas de los Tirafondos			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Dimensiones tirafondos en montaje de triángulos			
Tirafondo con cabeza avellanada con ranura	DIN 97	-	-
Longitud	L	70	mm
Diámetro	d	8	mm
Penetración mínima parte roscada (10d)	P _{min}	80	mm
Separación mínima en un plano perpendicular (5d)	a ₂	40	mm
Separación mínima al borde (4d)	a _{2,CG}	32	mm
Canto de la pieza de madera	h	140	mm
Ancho de la pieza de madera	b	70	mm
Cumple las dimensiones de canto		CUMPLE	
Cumple las dimensiones de ancho		CUMPLE	

Tabla 45. Separaciones mínimas en tirafondos de uniones entre triángulos - Domo 3.

Capacidad de carga lateral			
Descripción	Parámetro	Valor	Unidades
Cálculo capacidad de carga lateral - unión entre triángulos			
Densidad de la madera	ρ_k	550	kg/m ³
Resistencia al aplastamiento pieza 1	$f_{h,1,k}$	41,49	MPa
Resistencia al aplastamiento pieza 2	$f_{h,2,k}$	41,49	MPa
Espesor pieza 1	t ₁	70	mm
Espesor pieza 2	t ₂	70	mm
Diámetro del elemento de fijación	d	8	mm
Relación de resistencias pieza 2/pieza 1	β	1	-
Resistencia a tracción del tirafondo	f_u	550	MPa

Momento plástico característico	$M_{y,Rk}$	36772	N.mm
Modos de rotura por carga lateral por simple cortadura			
Modo de fallo 1	MR1	23,24	kN
Modo de fallo 2	MR2	23,24	kN
Modo de fallo 3	MR3	9,62	kN
Modo de fallo 4	MR4	8,74	kN
Modo de fallo 5	MR5	8,74	kN
Modo de fallo 6	MR6	5,68	kN
Resistencias de cálculo a carga lateral			
Resistencia característica de carga lateral	$F_{v,Rk}$	5,68	kN
Factor de modificación (corta duración)	K_{mod}	0,9	-
Coef. Parcial de seguridad del material	γ_M	1,3	-
Resistencia de cálculo de carga lateral	$F_{ax,\alpha,Rd}$	3,93	kN
Nº de tirafondos	n	6	-
Diámetro del elemento de fijación	d	8	mm

Tabla 46. Capacidad de carga lateral - unión entre triángulos - Domo 3.

Según los cálculos la resistencia de carga lateral por cada tirafondo es de 3,93 kN. Se entiende que cumple sobradamente con el esfuerzo de rasante que será transmitido al elemento, por tanto, no es necesario realizar comprobación alguna.

No obstante, se dispondrán de 6 tirafondos de 8 mm de diámetro con pretaladro por motivos funcionales, estos deberán de tener una longitud de 7 cm y estar distribuidos al tresbolillo y equidistantes entre sí.

ANEJO 09. PLAN DE OBRA

DENOMINACIÓN	TITULACIÓN	MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
	PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).	
	CENTRO EDUCATIVO	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.

ÍNDICE

1. OBJETIVOS DEL ANEJO	4
2. FASES CONSTRUCTIVAS Y PROGRAMA DE TRABAJOS	4
ANEXO 1: PLAN DE OBRA	7

Listado de ilustraciones

<i>Ilustración 1. Instalación fila 1 – Domo 1.</i>	<i>4</i>
<i>Ilustración 2. Instalación fila 2 – Domo 1.</i>	<i>4</i>
<i>Ilustración 3. Instalación fila 3 – Domo 1.</i>	<i>4</i>
<i>Ilustración 4. Instalación premarco de la puerta – Domo 1.</i>	<i>5</i>
<i>Ilustración 5. Instalación fila 4 – Domo 1.</i>	<i>5</i>
<i>Ilustración 6. Instalación fila 5- Domo 1.</i>	<i>5</i>
<i>Ilustración 7. Instalación fila 6 - último pentágono – Domo 1.....</i>	<i>5</i>

1. OBJETIVOS DEL ANEJO

El objetivo del presente anejo es la presentación del programa de trabajos del “PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).”, en cumplimiento de lo dispuesto en el artículo 233 de la Ley 9/2017, de 8 de noviembre, de Contratos del Sector Público, desarrollando con carácter indicativo la duración de los trabajos a realizar. Para ello, en primer lugar, se define el procedimiento constructivo y a continuación se adjunta un diagrama de barras (o diagrama de Gantt) que esquematiza de forma gráfica la programación de los trabajos que se propone, considerando para cada actividad de la obra los diferentes tiempos de desarrollo de dicha actividad.

2. FASES CONSTRUCTIVAS Y PROGRAMA DE TRABAJOS

Las fases constructivas previstas vienen determinadas por la compatibilidad de las distintas unidades de obra y de sus procesos constructivos, teniendo en consideración el orden natural de ejecución. En la organización de los trabajos se ha tenido en cuenta el solapamiento de actividades debido a que las deberán de ejecutar coordinadamente diferentes equipos especializados de trabajo, como son los para los trabajos de cimentación, carpintería y impermeabilización con corcho proyectado.

En primer lugar, los trabajos comenzarán con las labores de desbroce del terreno y movimiento de tierras que dejen el hueco previsto para la cimentación. Posteriormente, se procede al cuidadoso replanteo de los encofrados, teniendo en cuenta la forma perimetral de las cimentaciones, para posteriormente armar, hormigonar y curar. Paralelamente a la cimentación, se da inicio a la fabricación de los elementos barra de la estructura, es decir, a realizar los cortes en inglete calculados en el presente proyecto.

Una vez la cimentación haya adquirido suficiente resistencia comienzan las labores de montaje de la estructura. Se acopiarán las piezas cortadas de la estructura de forma ordenadas según su nomenclatura (Piezas A, Piezas B, ..., etc.) y se instalará una mesa de trabajo con la que montar cuidadosamente los triángulos. Es decir, se irán uniando las piezas según la posición que les corresponda para formar los triángulos, este aspecto, se debe de hacer con precisión, pero las piezas encajan a la perfección solo en una única posición.

Ya montados todos los triángulos, se procede al montaje de la estructura, siguiendo las indicaciones y la distribución de los planos, se irán uniando mediante tornillería los diferentes niveles del domo geodésico. Como se muestra en las siguientes ilustraciones de ejemplo con el domo 1:



Ilustración 1. Instalación fila 1 – Domo 1.

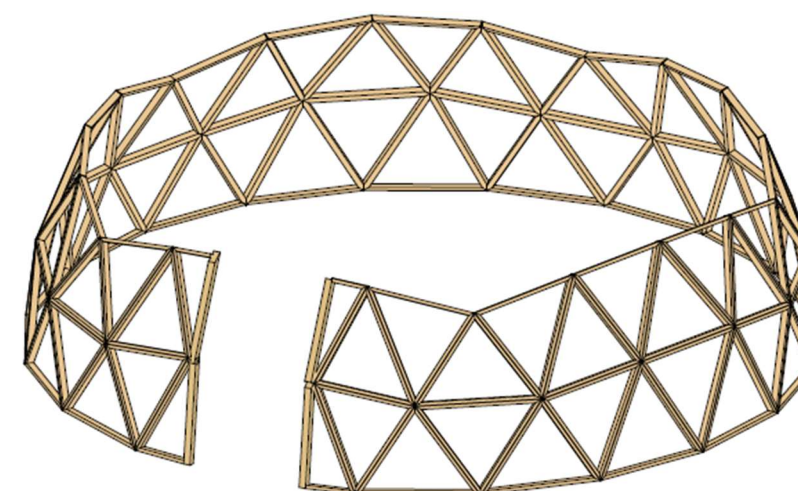


Ilustración 2. Instalación fila 2 – Domo 1.

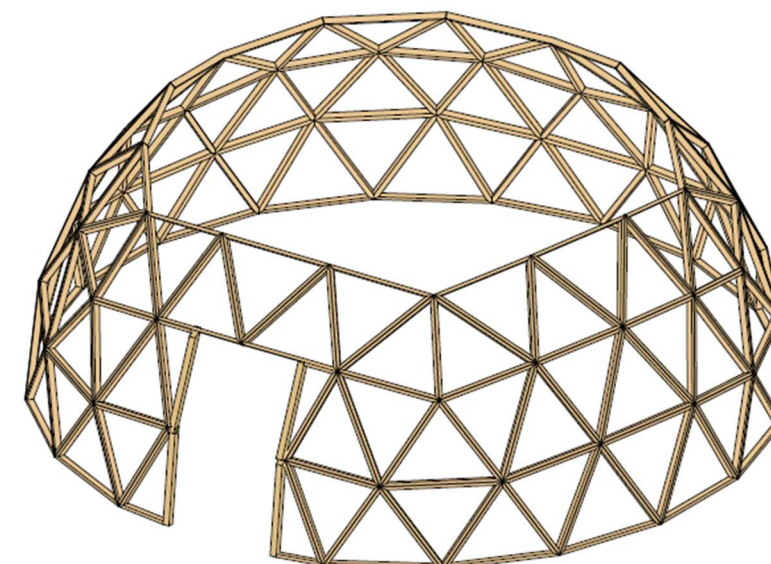
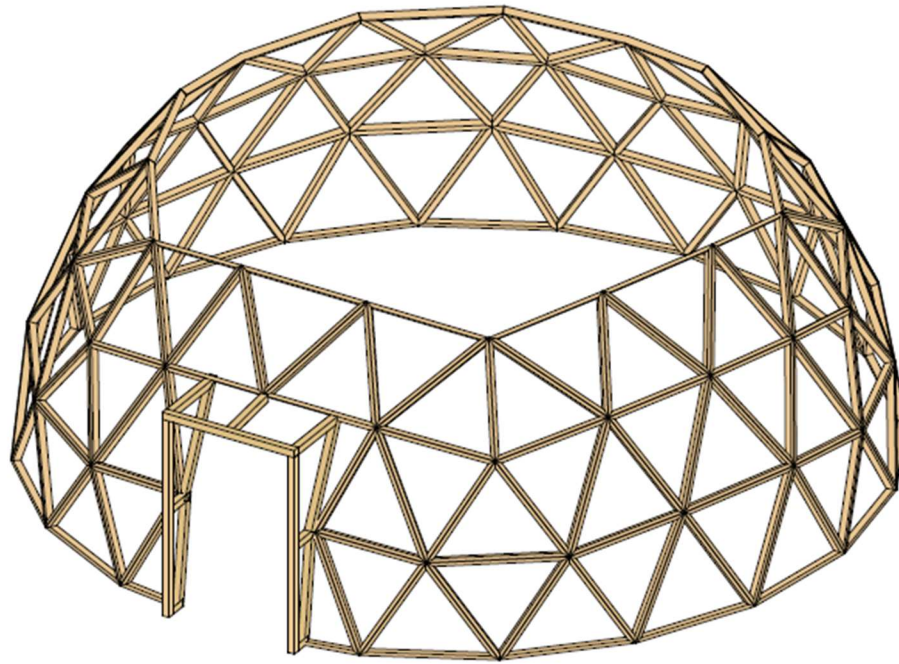
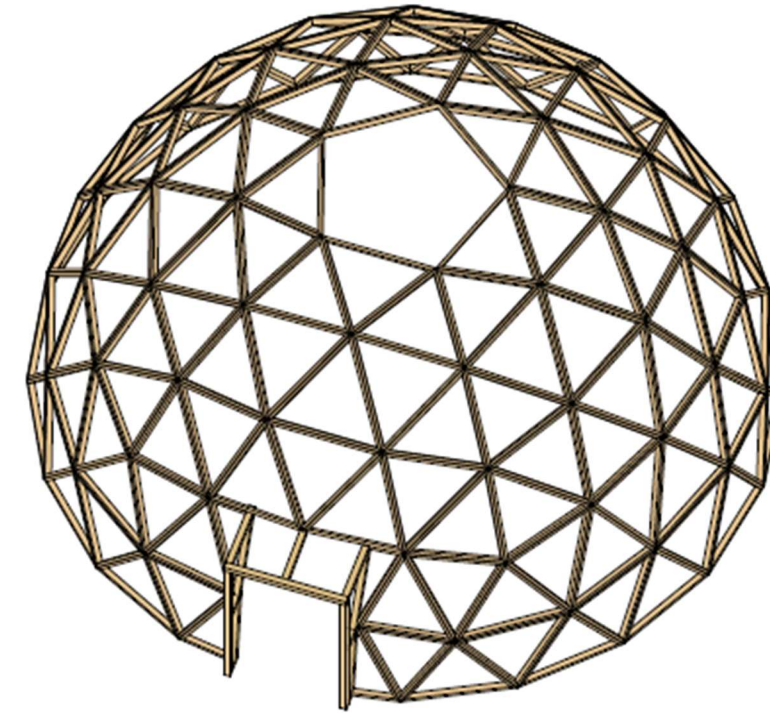


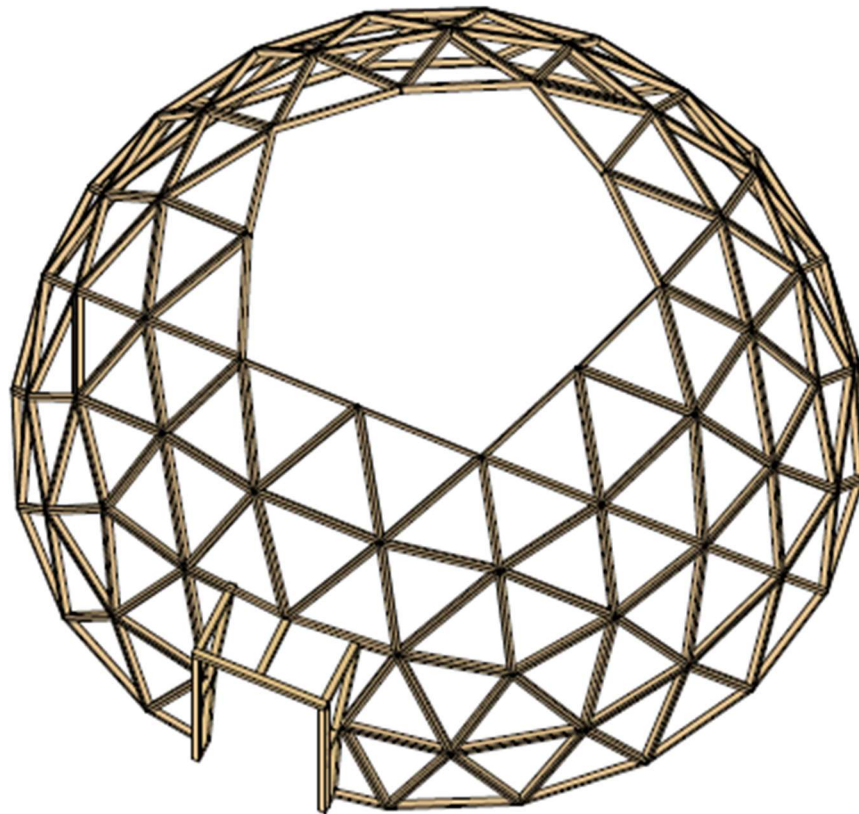
Ilustración 3. Instalación fila 3 – Domo 1.



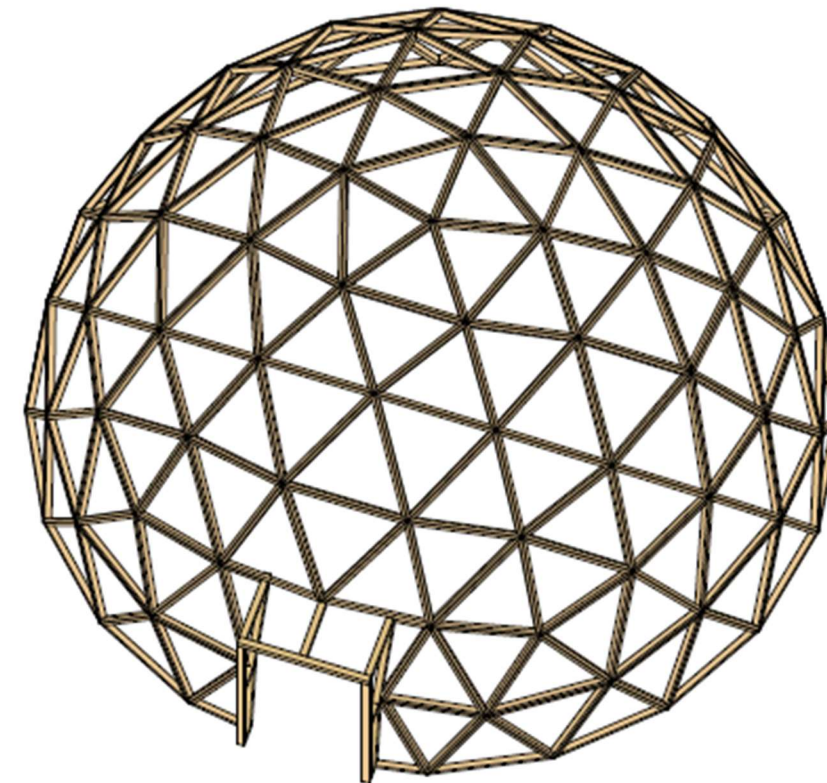
Ilustraci3n 4. Instalaci3n premarco de la puerta – Domo 1.



Ilustraci3n 6. Instalaci3n fila 5- Domo 1.



Ilustraci3n 5. Instalaci3n fila 4 – Domo 1.



Ilustraci3n 7. Instalaci3n fila 6 - último pentágono – Domo 1.

Durante la construcción del domo geodésico a partir de la fila 4, los elementos tienen posibilidad de vuelco por su propio peso debido a la elevada curvatura que ya existe en esa fase, por lo que, se deberá de ir apeando la estructura con puntales a partir de estos niveles para no sobrecargarla durante el montaje. Una vez colocado el último triángulo, el comportamiento estructural cambia convirtiéndose en una estructura autoportante, pudiéndose retirar los puntales.

Para la ejecución de la apertura de la puerta existen dos formas de hacerlo, ejecutar el domo completo sin apertura y realizar los cortes para la creación del hueco una vez la estructura esté terminada, o en su defecto, montar el domo directamente con el hueco y las piezas especiales de la puerta. Aunque en las ilustraciones se vea lo contrario, es mejor para la estructura realizar el hueco de la puerta a posteriori una vez la estructura ya sea autoportante. Si dejamos el hueco desde el inicio, algunos elementos pueden sobrecargarse por el propio montaje, ya que tenemos una zona donde las cargas no se reparten uniformemente y el domo todavía no es autoportante.

Tras el montaje, se realizarán los anclajes de la estructura a la cimentación y comenzará a ejecutarse el capítulo de cerramiento. Se cortarán los tableros OSB con la medida de los triángulos y se irán colocando en la cara exterior de la estructura, seguidamente se masillan las juntas con masilla de polímero y se colocarán puertas y ventanas. Seguidamente, en la cara interior de la estructura se pondrá la lana de roca y el tablero OSB por la cara interna, la lana de roca ocupará el hueco entre tablero exterior e interior. Previamente a la ejecución del tablero interior, se realizarán los huecos necesarios para el paso de instalaciones que se desee que queden entre los tableros.

Posteriormente, e incluso en paralelo a los trabajos de cerramiento sobre el interior del domo, se darán varias capas de membrana impermeabilizante, riego de imprimación y aplicación del corcho proyectado. Finalmente, se colocará el suelo interior, tabiquería y mobiliario.

A continuación, se enumeran y describen las fases previstas para la ejecución de la obra para cualquiera de los domos del presente proyecto:

- **CIMENTACIÓN:** Se realizarán los movimientos de tierra necesarios y se ejecutará la cimentación siguiendo con precisión las medidas representadas según planos.
- **ESTRUCTURA:** Paralelamente a los trabajos de cimentación, el equipo de carpintería da inicio a la fabricación de la estructura. Posteriormente, se traslada a obra, se montan los triángulos y posteriormente se monta la estructura.

- **CERRAMIENTO:** Una vez montada la estructura, se procede a la colocación del tablero OSB en su cara exterior, masillado de las juntas, colocación de lana de roca y OSB interior, impermeabilización y aplicación del corcho proyectado.
- **ARQUITECTURA:** Previamente a la impermeabilización, debe de estar colocada la puerta y las ventanas, y posteriormente, se colocará el suelo y la tabiquería interior del domo.

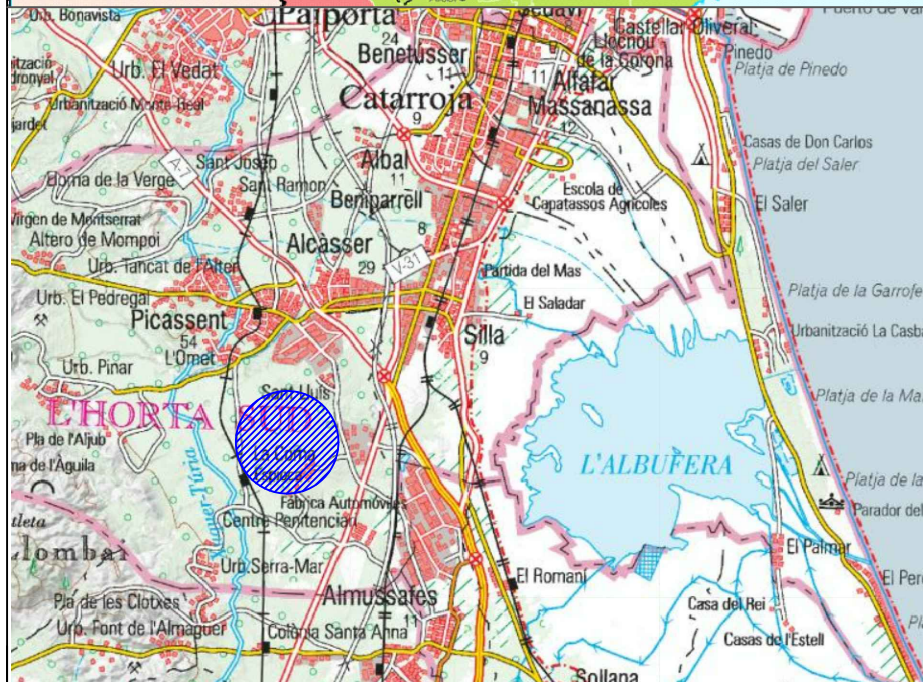
Para el cálculo de la duración de cada actividad se han utilizado valores recogidos por la propia experiencia del redactor en la construcción de domos geodésicos muy similares a los proyectados y a partir de las mediciones del proyecto, con base en unos rendimientos contrastados con la realidad.



A partir de todo ello se ha configurado el programa de trabajos del proyecto, que comprende un período de **DOS (2) meses** para la completa ejecución de los tres domos geodésicos. A continuación, se puede visualizar el programa de trabajos en el anexo 1, con la duración de cada una de las actividades y la coordinación en el avance de los diferentes domos geodésicos para una puesta en obra organizada y eficiente.

ANEXO 1: PLAN DE OBRA

PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).		PLAN DE OBRA																																							
		MES 1																				MES 2																			
		SEMANA 1					SEMANA 2					SEMANA 3					SEMANA 4					SEMANA 5					SEMANA 6					SEMANA 7					SEMANA 8				
ACTIVIDAD	DURACIÓN (días)	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5	DÍA 1	DÍA 2	DÍA 3	DÍA 4	DÍA 5
DOMO GEODÉSICO 1 - C1/V4/10M	23																																								
01. ESTRUCTURA	8																																								
01.01. FABRICACIÓN ESTRUCTURA	4																																								
01.02. MONTAJE ESTRUCTURA	4																																								
02. CIMENTACIÓN	5																																								
02.01. MOVIMIENTOS DE TIERRAS Y HORMIGÓN DE LIMPIEZA	2																																								
02.02. ENCOFRADO, ARMADO Y HORMIGONADO	4																																								
03. CERRAMIENTO	18																																								
03.01. FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DE OSB EXTERIOR	4																																								
03.02. MASILLADO DE JUNTAS	2																																								
03.03. COLOCACIÓN DE LANA DE ROCA	2																																								
03.04. FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DE OSB INTERIOR	4																																								
03.05. APLICACIÓN DE CORCHO PROYECTADO E IMPERMEABILIZACIÓN	5																																								
04. ARQUITECTURA	18																																								
04.01. EJECUCIÓN DE PUERTA	1																																								
04.02. COLOCACIÓN DE VENTANAS	2																																								
04.03. INSTALACIÓN DE PAVIMENTO INTERIOR Y TABIQUERÍA	2																																								
DOMO GEODÉSICO 2 - C1/V2/6M	22																																								
01. ESTRUCTURA	8																																								
01.01. FABRICACIÓN ESTRUCTURA	3																																								
01.02. MONTAJE ESTRUCTURA	3																																								
02. CIMENTACIÓN	5																																								
02.01. MOVIMIENTOS DE TIERRAS Y HORMIGÓN DE LIMPIEZA	2																																								
02.02. ENCOFRADO, ARMADO Y HORMIGONADO	4																																								
03. CERRAMIENTO	14																																								
03.01. FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DE OSB EXTERIOR	4																																								
03.02. MASILLADO DE JUNTAS	2																																								
03.03. COLOCACIÓN DE LANA DE ROCA	2																																								
03.04. FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DE OSB INTERIOR	4																																								
03.05. APLICACIÓN DE CORCHO PROYECTADO E IMPERMEABILIZACIÓN	5																																								
04. ARQUITECTURA	17																																								
04.01. EJECUCIÓN DE PUERTA	1																																								
04.02. COLOCACIÓN DE VENTANAS	2																																								
04.03. INSTALACIÓN DE PAVIMENTO INTERIOR Y TABIQUERÍA	2																																								
DOMO GEODÉSICO 3 - C2/V2/8M	24																																								
01. ESTRUCTURA	9																																								
01.01. FABRICACIÓN ESTRUCTURA	3																																								
01.02. MONTAJE ESTRUCTURA	4																																								
02. CIMENTACIÓN	5																																								
02.01. MOVIMIENTOS DE TIERRAS Y HORMIGÓN DE LIMPIEZA	2																																								
02.02. ENCOFRADO, ARMADO Y HORMIGONADO	4																																								
03. CERRAMIENTO	15																																								
03.01. FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DE OSB EXTERIOR	5																																								
03.02. MASILLADO DE JUNTAS	2																																								
03.03. COLOCACIÓN DE LANA DE ROCA	2																																								
03.04. FABRICACIÓN Y COLOCACIÓN DE OSB INTERIOR	4																																								
03.05. APLICACIÓN DE CORCHO PROYECTADO E IMPERMEABILIZACIÓN	5																																								
04. ARQUITECTURA	15																																								
04.01. EJECUCIÓN DE PUERTA	1																																								
04.02. COLOCACIÓN DE VENTANAS	2																																								
04.03. INSTALACIÓN DE PAVIMENTO INTERIOR Y TABIQUERÍA	2																																								
OTROS	40																																								
GESTIÓN DE RESIDUOS	40																																								
SEGURIDAD Y SALUD	40																																								

ÍNDICE DE PLANOS	
00. GENERALES	
00.01	ÍNDICE
00.02	SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO
00.03	LOCALIZACIÓN PARCELA CATASTRAL
00.04	PLANTA GENERAL ACTUACIÓN
00.05	REPLANTEO
01. DOMO 1 C1/V4 ϕ 10m	
01.01	ESTADO PROYECTADO
01.02	ESTRUCTURA
01.03	MONTAJE ESTRUCTURA
01.04	MONTAJE DE TRIÁNGULOS
01.05	FABRICACIÓN DE ESTRUCTURA
01.06	FABRICACIÓN DE PUERTA
01.07	FABRICACIÓN TABLERO
01.08	UNIONES
01.09	CIMENTACIÓN
02. DOMO 2 C1/V2 ϕ 6m	
02.01	ESTADO PROYECTADO
02.02	ESTRUCTURA
02.03	MONTAJE ESTRUCTURA
02.04	MONTAJE DE TRIÁNGULOS
02.05	FABRICACIÓN DE ESTRUCTURA
02.06	FABRICACIÓN DE PUERTA
02.07	FABRICACIÓN TABLERO
02.08	UNIONES
02.09	CIMENTACIÓN
03. DOMO 3 C2/V2 ϕ 8m	
03.01	ESTADO PROYECTADO
03.02	ESTRUCTURA
03.03	MONTAJE ESTRUCTURA
03.04	MONTAJE DE TRIÁNGULOS
03.05	FABRICACIÓN DE ESTRUCTURA
03.06	FABRICACIÓN DE PUERTA
03.07	FABRICACIÓN TABLERO
03.08	UNIONES
03.09	CIMENTACIÓN



 UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA	TRABAJO DE FIN DE MÁSTER: MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS	 Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos - Universitat Politècnica de València	AUTOR DEL PROYECTO: IVÁN FRANCISCO ESQUER ROCH <i>Iván Esquer</i>	ESCALA A3: 1:10.000	PROYECTO: PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICAS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).	FECHA: SEPT- 2022	TÍTULO DEL PLANO: GENERALES SITUACIÓN Y EMPLAZAMIENTO DE LAS OBRAS	Nº DE PLANO: 00.02
				UNIDADES: Metros				



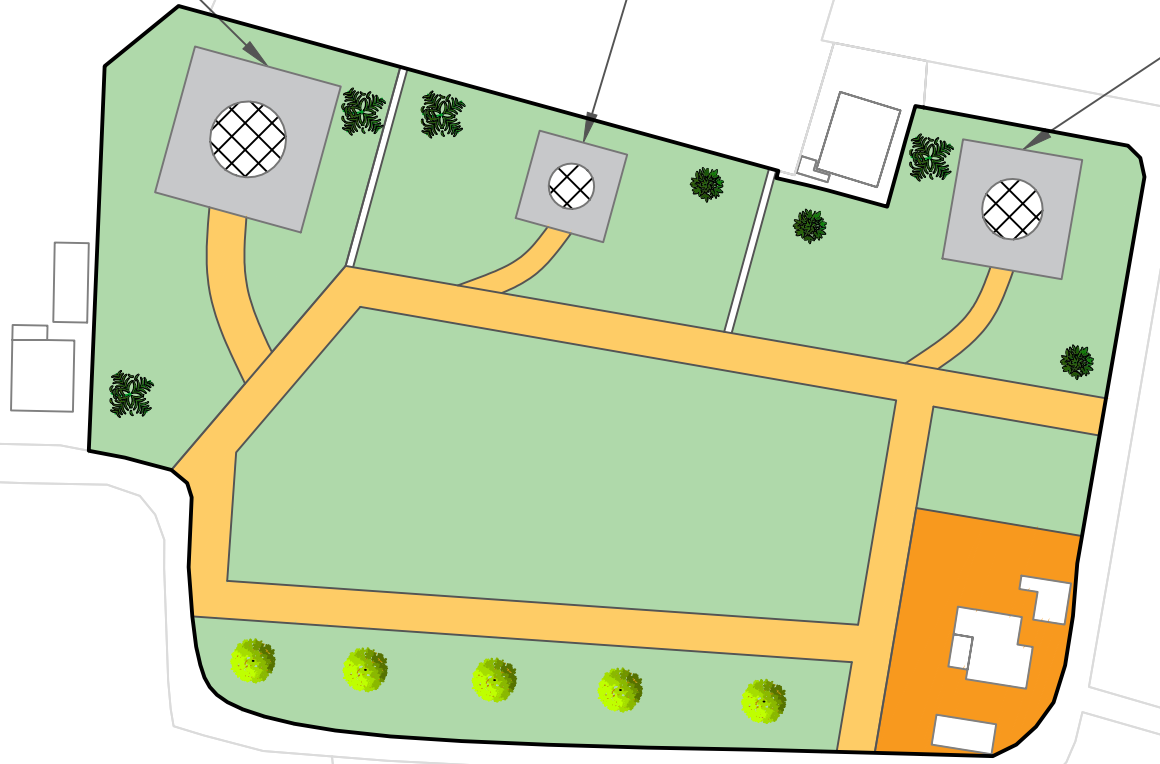
COORDENADAS REPLANTEO DEL CENTRO DE LOS DOMOS		
Domo	N/S	E/O
DOMO 1	483.327.541	125.433.028
DOMO 2	483.755.458	125.495.071
DOMO 3	484.338.723	125.525.303



DOMO 1: C1 / V4-Ø10m

DOMO 2: C1 / V2-Ø6m

DOMO 3: C2 / V2-Ø8m



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER:
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de
Caminos, Canales y Puertos - Universitat
Politécnica de València

AUTOR DEL PROYECTO:
IVÁN FRANCISCO ESQUER ROCH
Iván Esquer

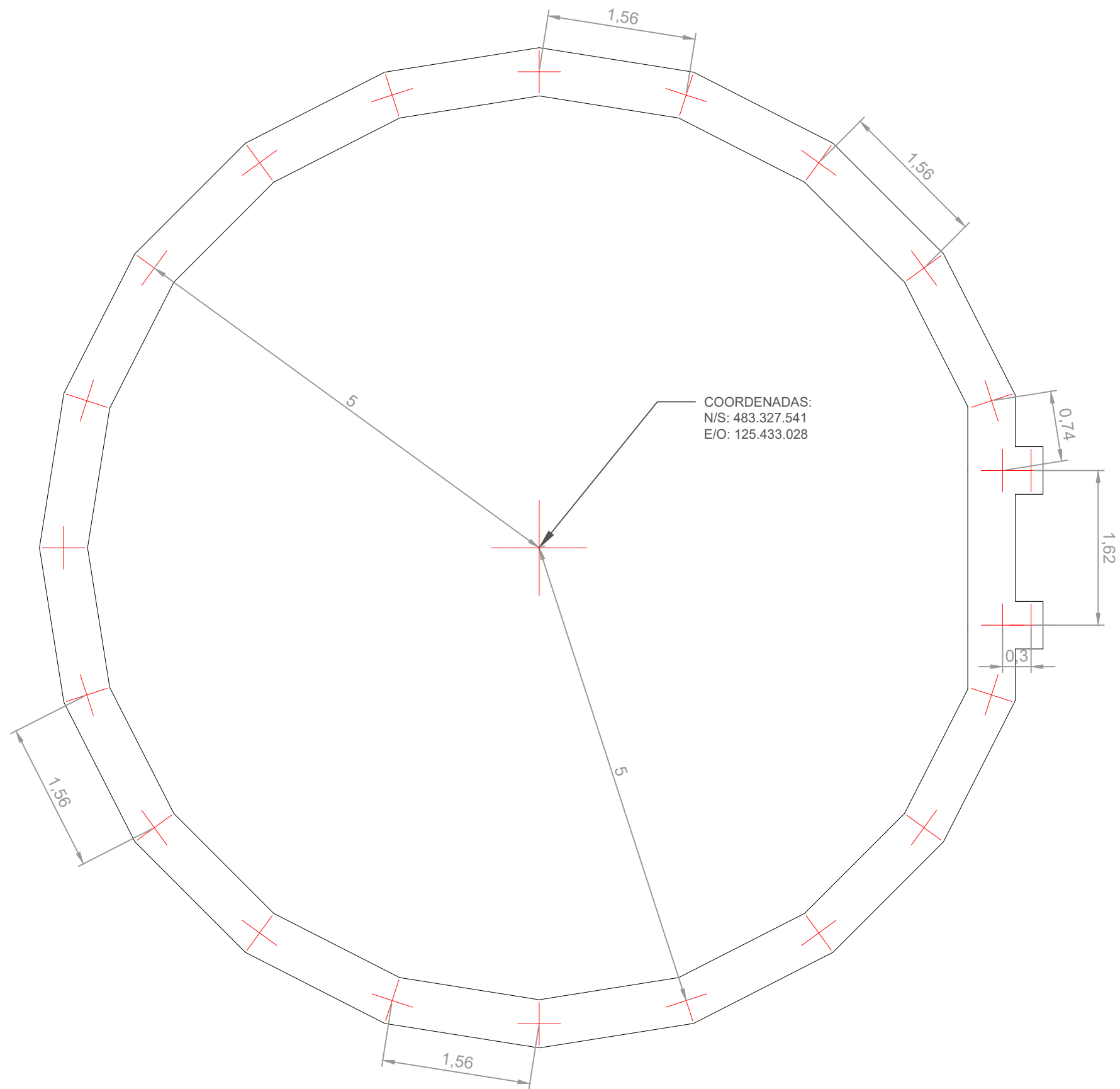
ESCALA A3:
1:1.000
UNIDADES:
Metros

PROYECTO:
PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN
E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES.
APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).

FECHA:
SEPT- 2022

TÍTULO DEL PLANO:
GENERALES
PLANTA GENERAL ACTUACIÓN

Nº DE PLANO:
00.04
HOJA 1 DE 1



COORDENADAS:
 N/S: 483.327.541
 E/O: 125.433.028



UNIVERSITAT
 POLITÈCNICA
 DE VALÈNCIA

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER:
 MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE
 CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de
 Caminos, Canales y Puertos - Universitat
 Politècnica de València

AUTOR DEL PROYECTO:
 IVÁN FRANCISCO ESQUER ROCH
Iván Esquer

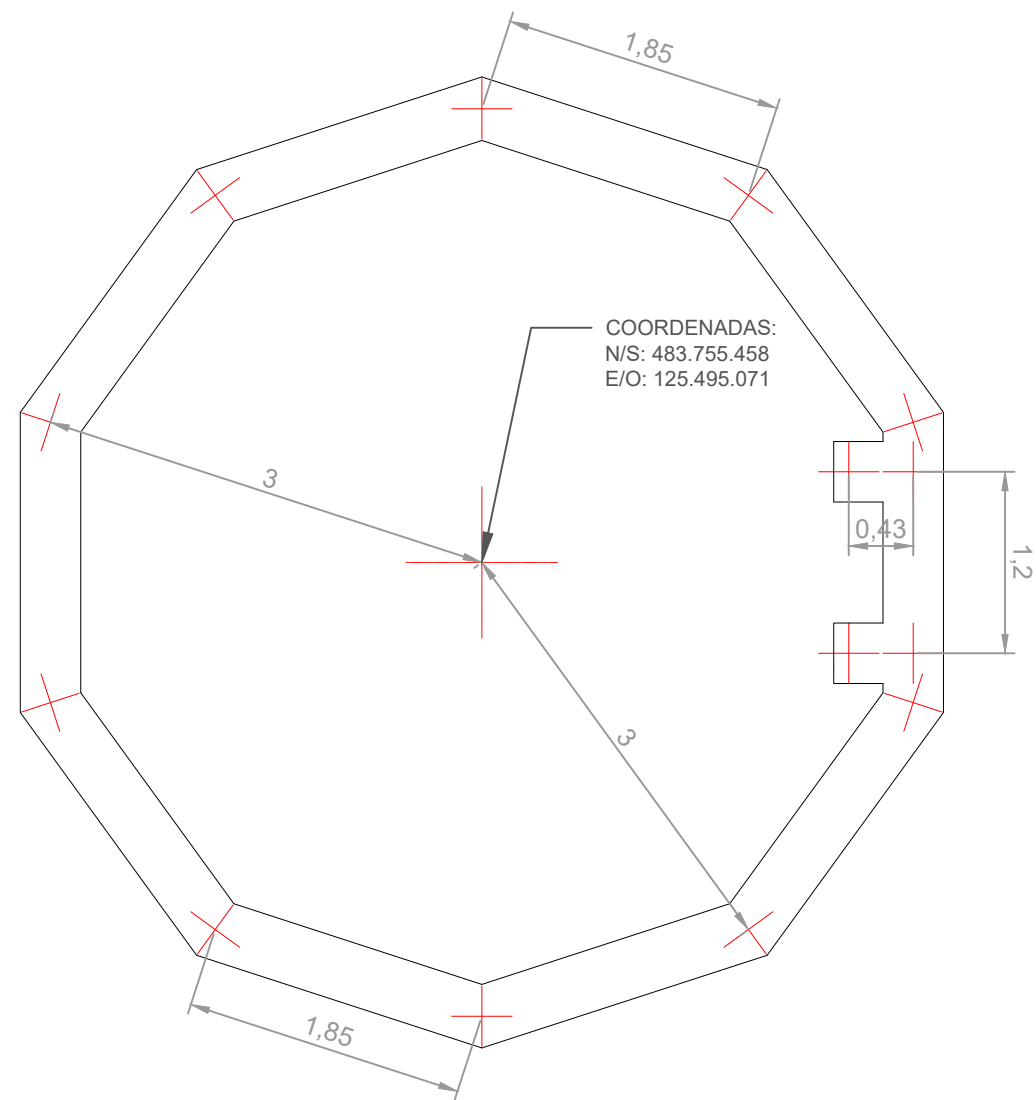
ESCALA A3:
 1:50
 UNIDADES:
 Metros

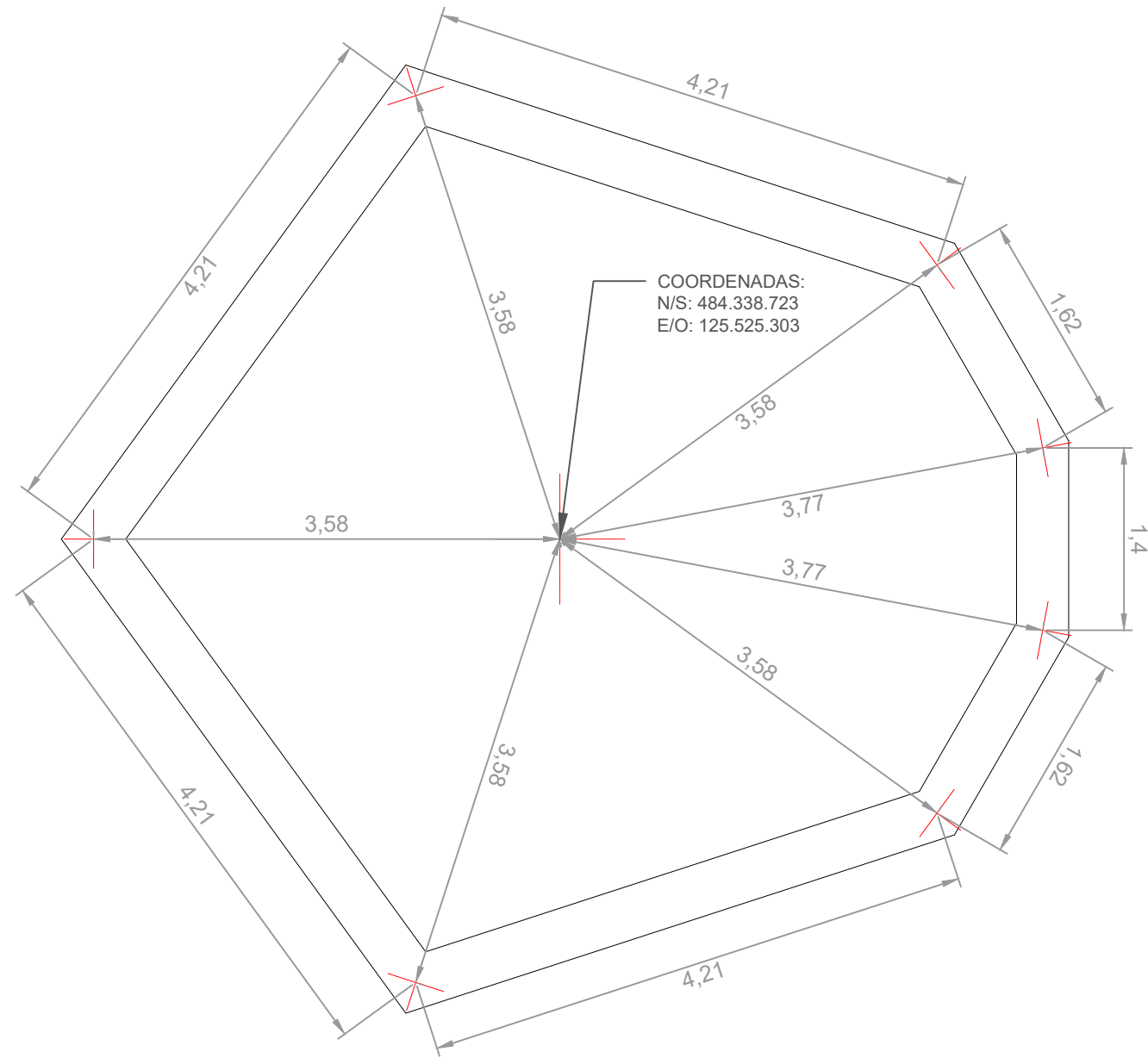
PROYECTO:
 PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN
 E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES.
 APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).

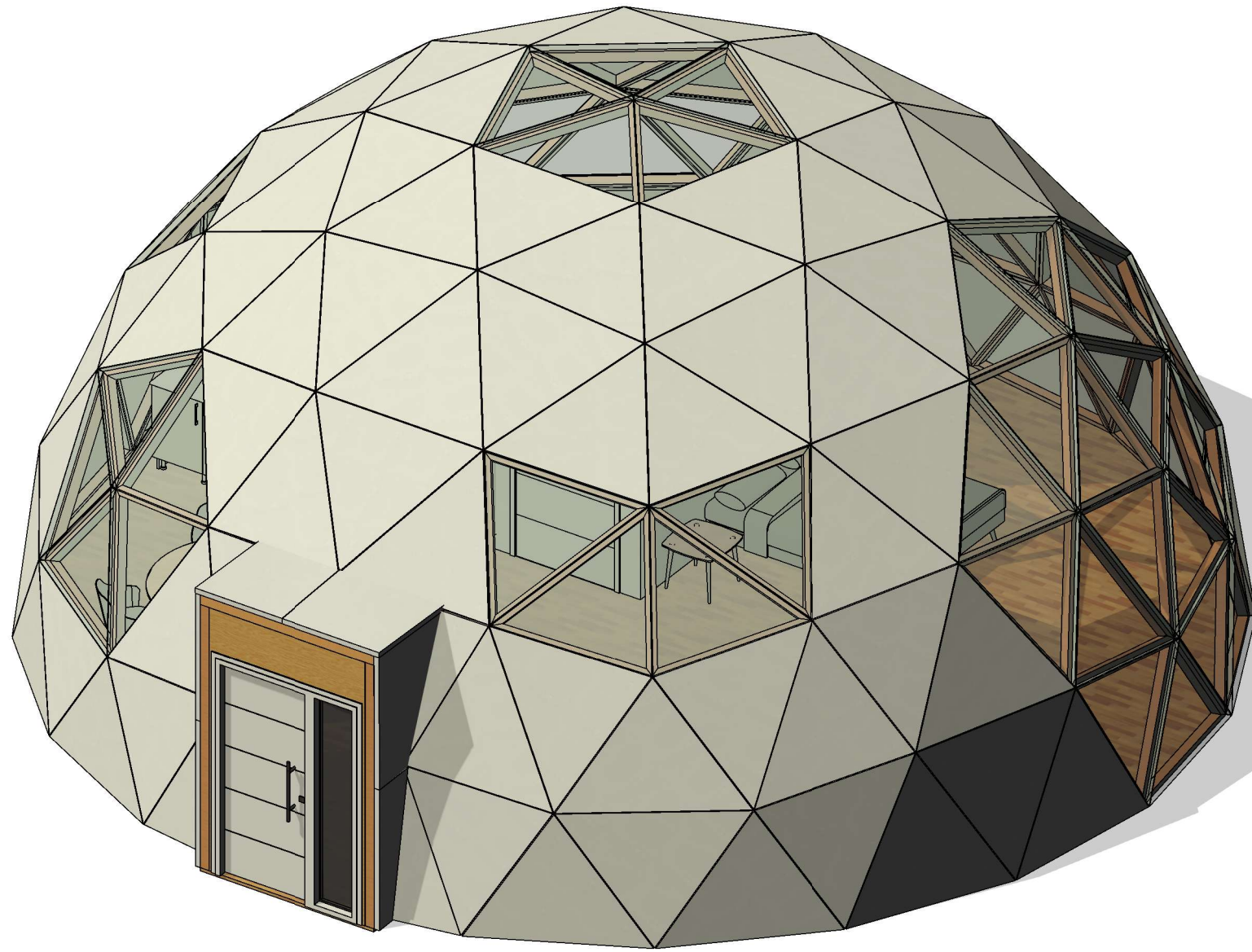
FECHA:
 SEPT- 2022

TÍTULO DEL PLANO:
GENERALES
 REPLANTEO
 DOMO 1

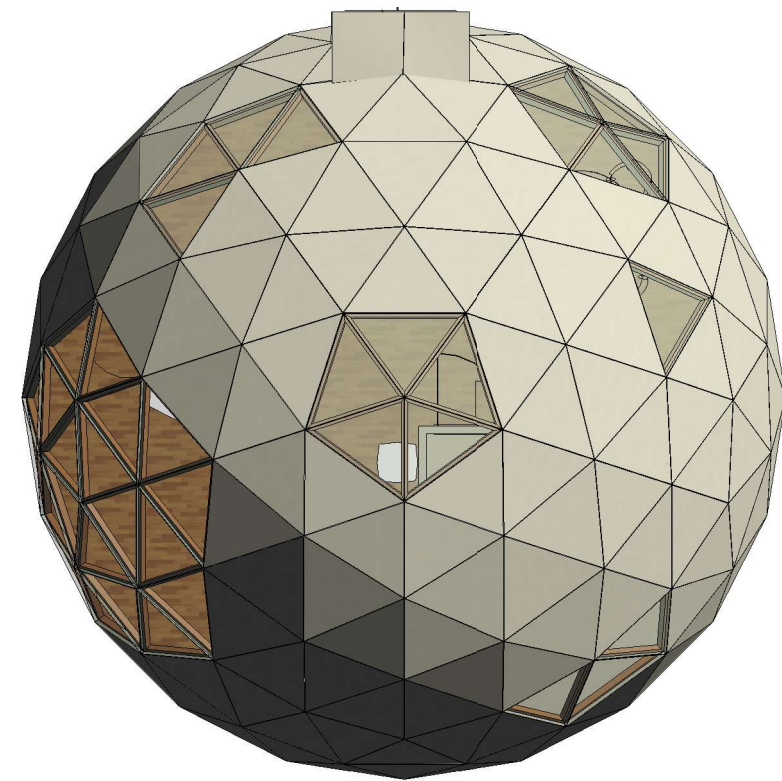
Nº DE PLANO:
 00.05
 HOJA 1 DE 3







2 3D ARQUITECTURA



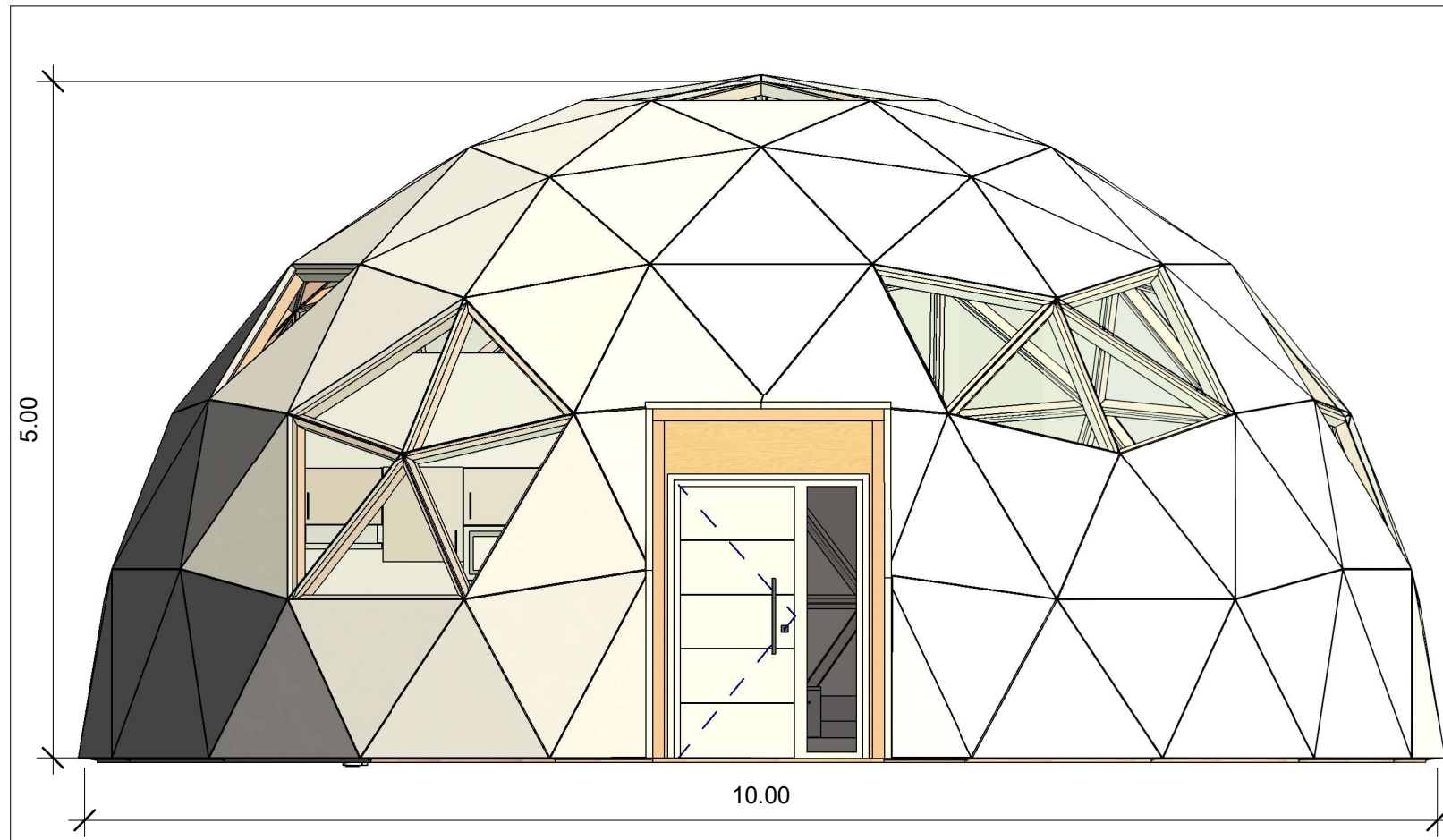
1 PLANTA GENERAL ARQUITECTURA
1 : 100

001.C-2.012
-

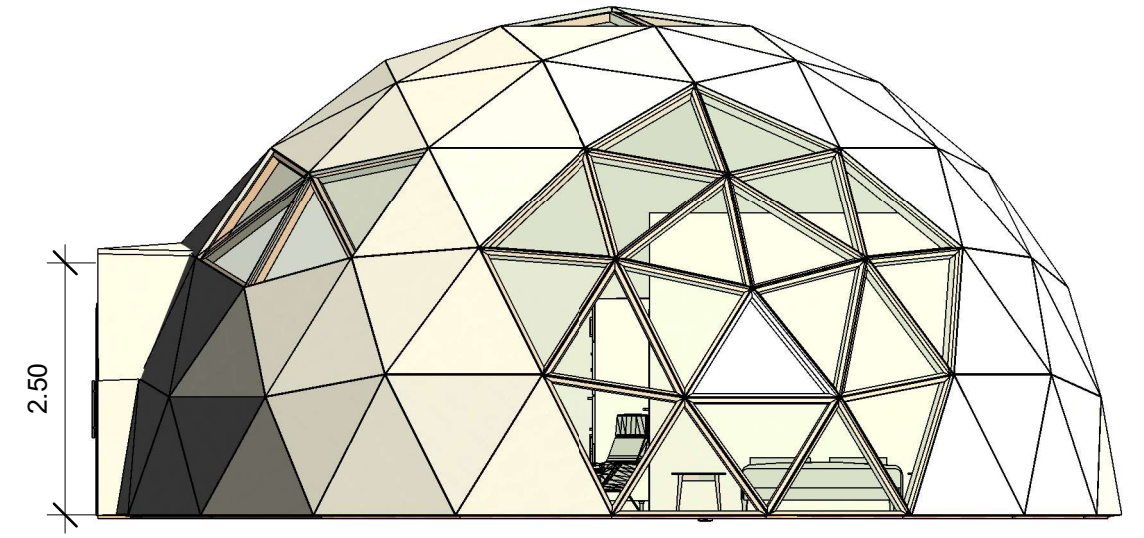
001.02.012 4

2 001.02.012

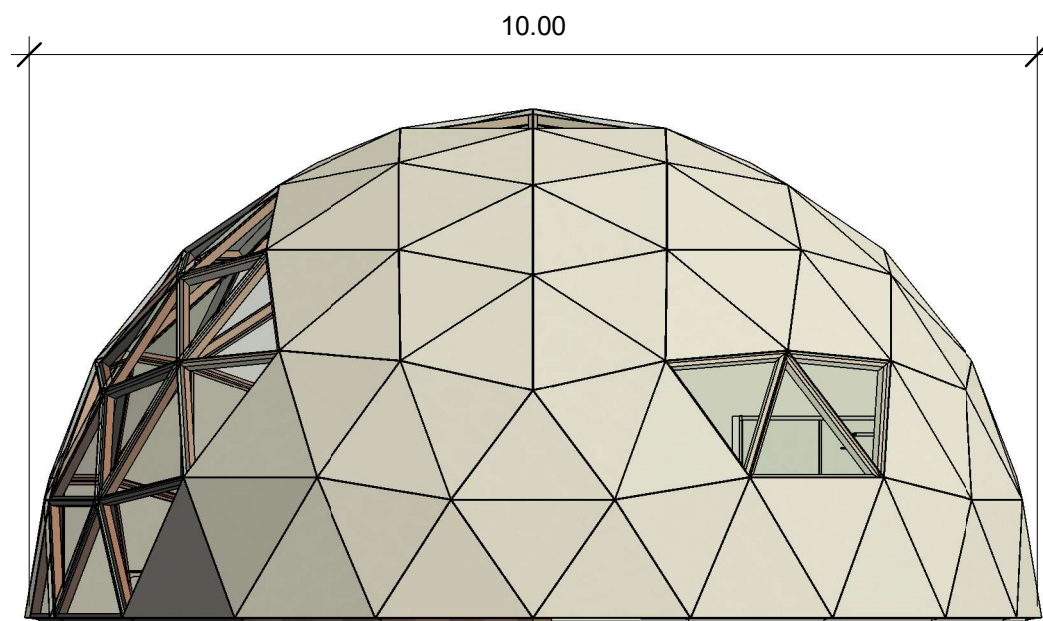
3
001.02.012



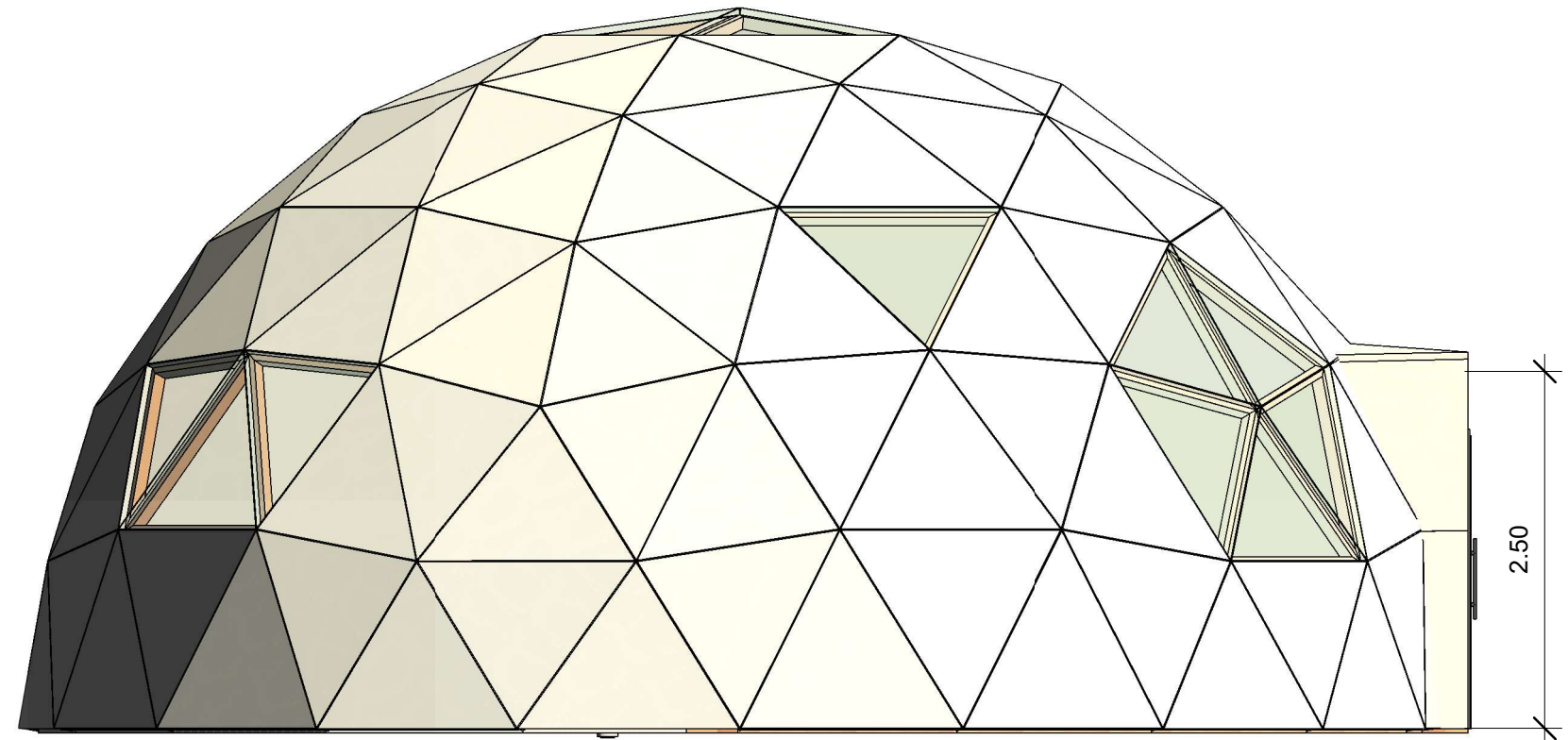
2 ALZADO FRONTAL
1:50



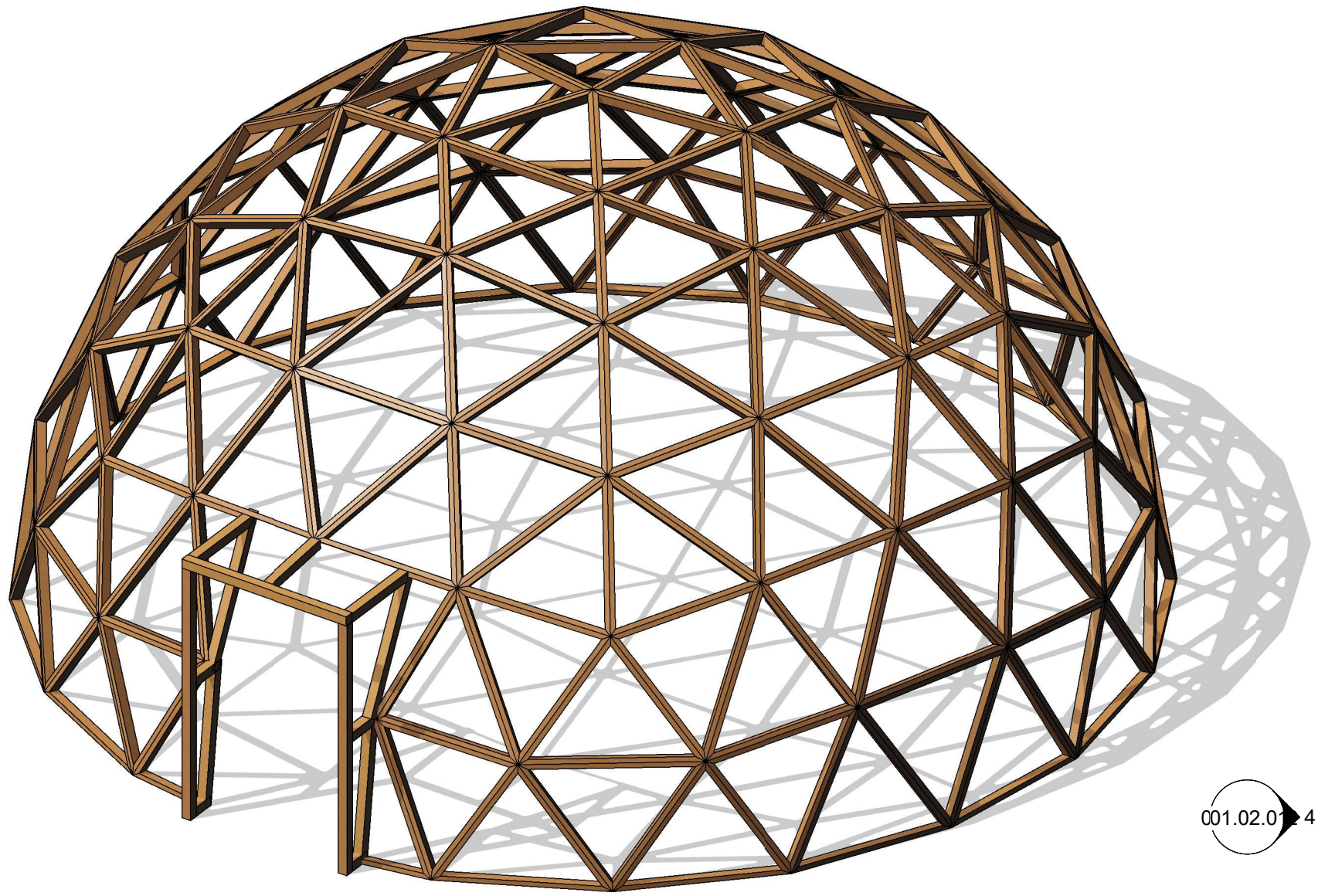
1 ALZADO LATERAL ESTE
1:75



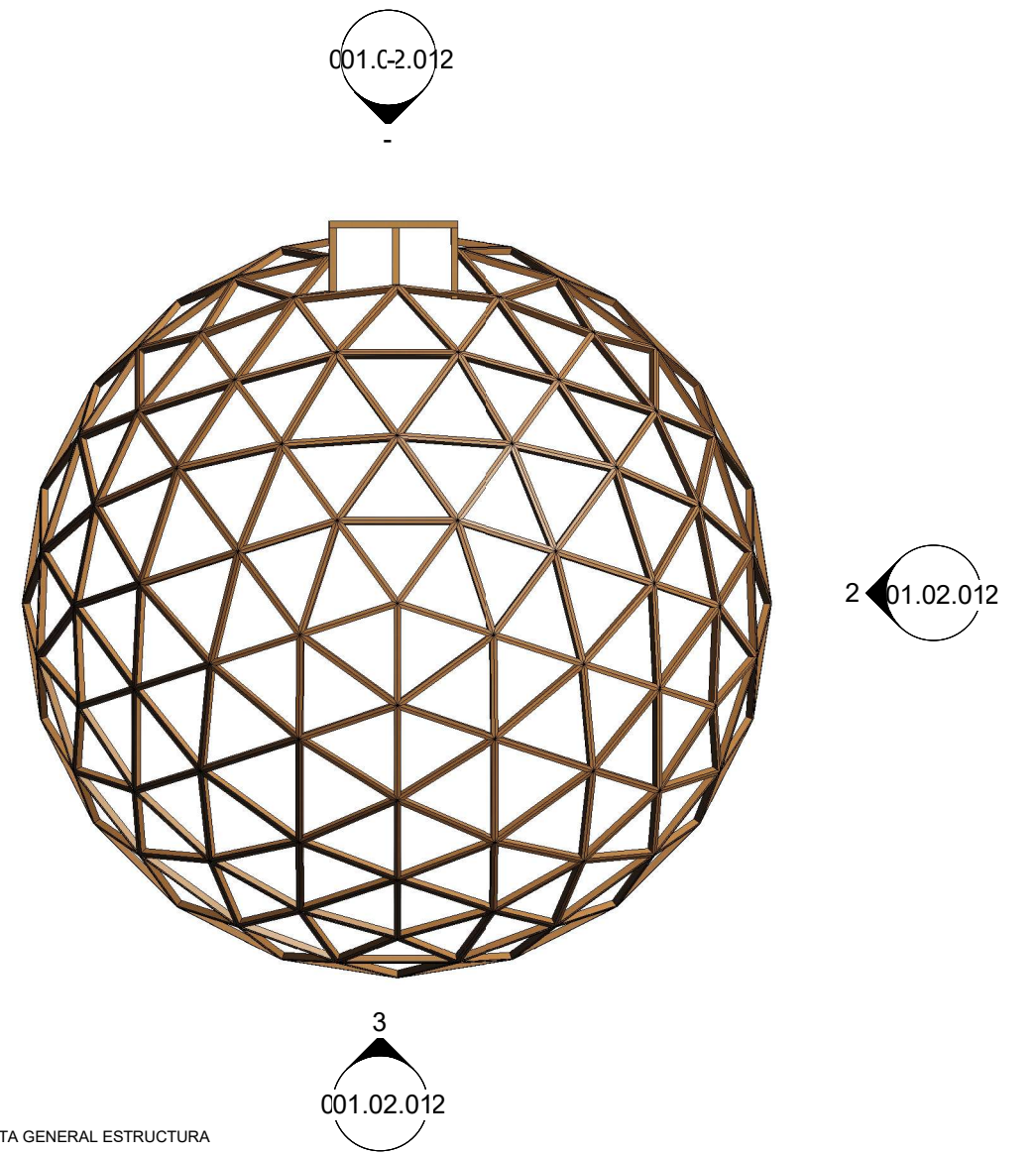
4 ALZADO DORSAL
1:75



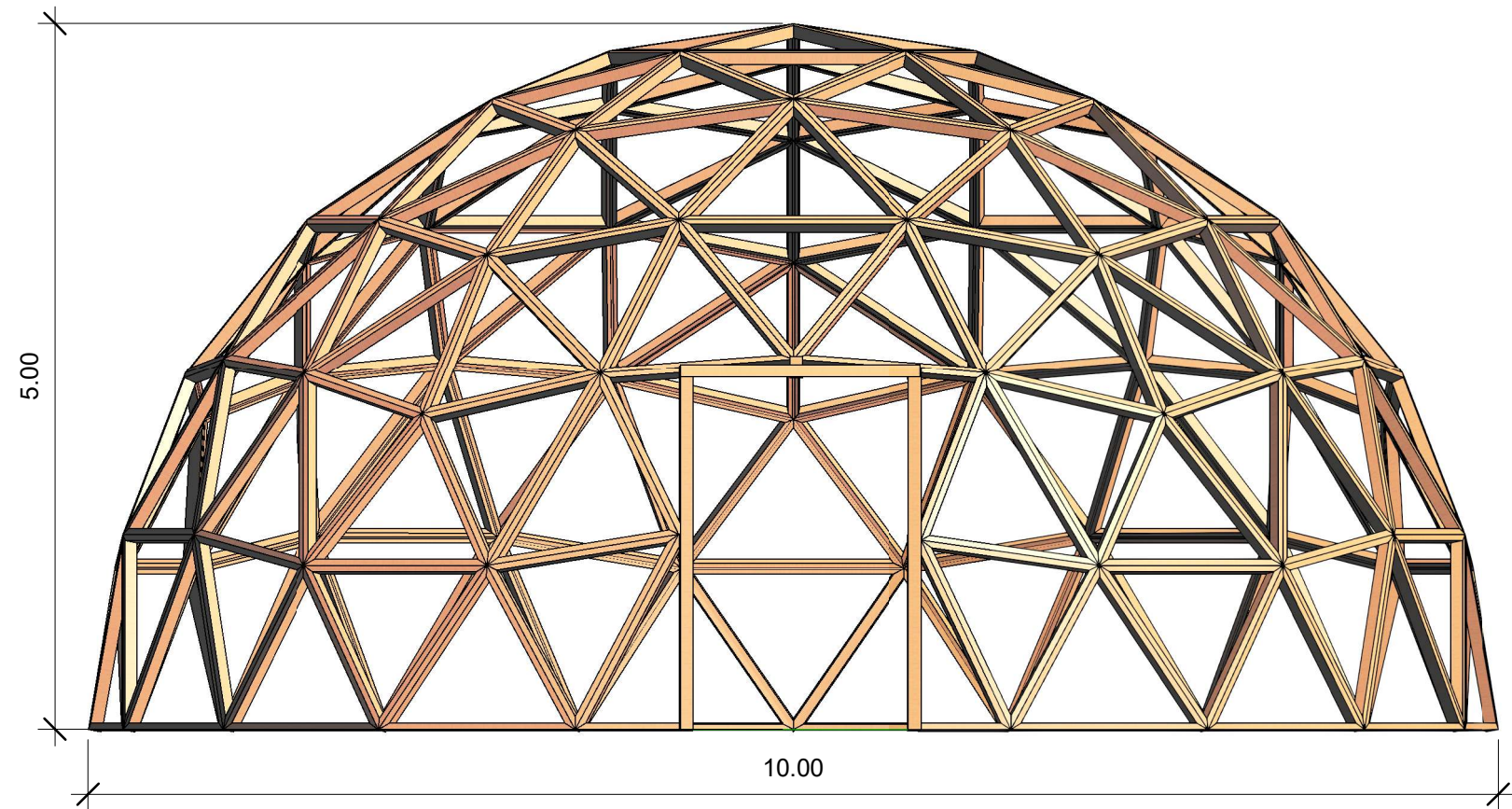
3 ALZADO LATERAL OESTE
1:50



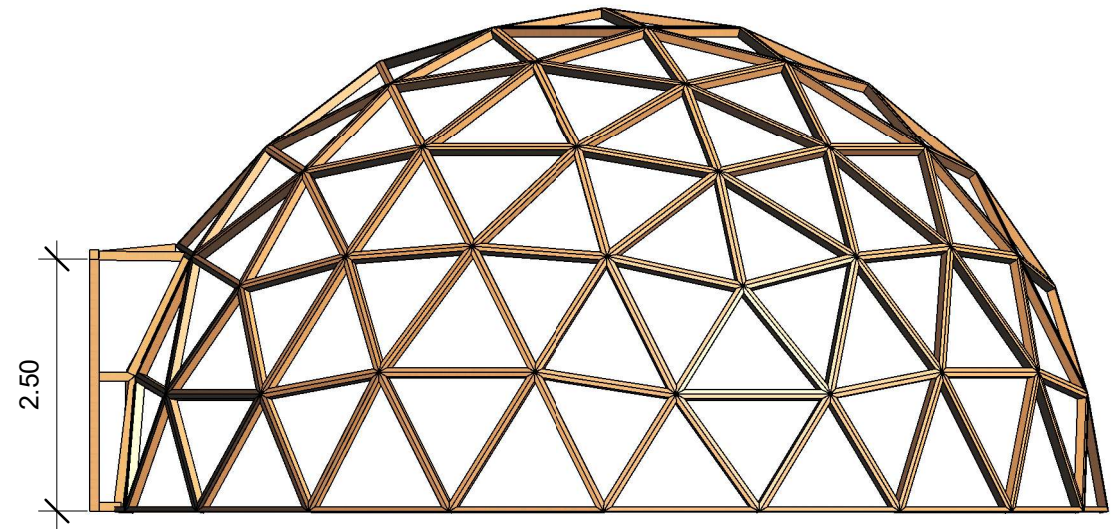
1 3D ESTRUCTURA



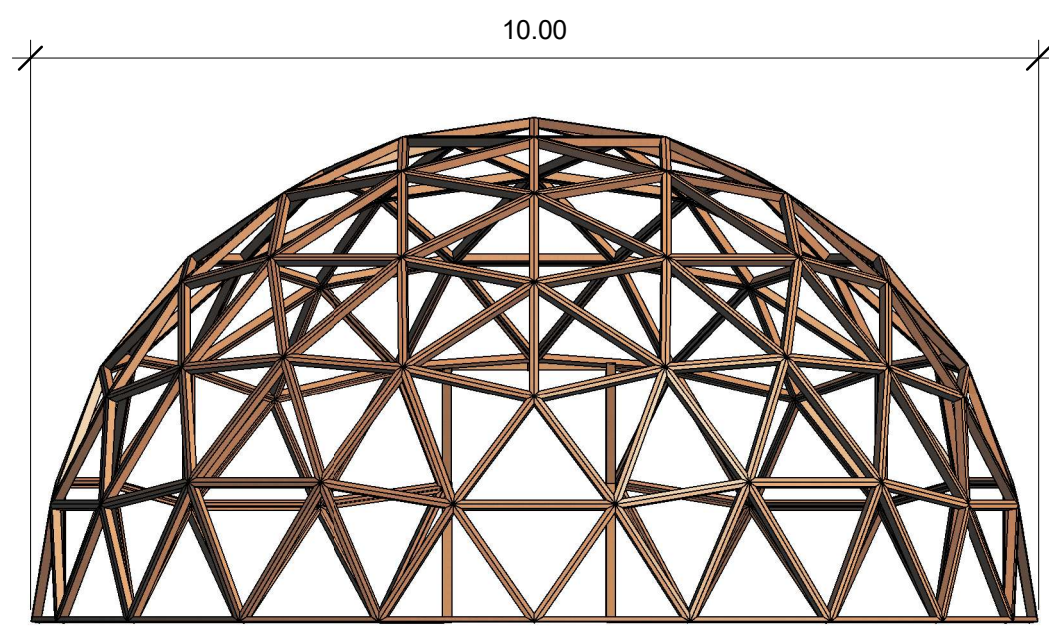
2 PLANTA GENERAL ESTRUCTURA
1 : 100



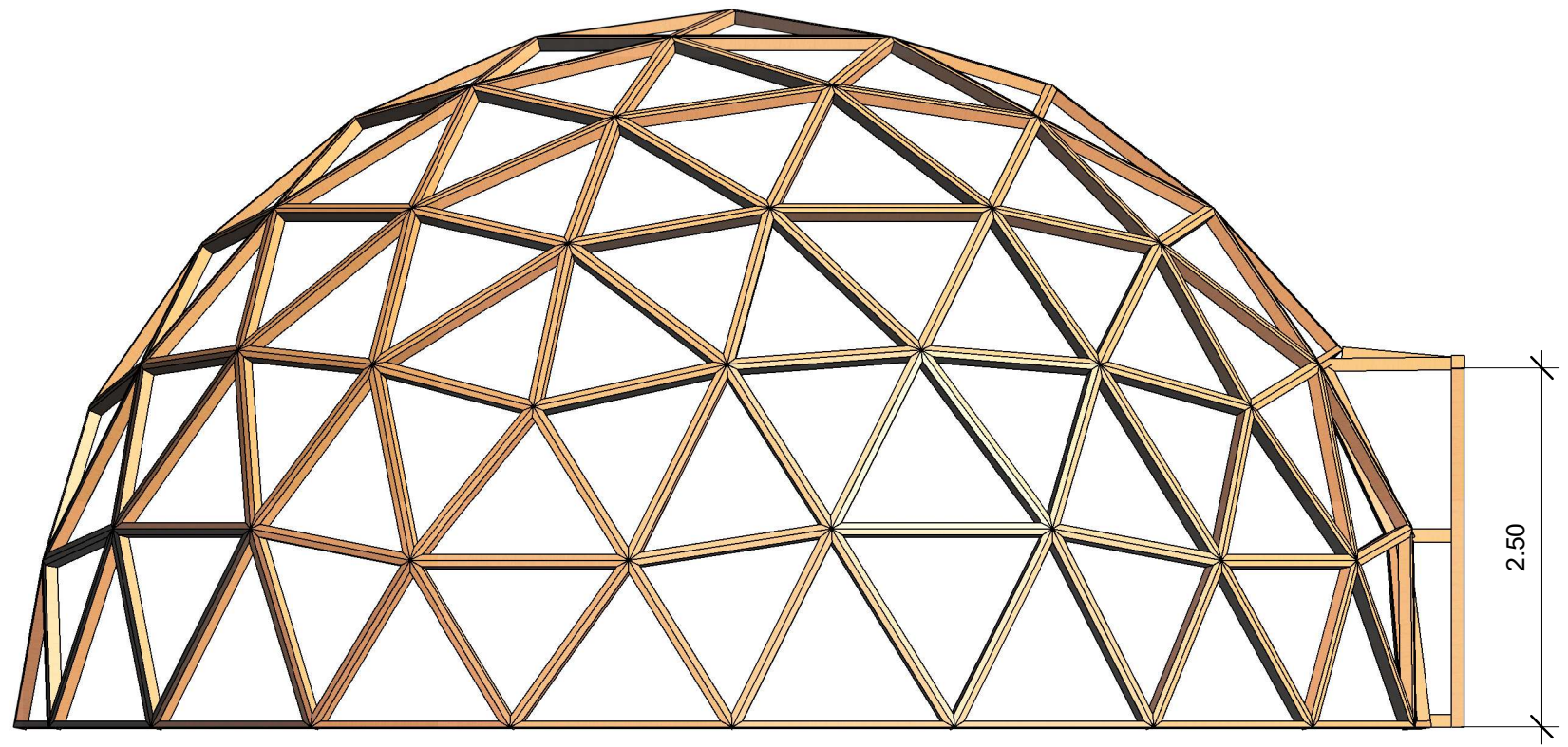
1 ALZADO FRONTAL ESTRUCTURA
1:50



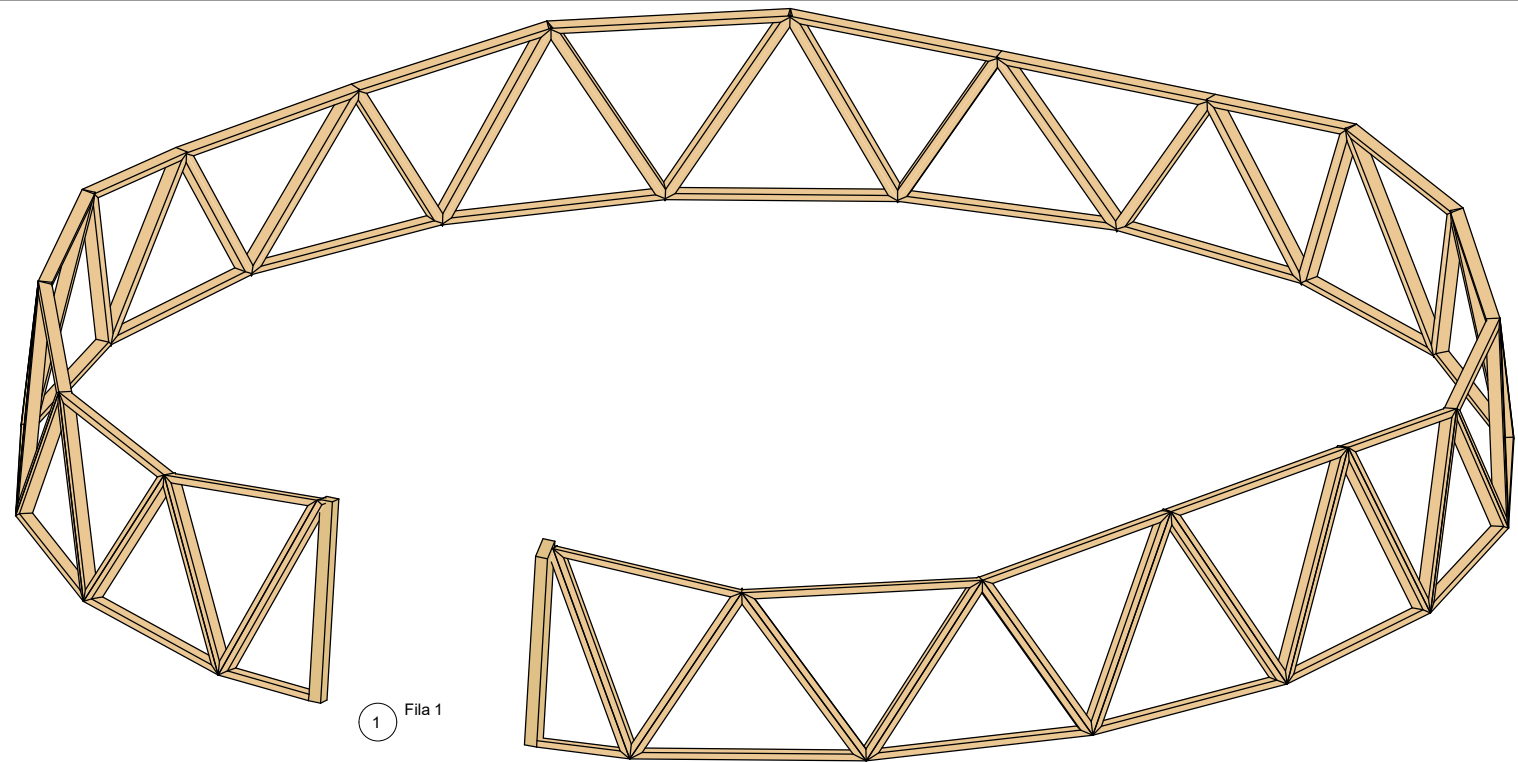
4 ALZADO LATERAL ESTE ESTRUCTURA
1:75



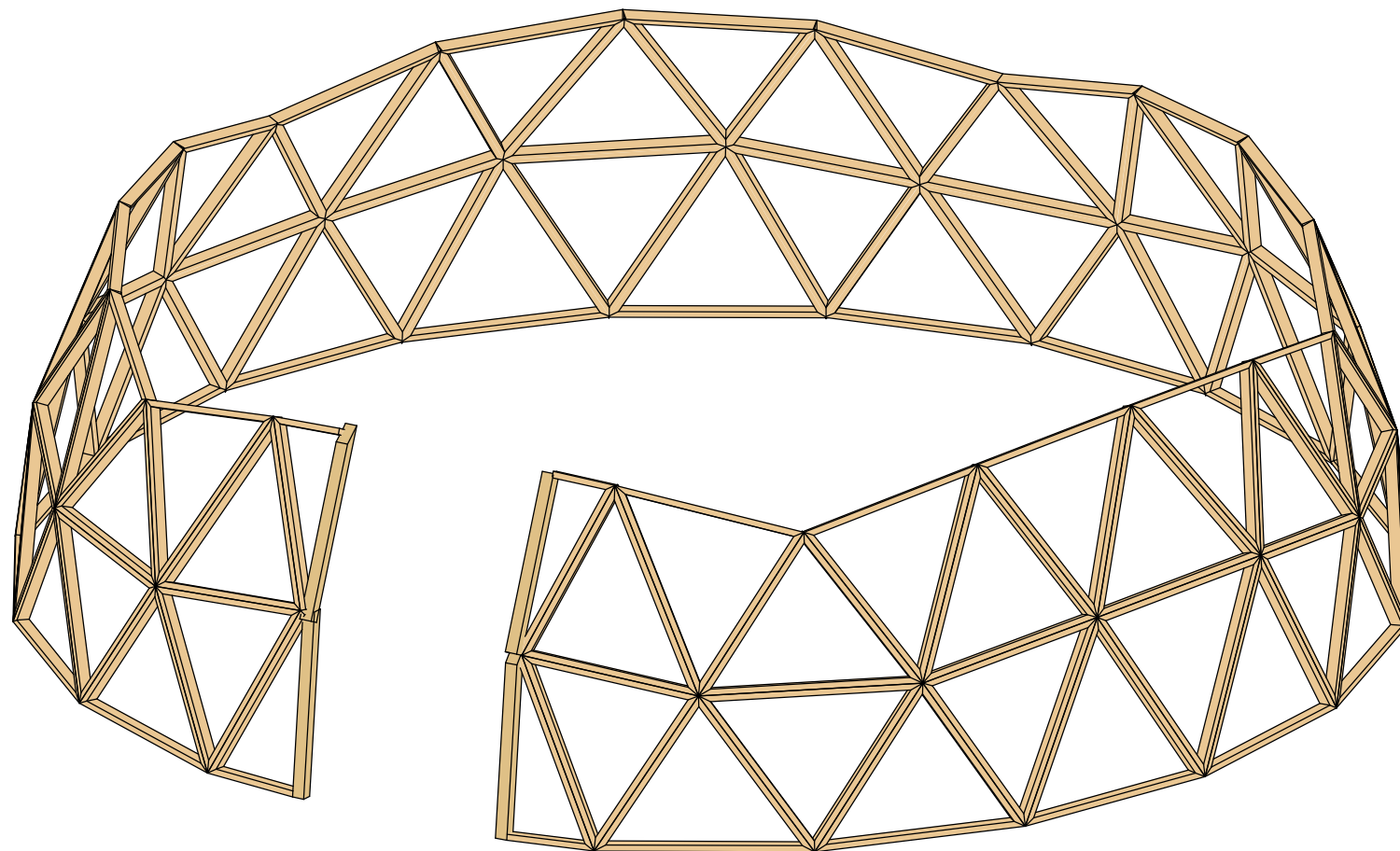
3 ALZADO DORSAL ESTRUCTURA
1:75



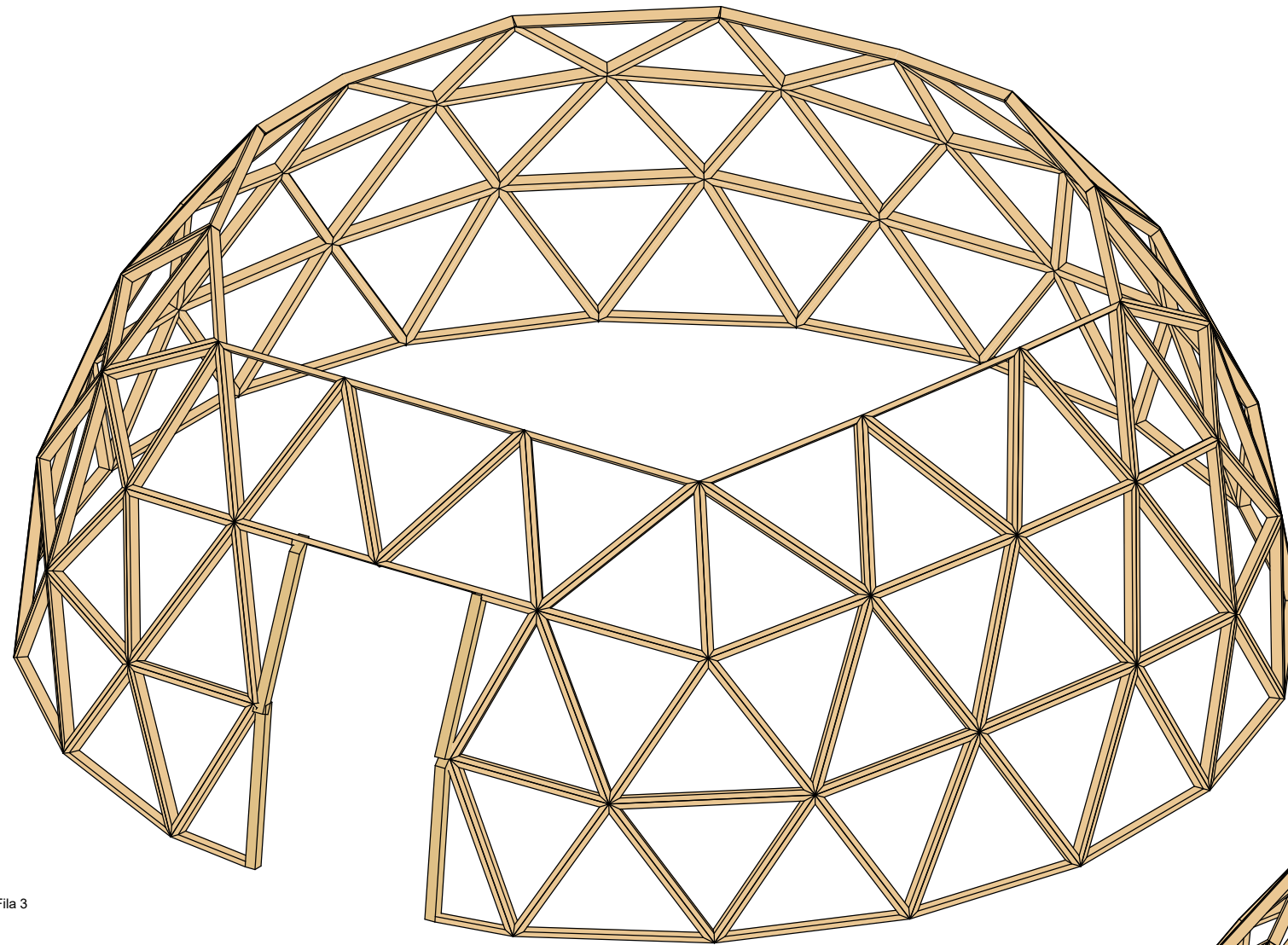
2 ALZADO LATERAL OESTE ESTRUCTURA
1:50



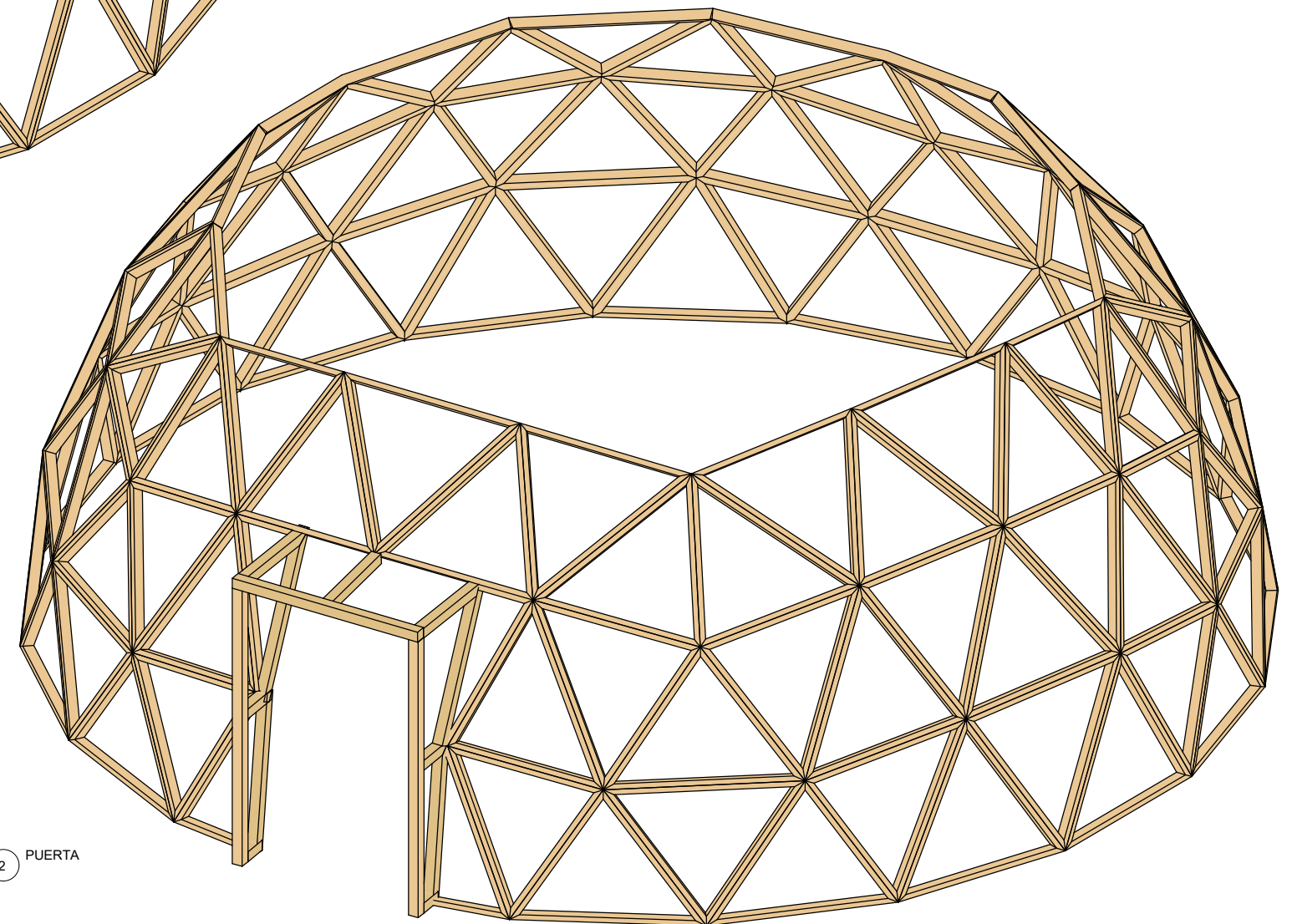
1 Fila 1



2 Fila 2



1 Fila 3



2 PUERTA



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS - UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

AUTOR DEL PROYECTO:
IVÁN FRANCISCO ESQUER ROCH

Iván Esquer

ESCALA A3:
S/E

UNIDADES:
METROS

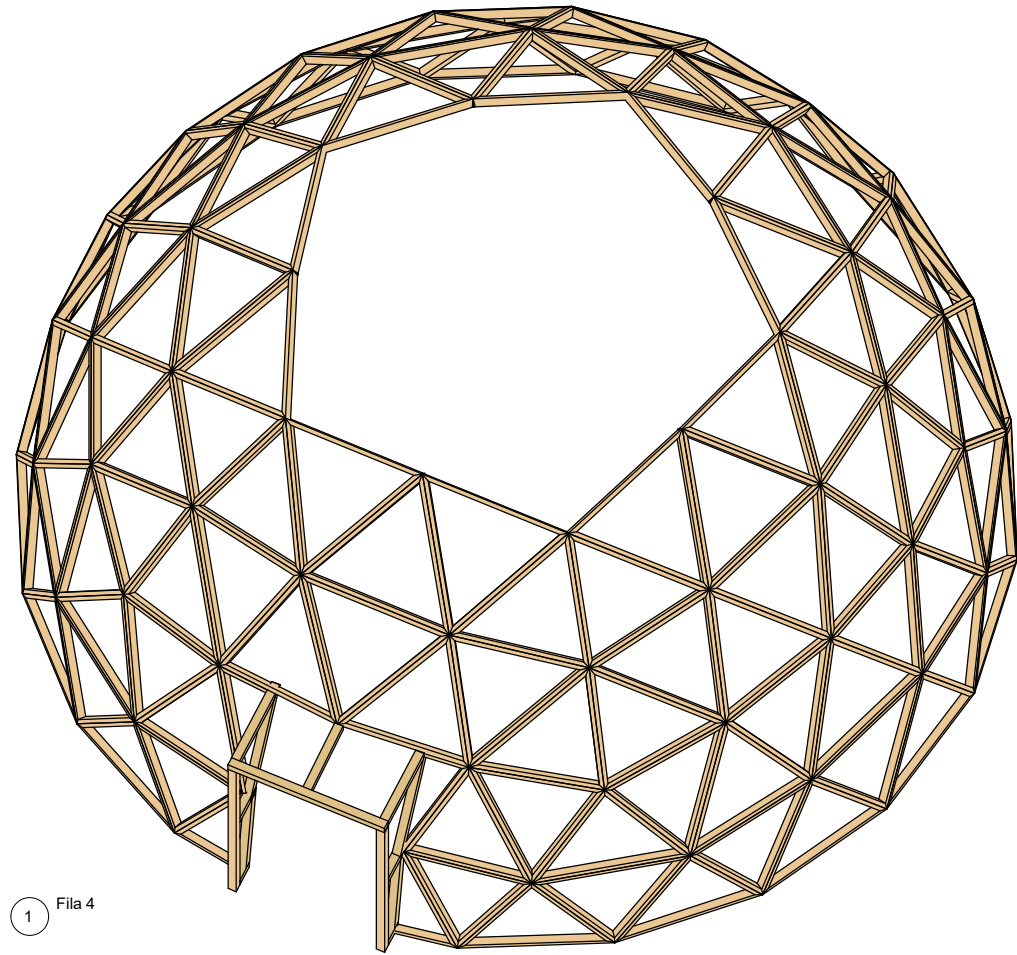
PROYECTO:
PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA
PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE
DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN
PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).

FECHA:
SEPT - 2022

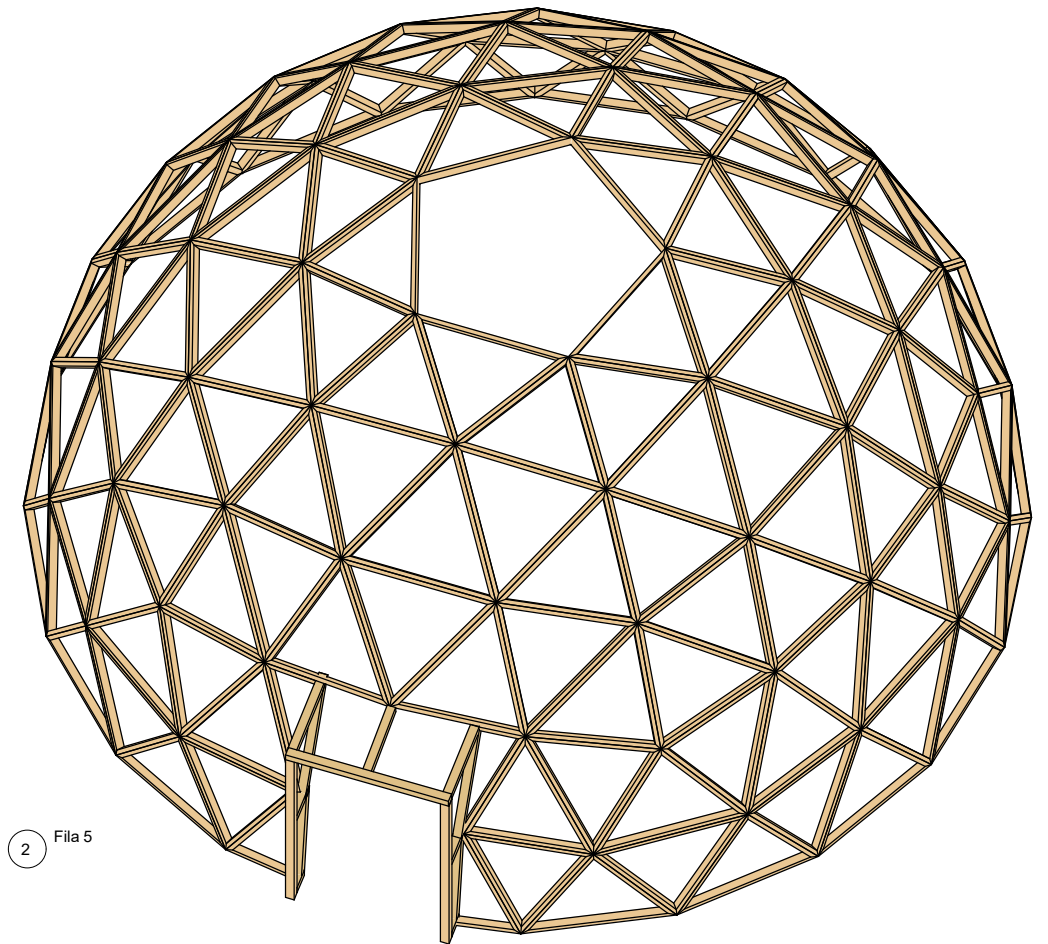
TÍTULO DEL PLANO:
DOMO 1 C1/V4/10M
MONTAJE ESTRUCTURA
PROCESO CONSTRUCTIVO

Nº DE PLANO:
01.03.01

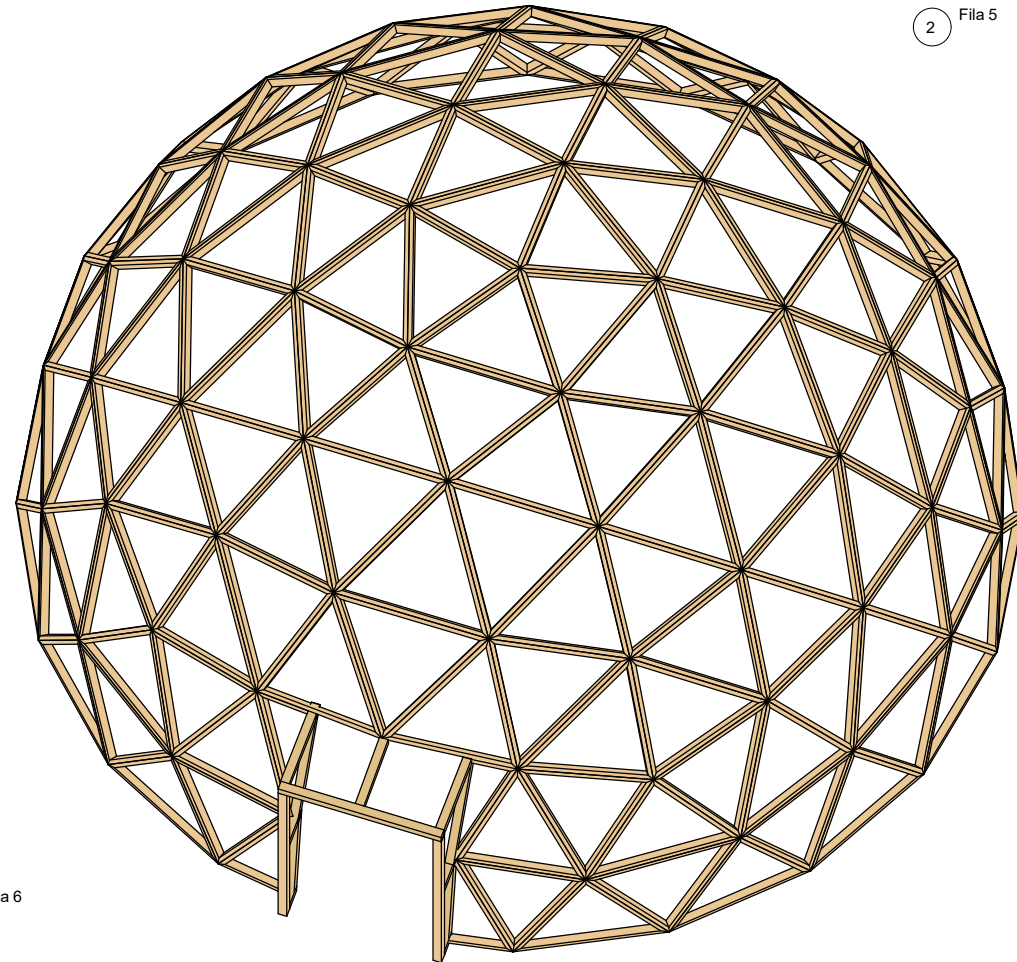
HOJA 2 DE 3



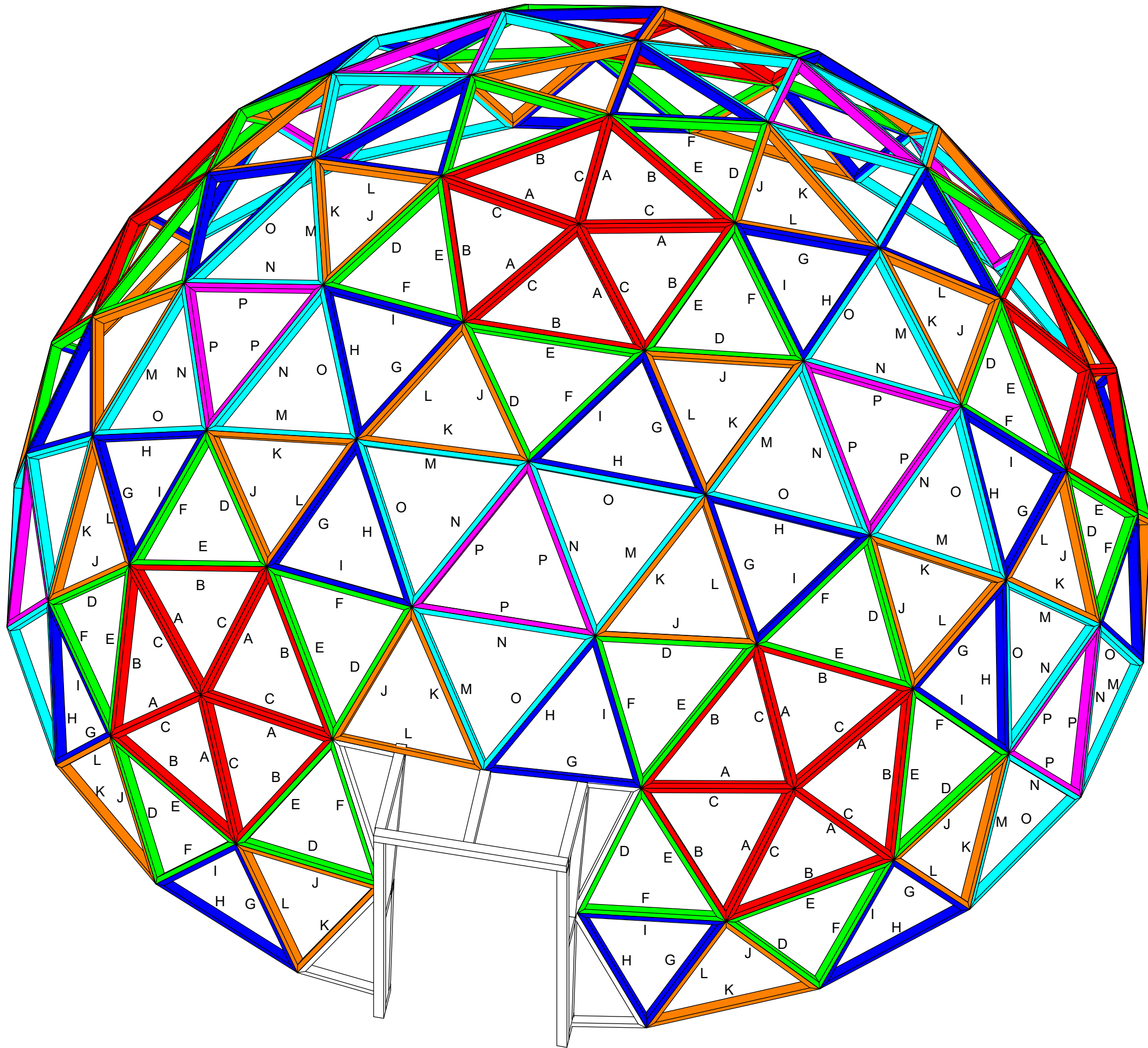
1 Fila 4



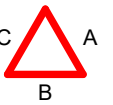
2 Fila 5



3 Fila 6



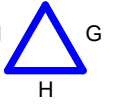
TRIÁNGULO Nº 1



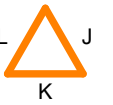
TRIÁNGULO Nº 2



TRIÁNGULO Nº 3



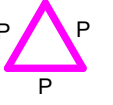
TRIÁNGULO Nº4

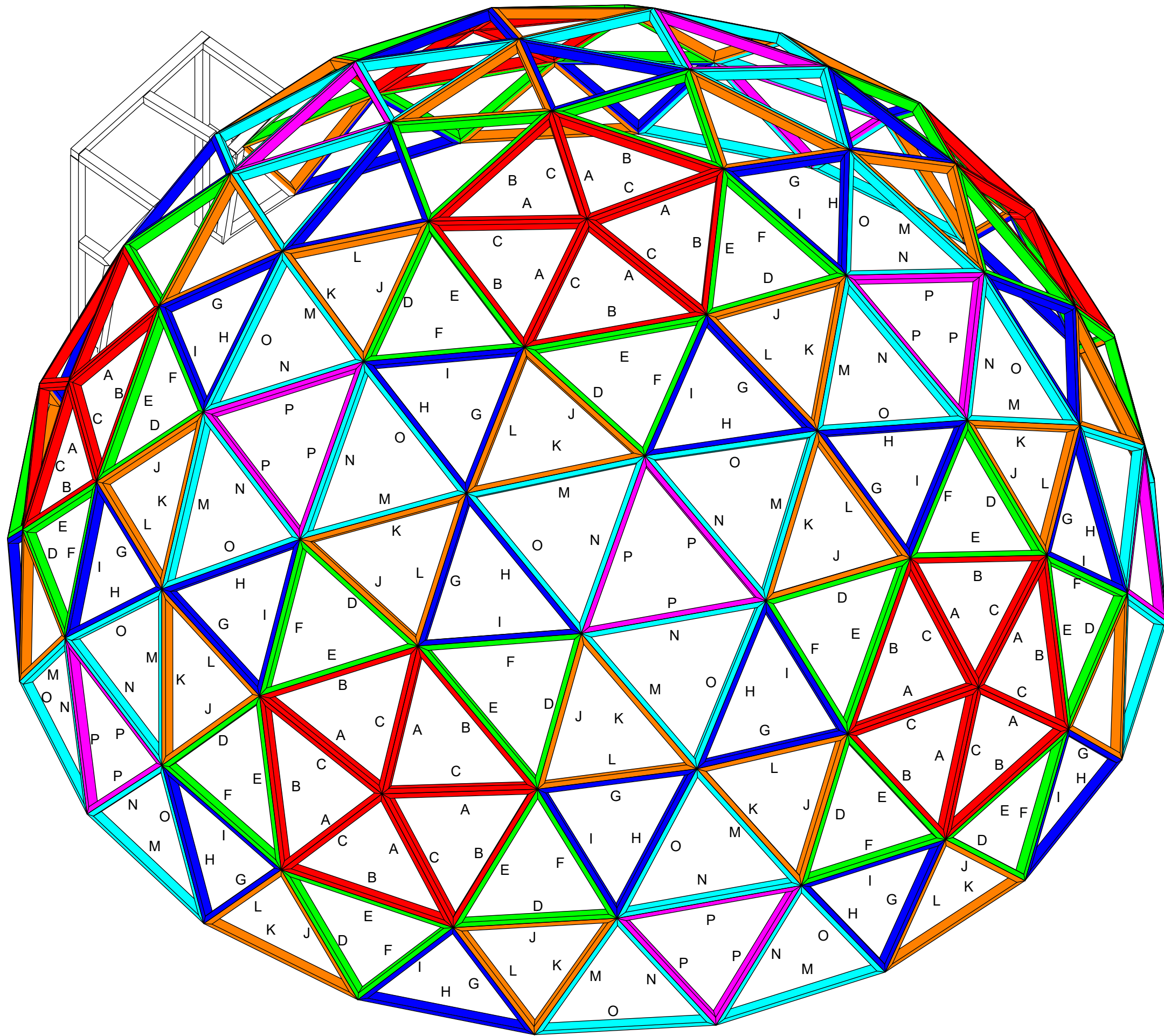


TRIÁNGULO Nº5

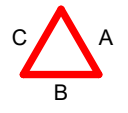


TRIÁNGULO Nº6

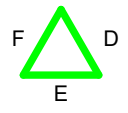




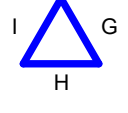
TRIÁNGULO Nº 1



TRIÁNGULO Nº 2



TRIÁNGULO Nº 3



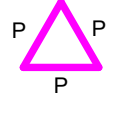
TRIÁNGULO Nº4

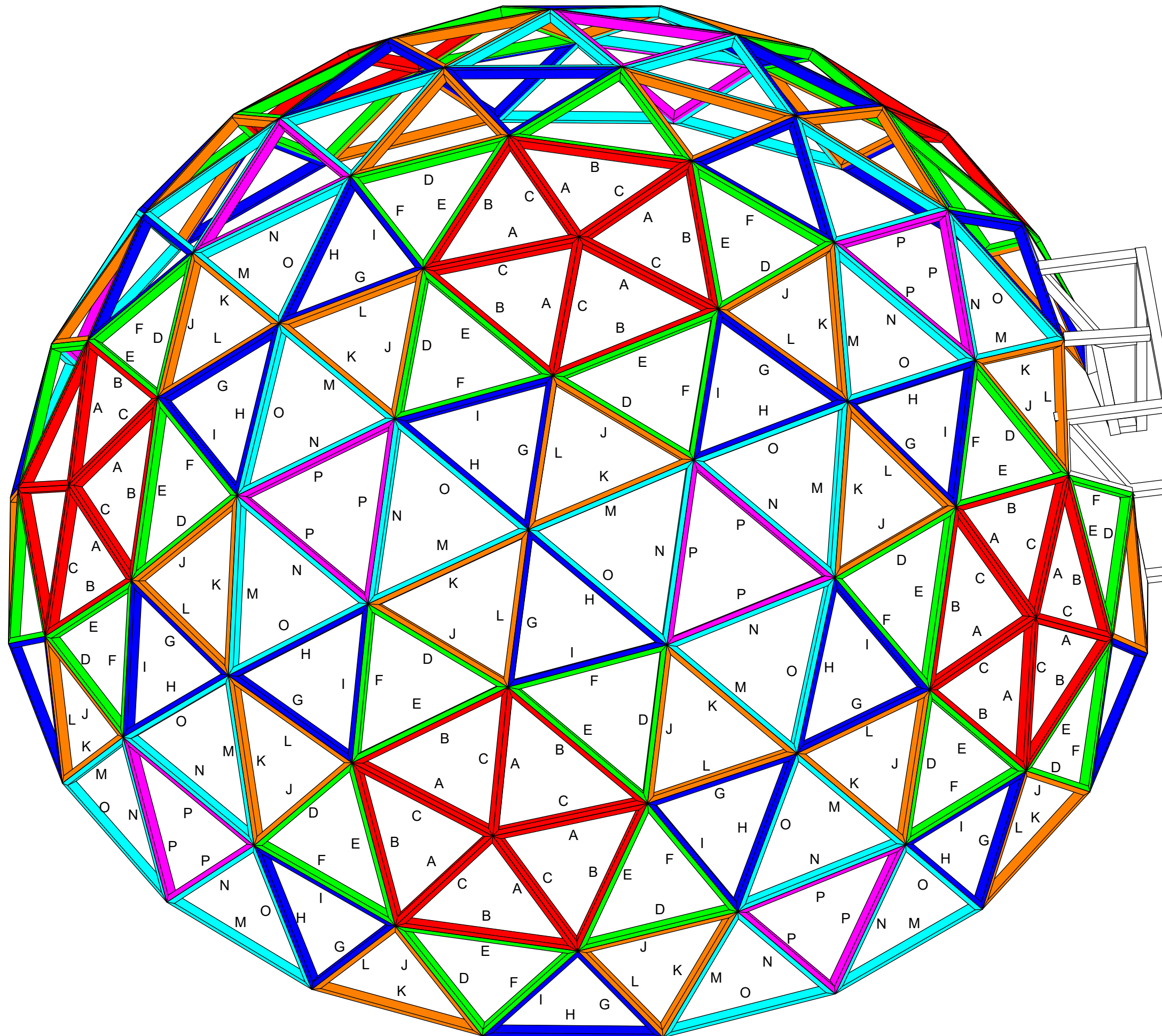


TRIÁNGULO Nº5

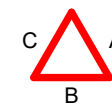


TRIÁNGULO Nº6

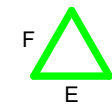




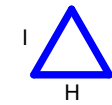
TRIÁNGULO Nº 1



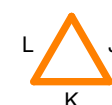
TRIÁNGULO Nº 2



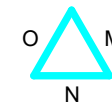
TRIÁNGULO Nº 3



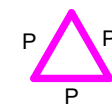
TRIÁNGULO Nº4

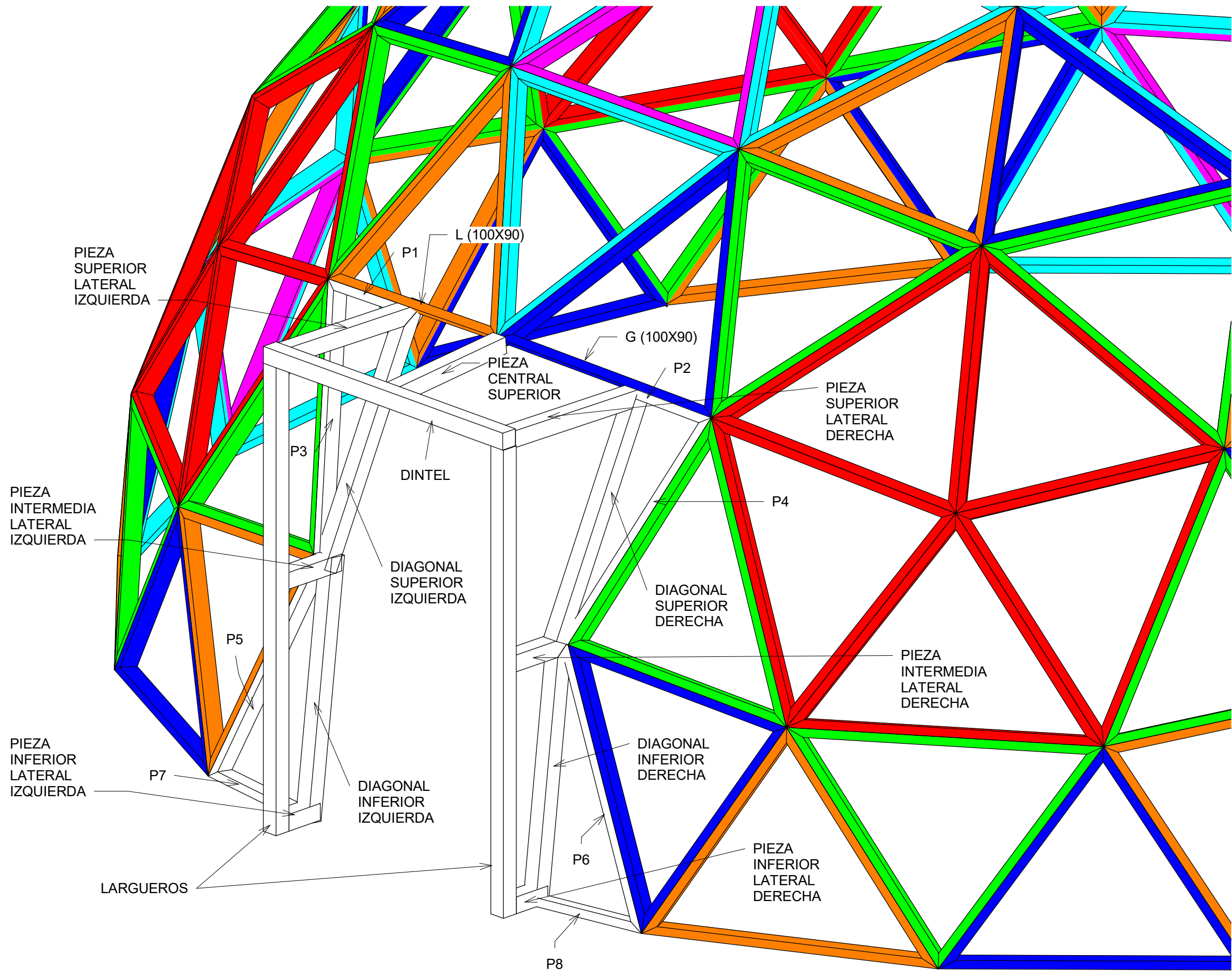


TRIÁNGULO Nº5

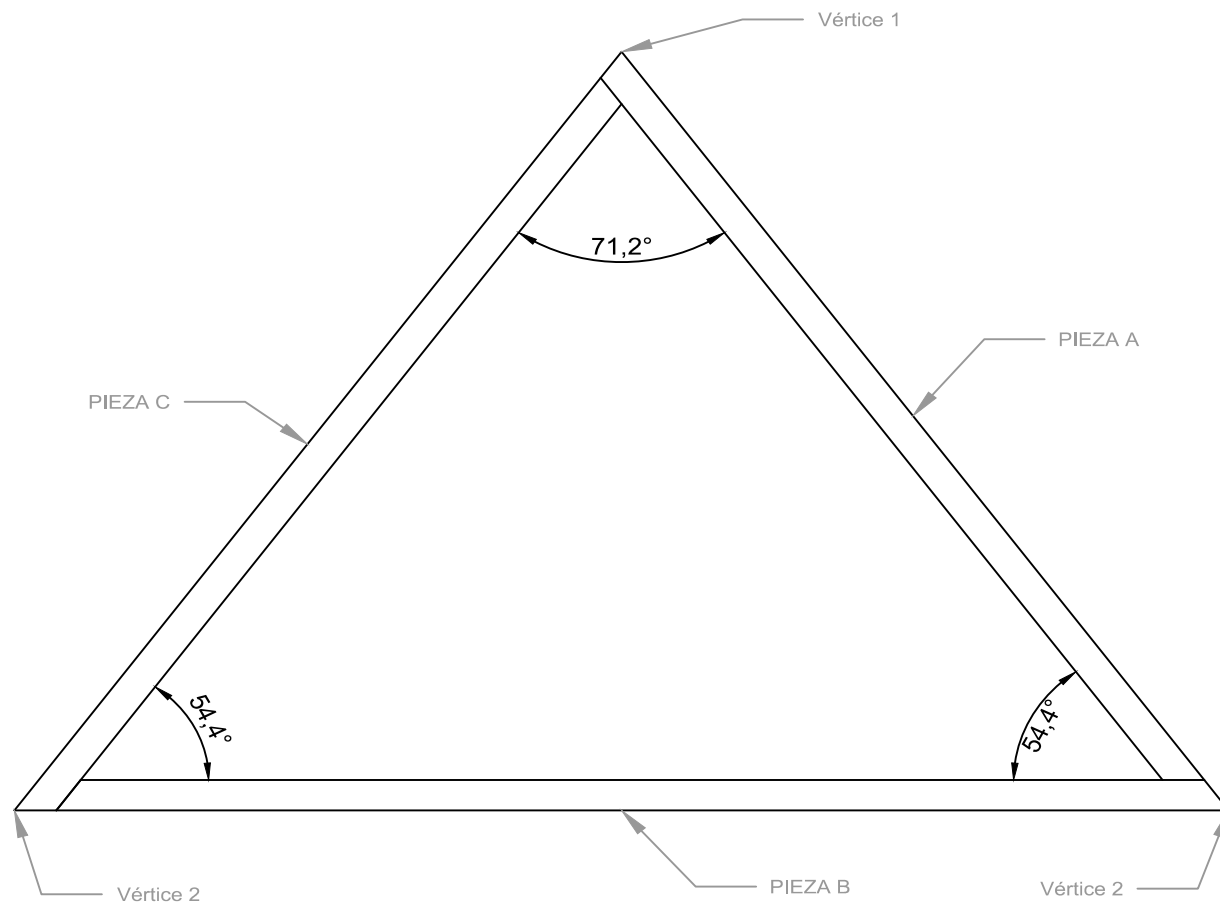


TRIÁNGULO Nº6

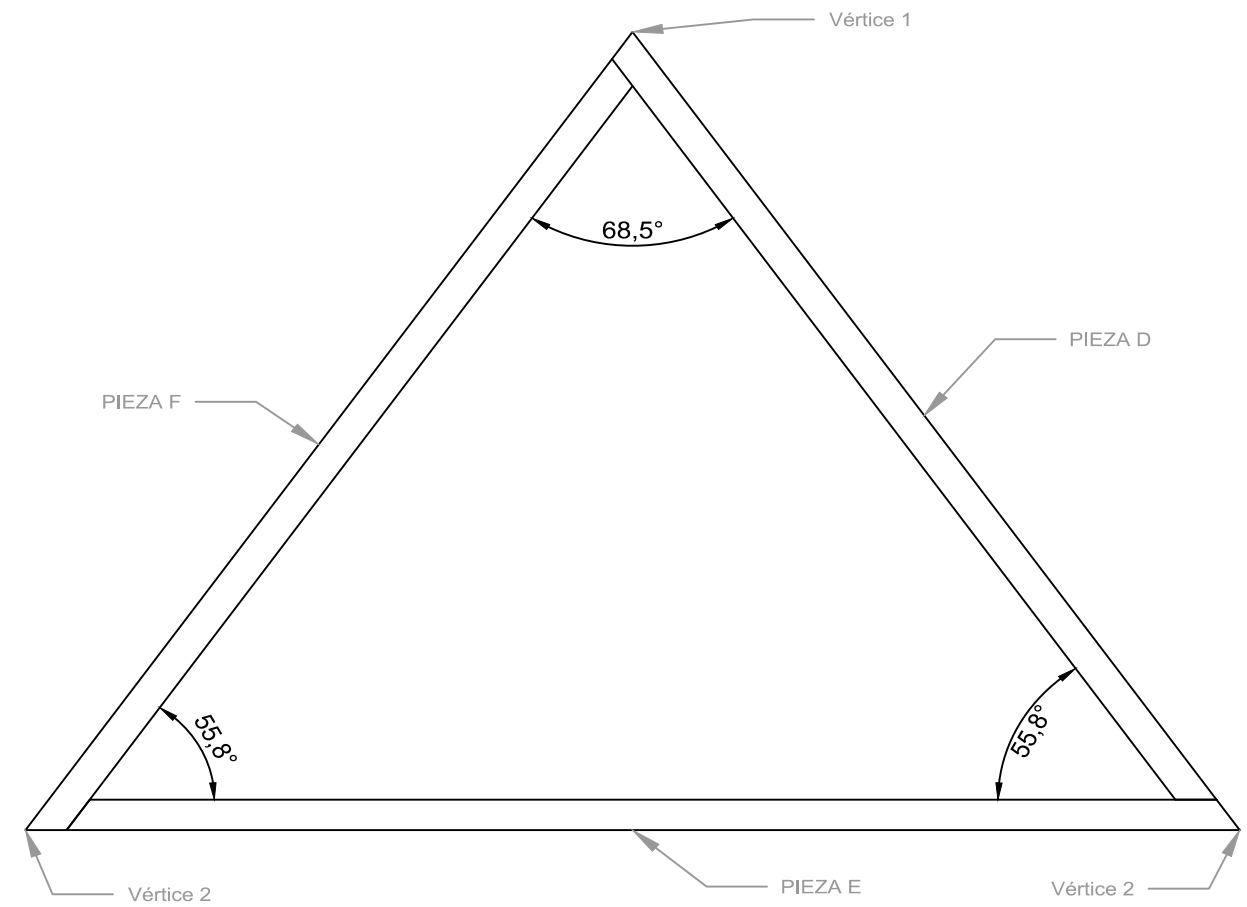




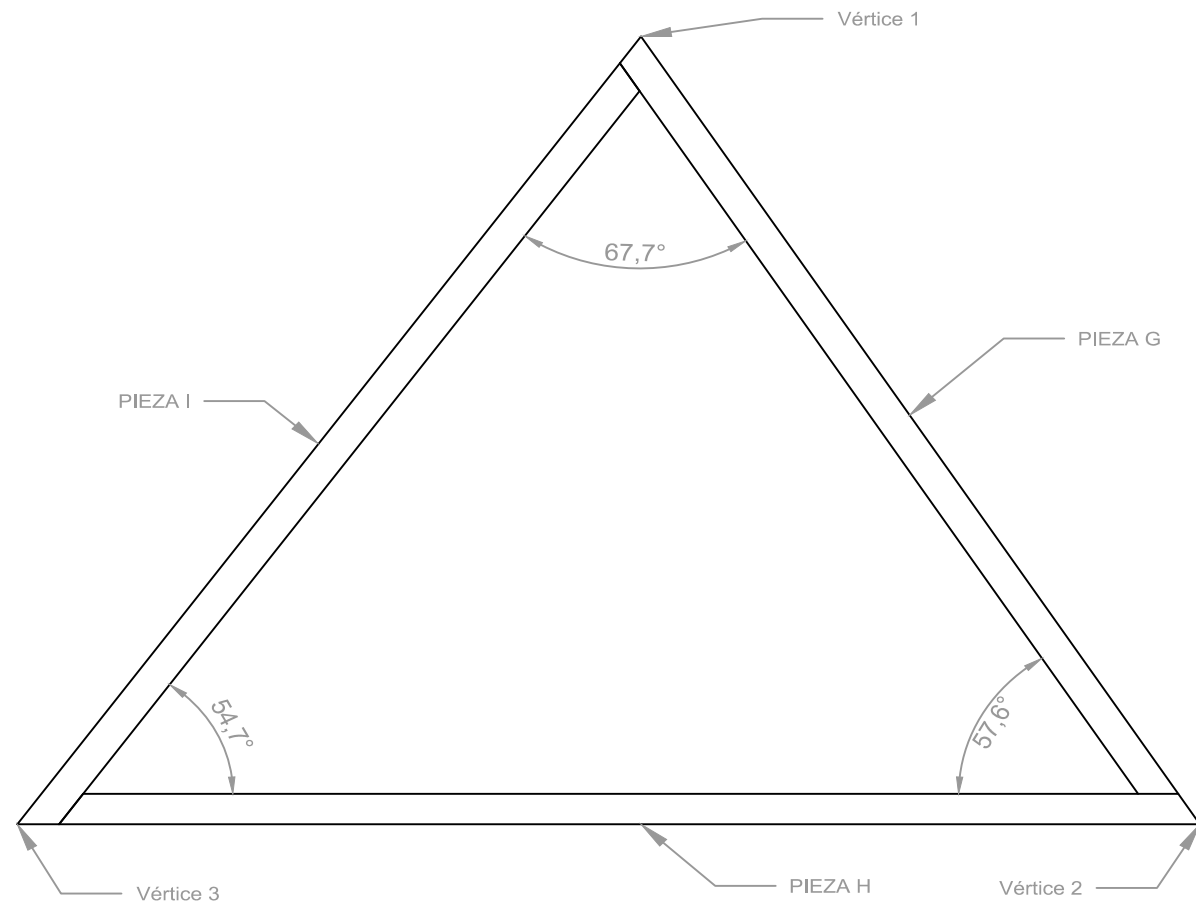
TRIÁNGULO Nº1
30 PIEZAS



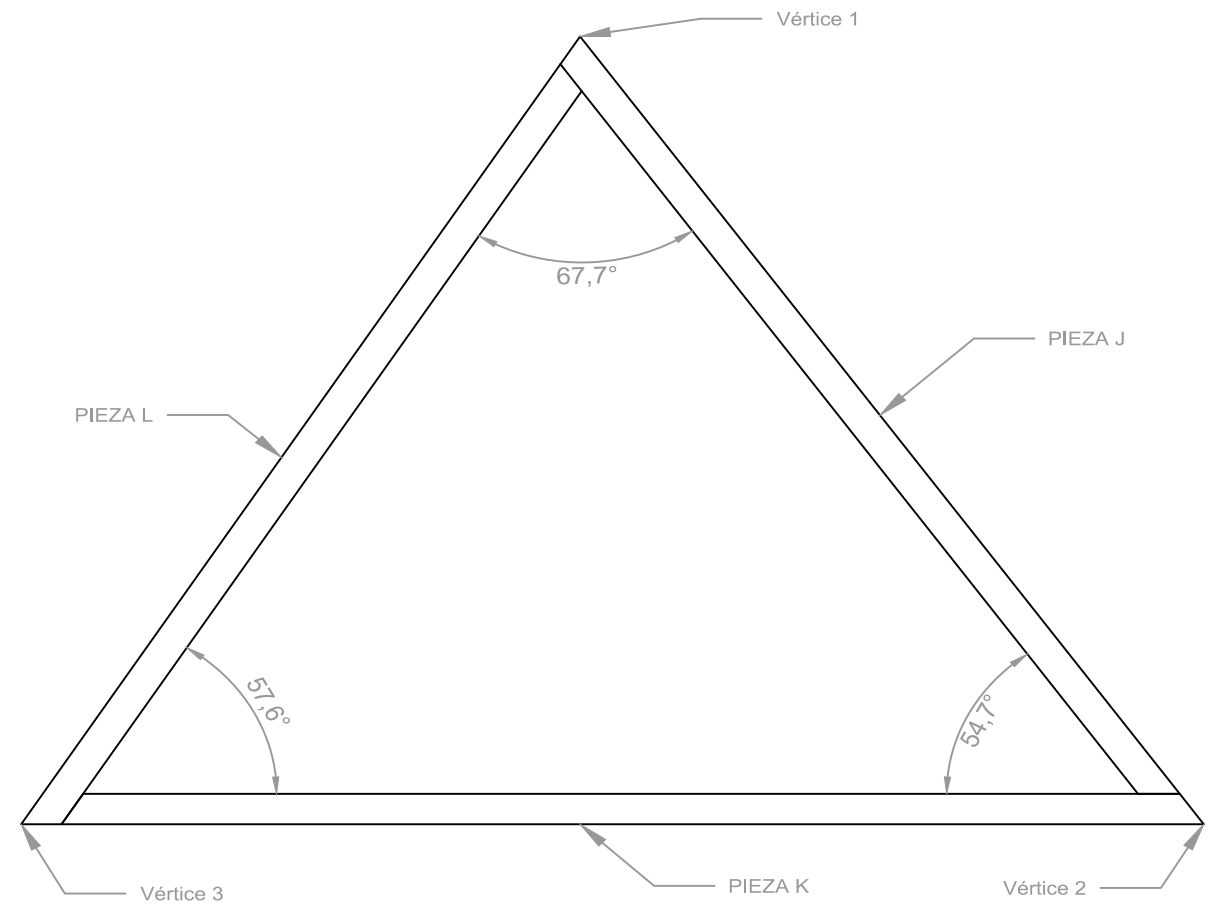
TRIÁNGULO Nº2
30 PIEZAS



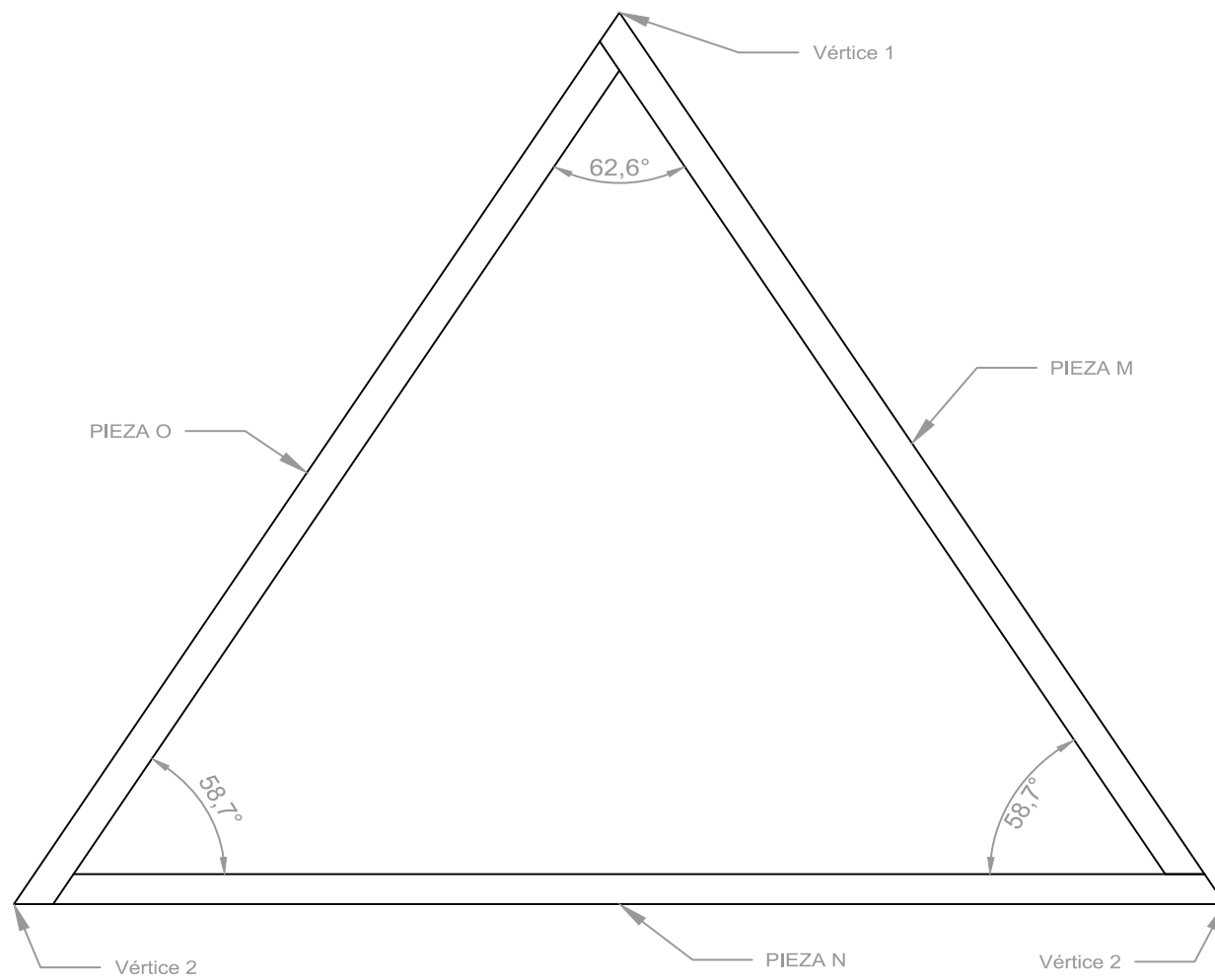
TRIÁNGULO N°3
29 PIEZAS



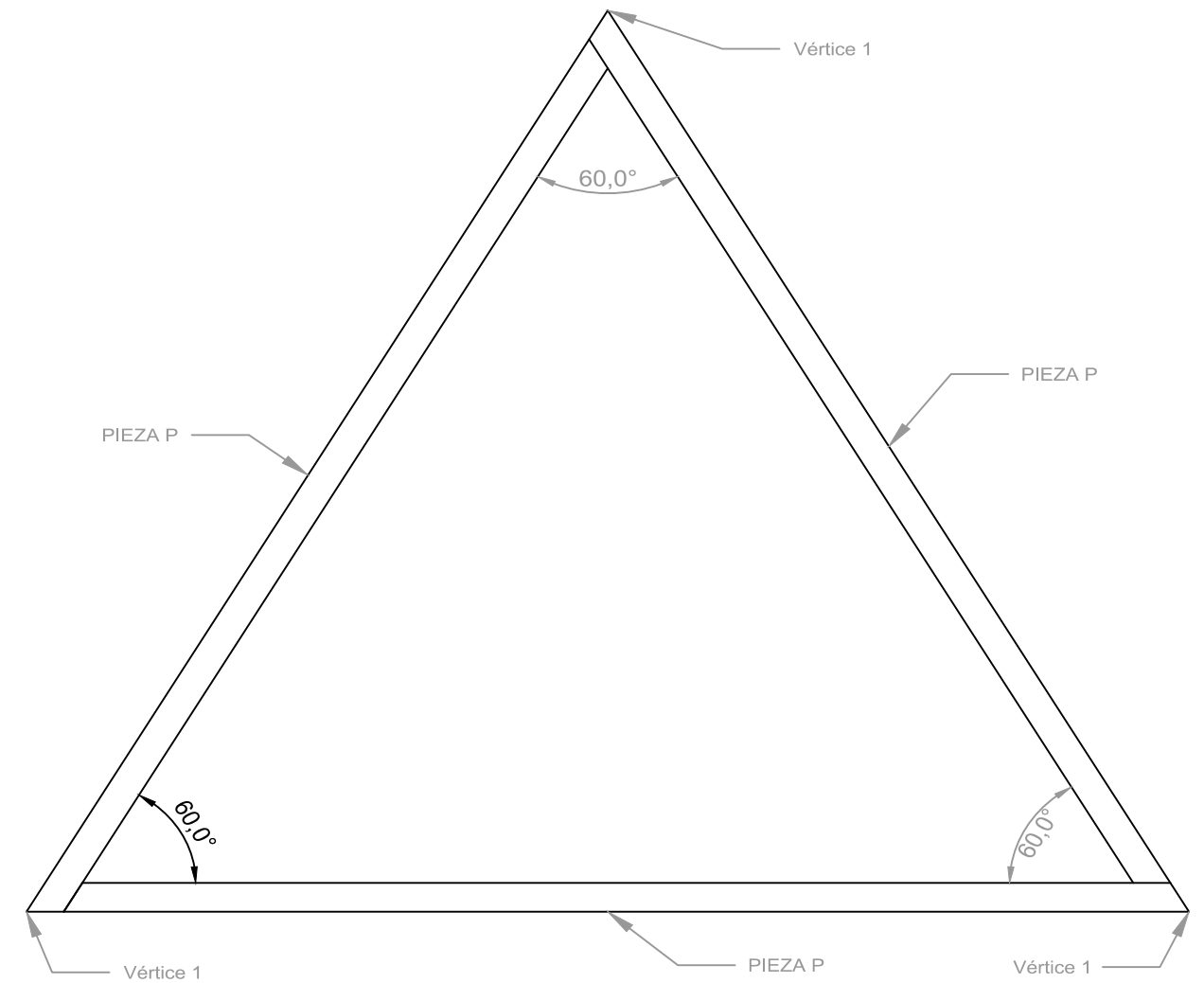
TRIÁNGULO N°4
29 PIEZAS



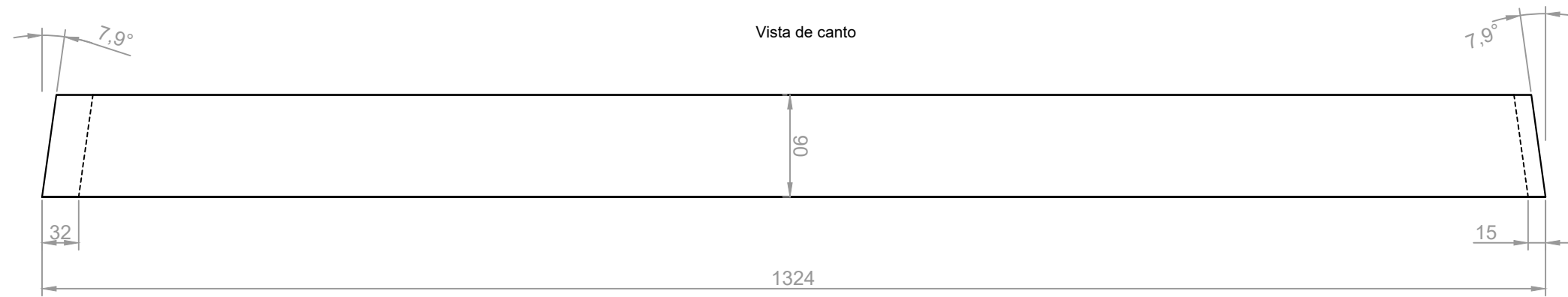
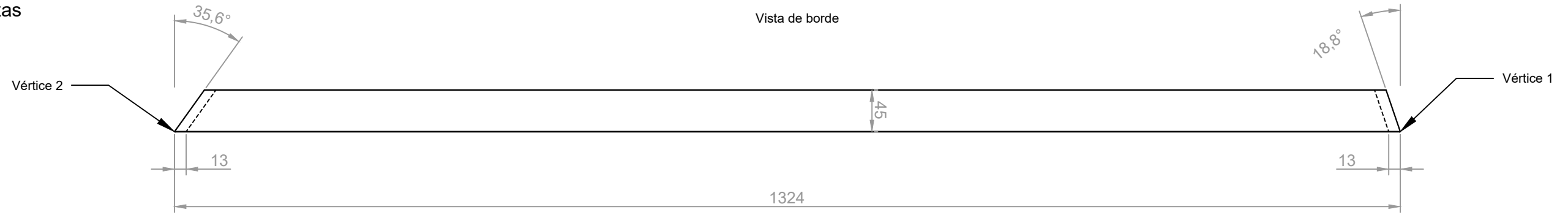
TRIÁNGULO N°5
27 PIEZAS



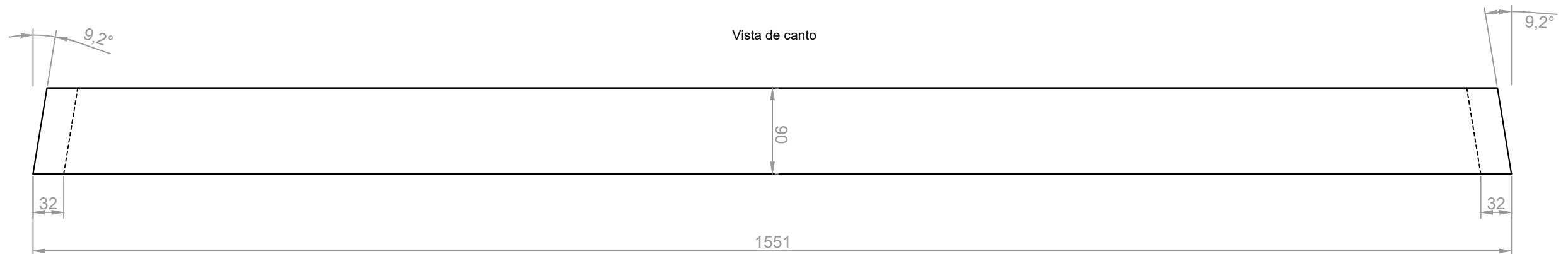
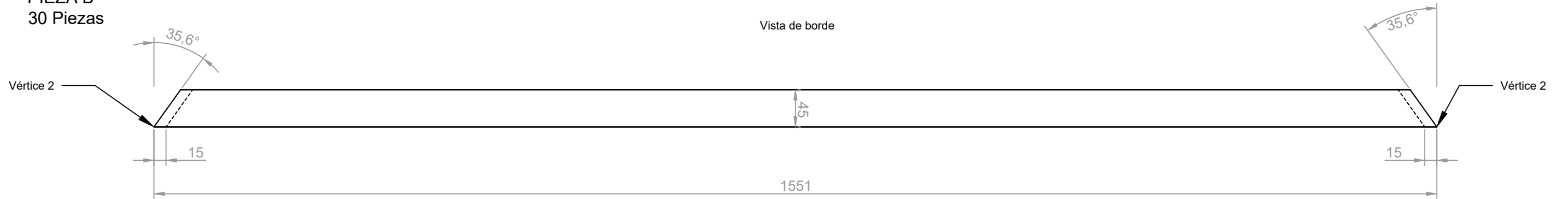
TRIÁNGULO N°6
9 PIEZAS



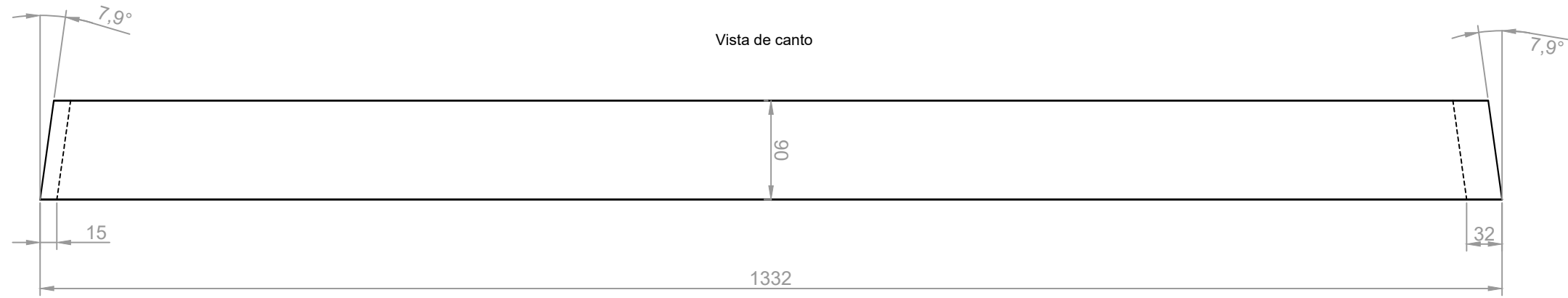
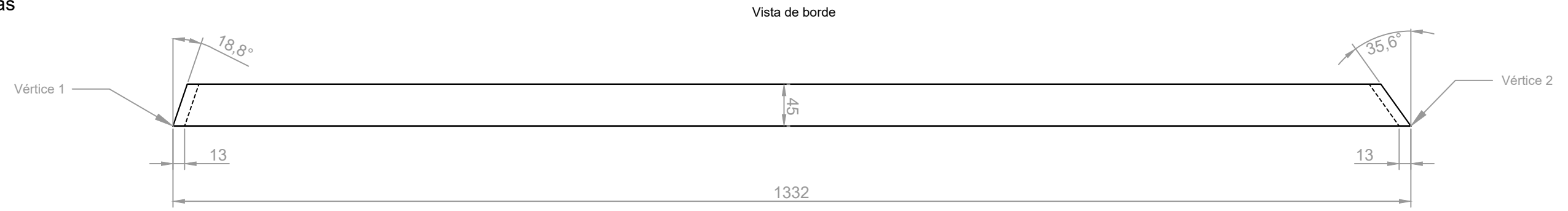
PIEZA A
30 Piezas



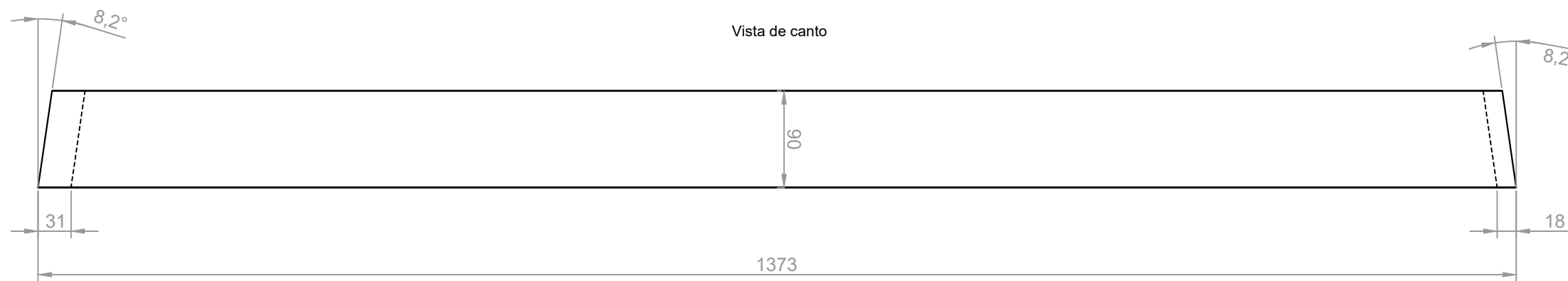
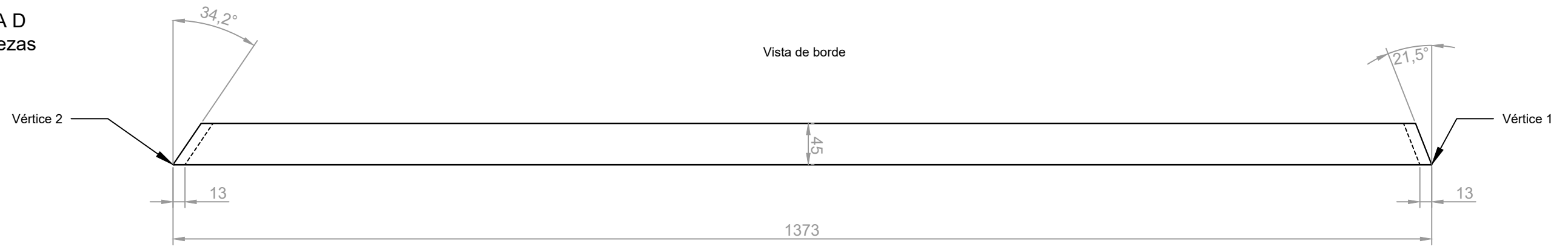
PIEZA B
30 Piezas



PIEZA C
30 Piezas

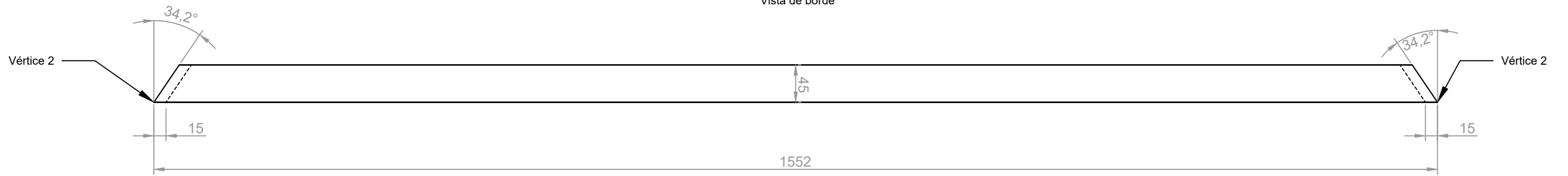


PIEZA D
30 Piezas

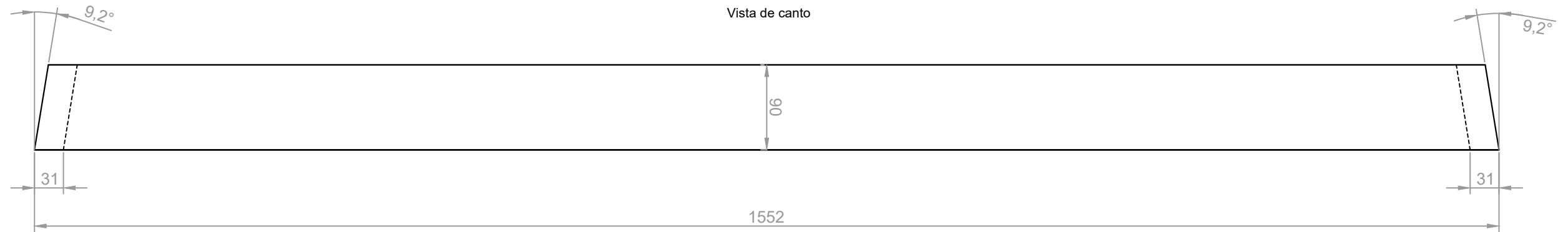


PIEZA E
30 Piezas

Vista de borde

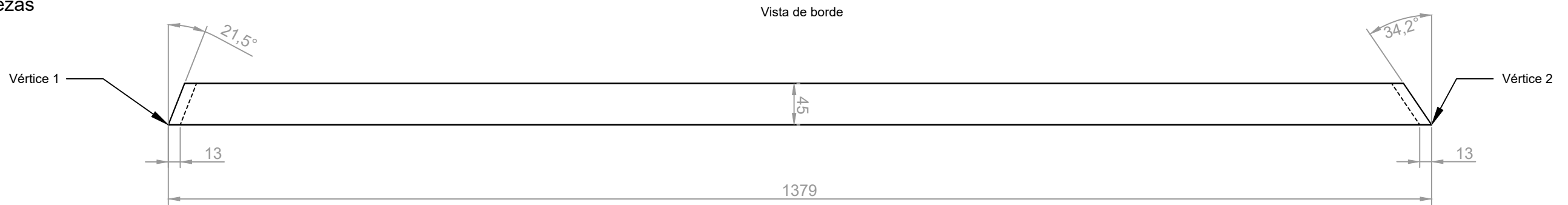


Vista de canto

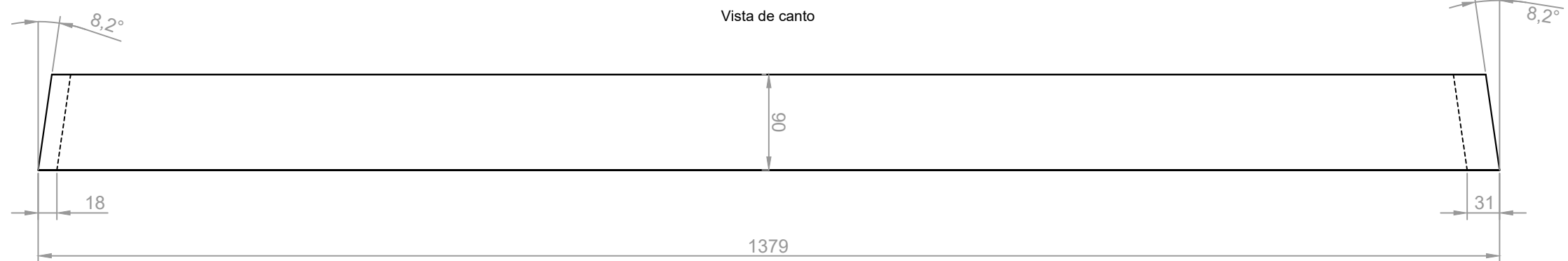


PIEZA F
30 Piezas

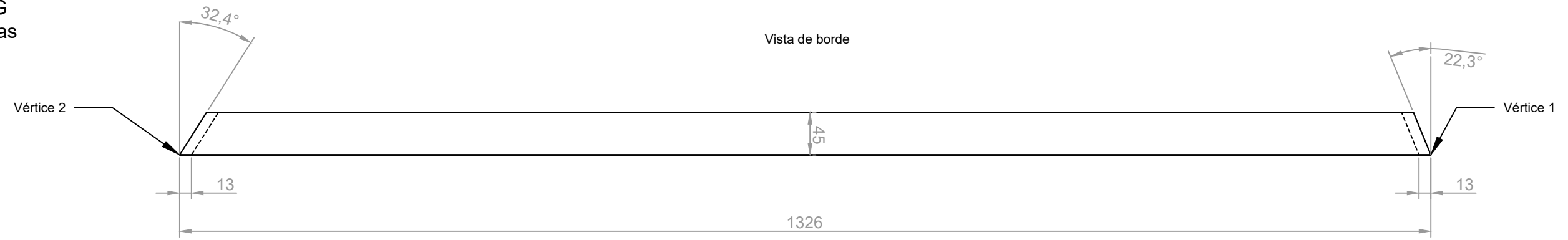
Vista de borde



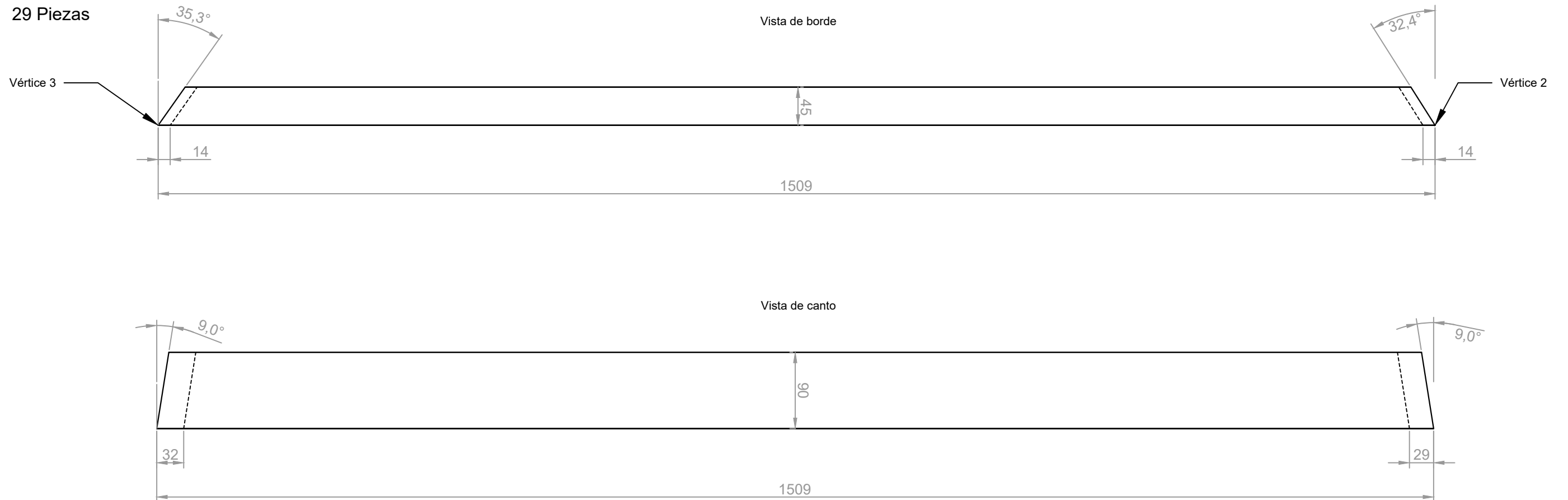
Vista de canto



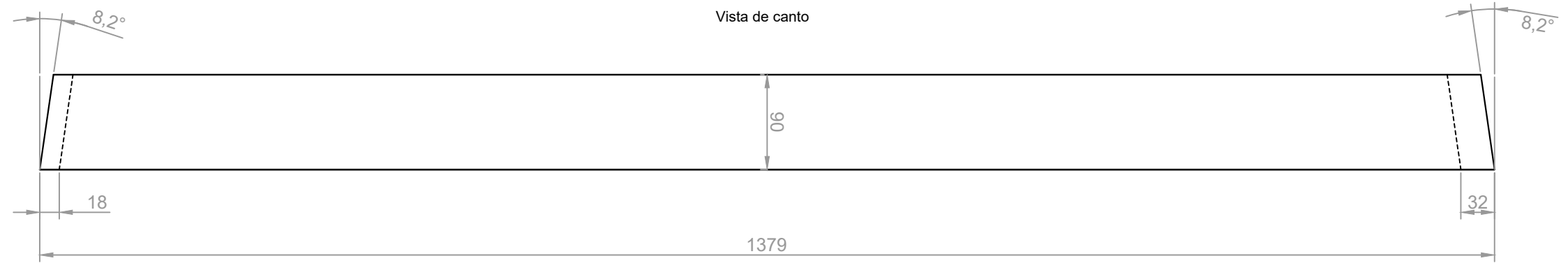
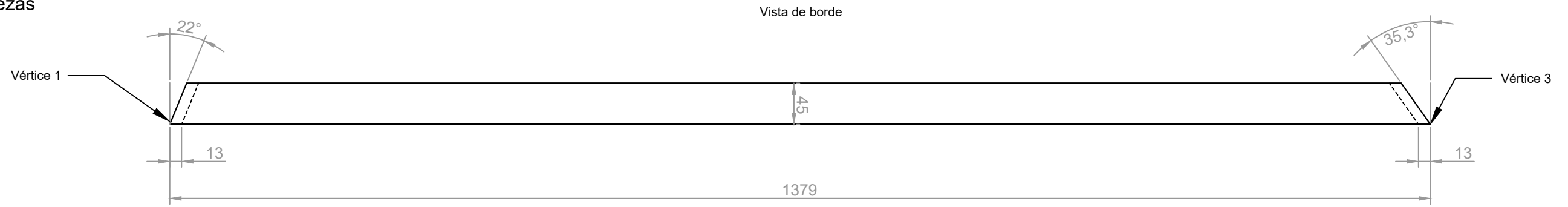
PIEZA G
29 Piezas



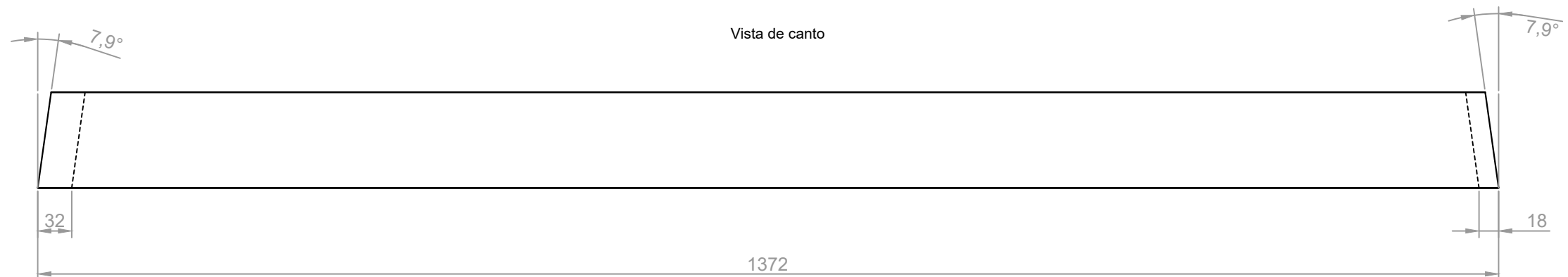
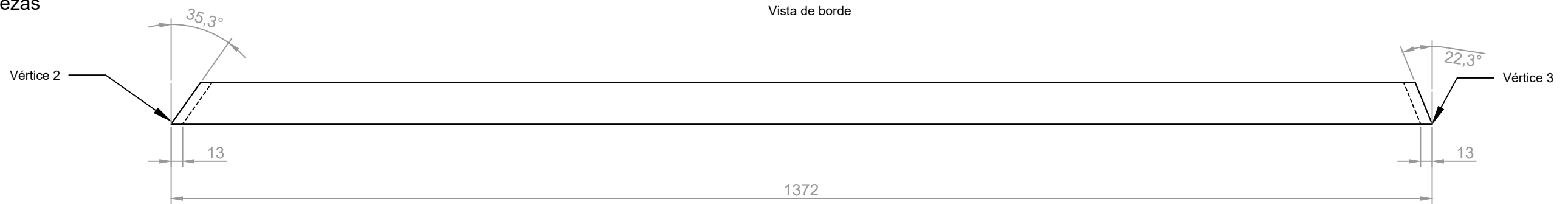
PIEZA H
29 Piezas



PIEZA I
29 Piezas

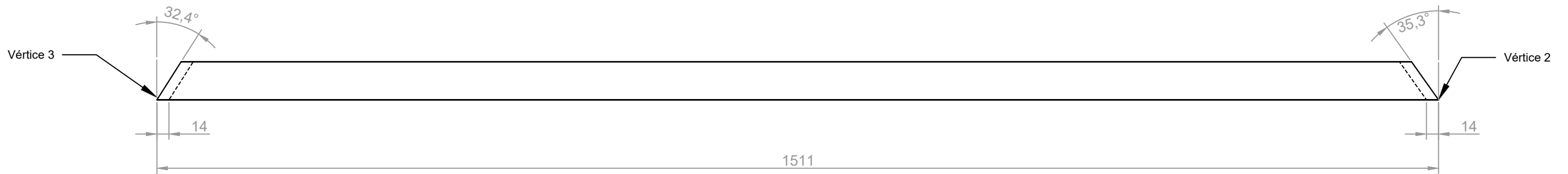


PIEZA J
29 Piezas

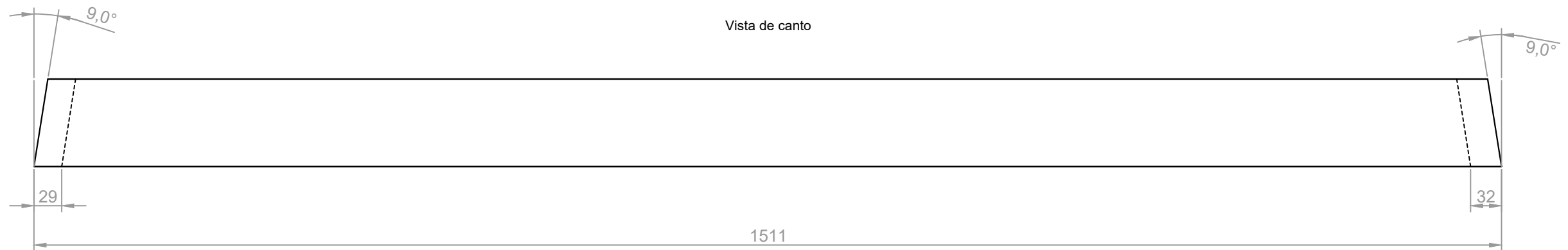


PIEZA K
29 Piezas

Vista de borde

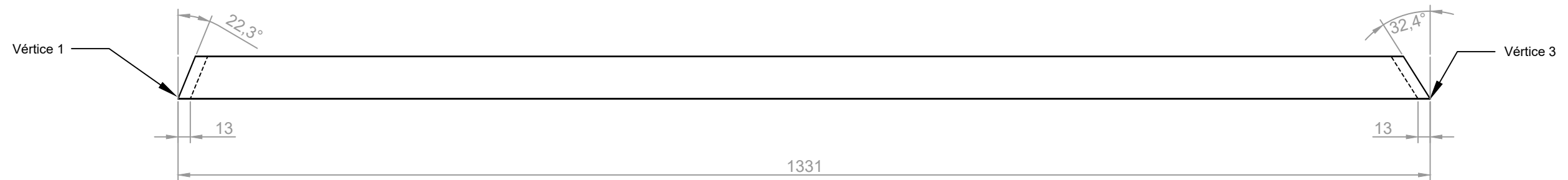


Vista de canto

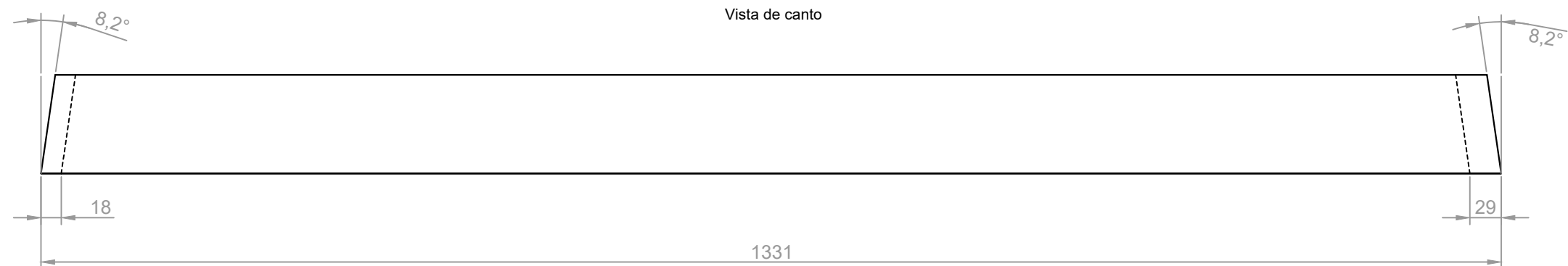


PIEZA L
29 Piezas

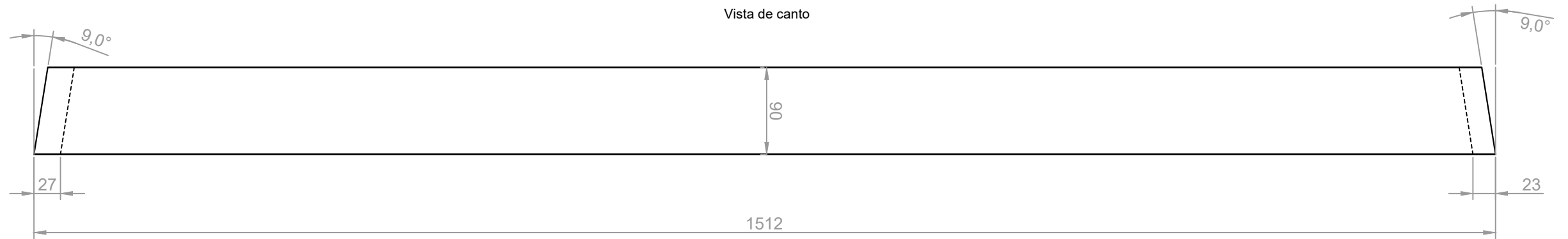
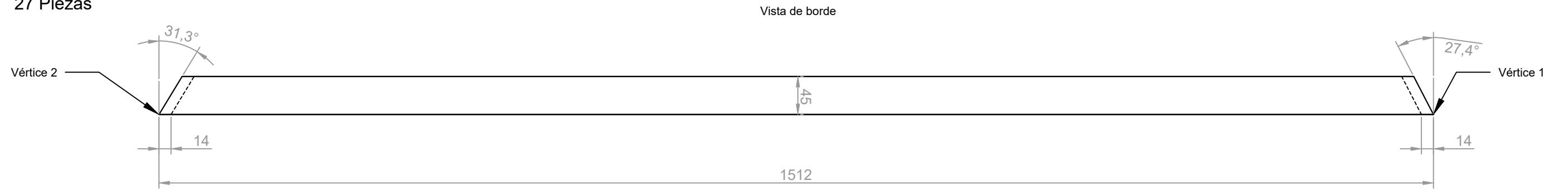
Vista de borde



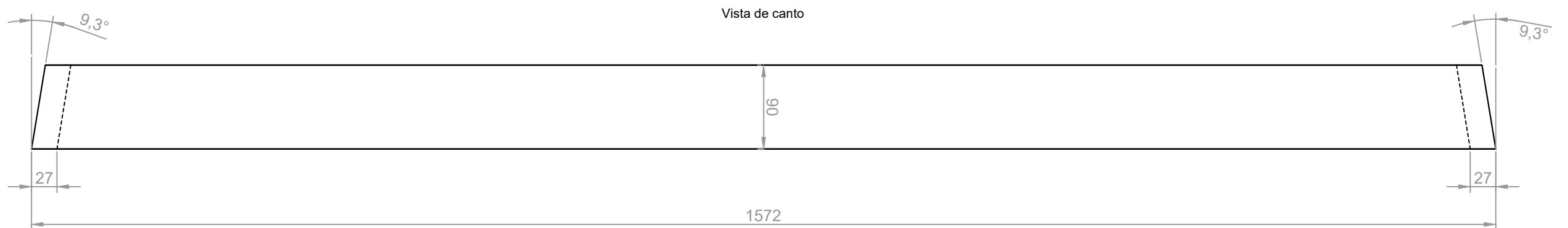
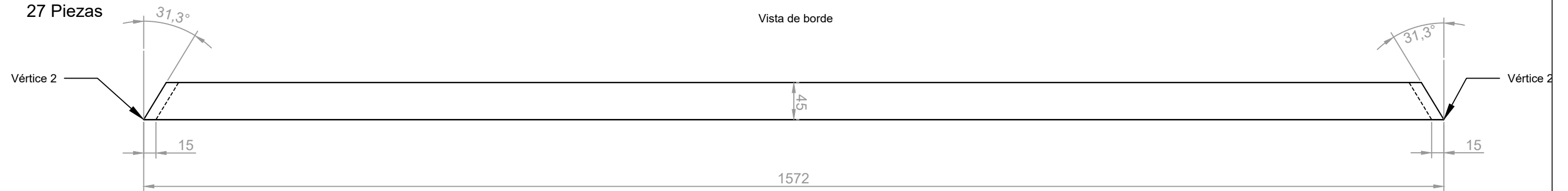
Vista de canto



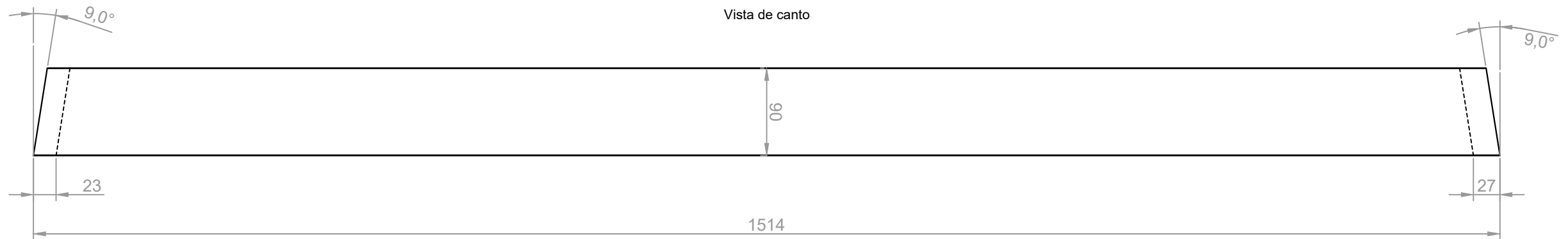
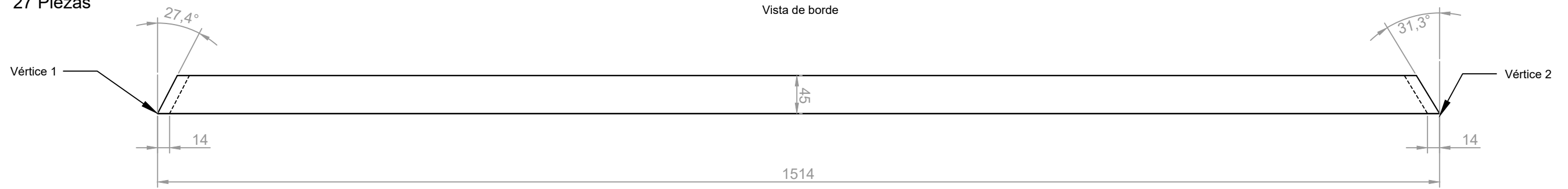
PIEZA M
27 Piezas



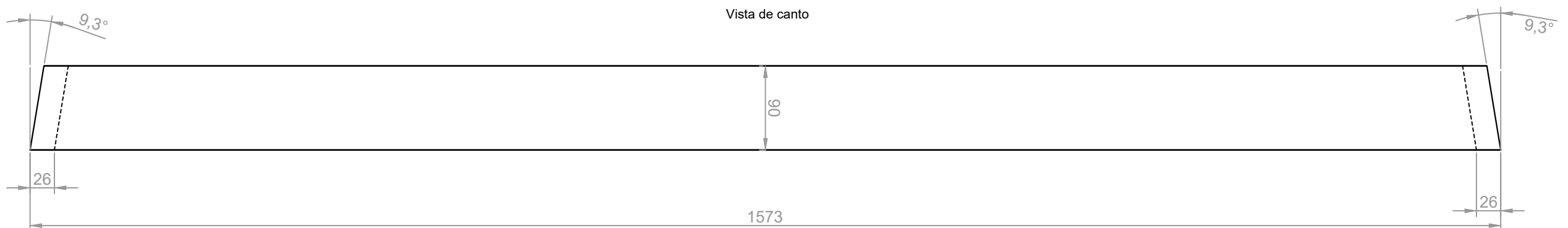
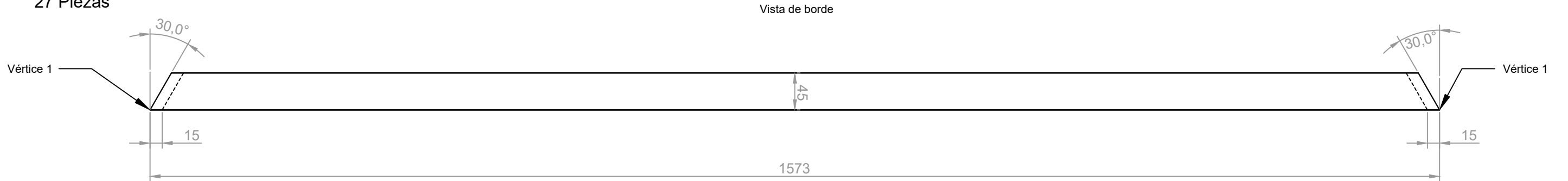
PIEZA N
27 Piezas



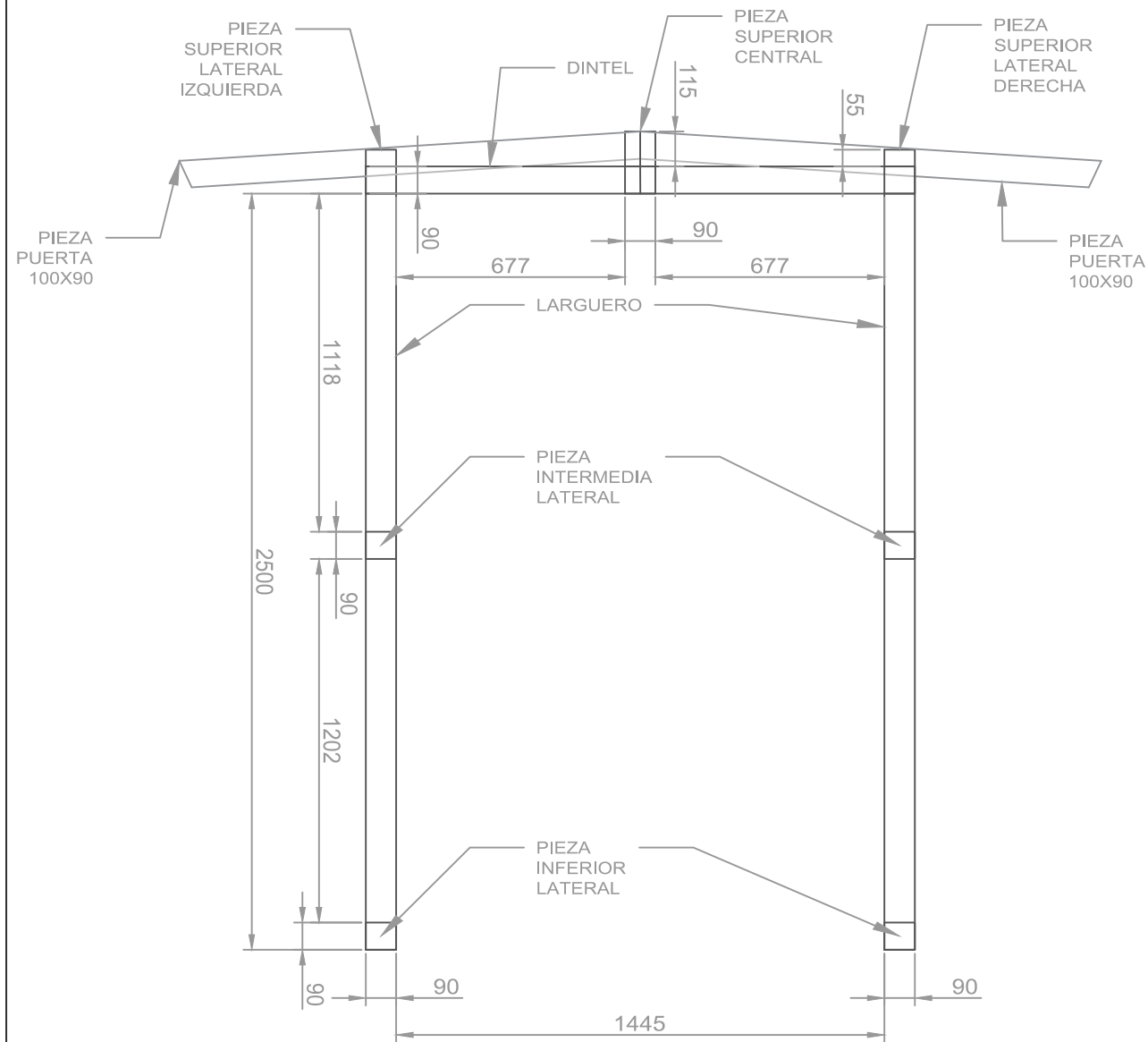
PIEZA O
27 Piezas



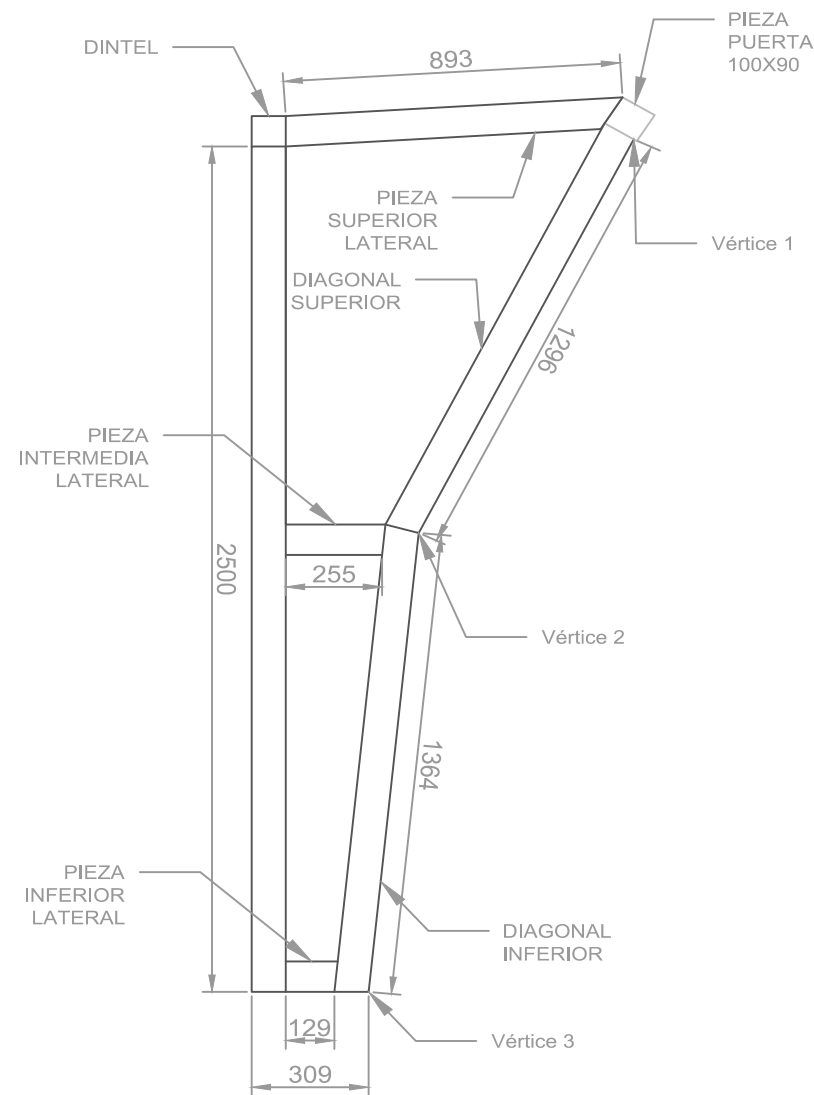
PIEZA P
27 Piezas



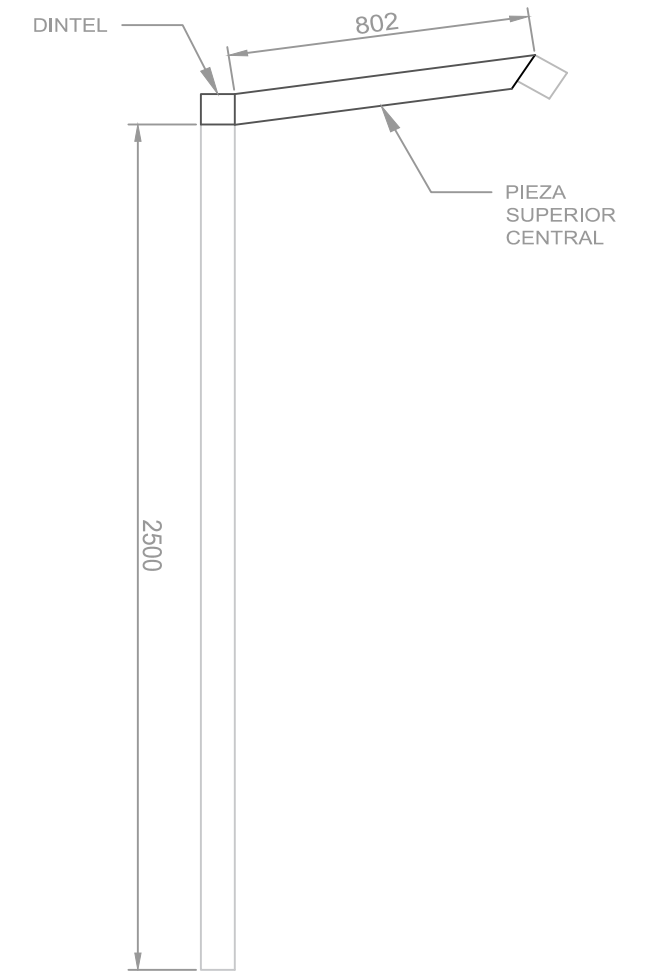
VISTA ALZADO :
PÓRTICO PUERTA



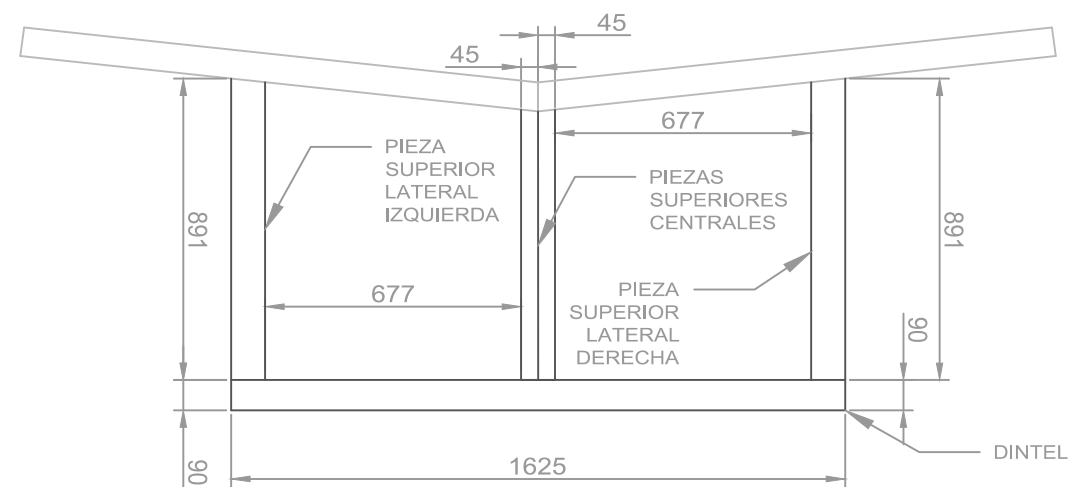
VISTA SECCIÓN
LATERAL



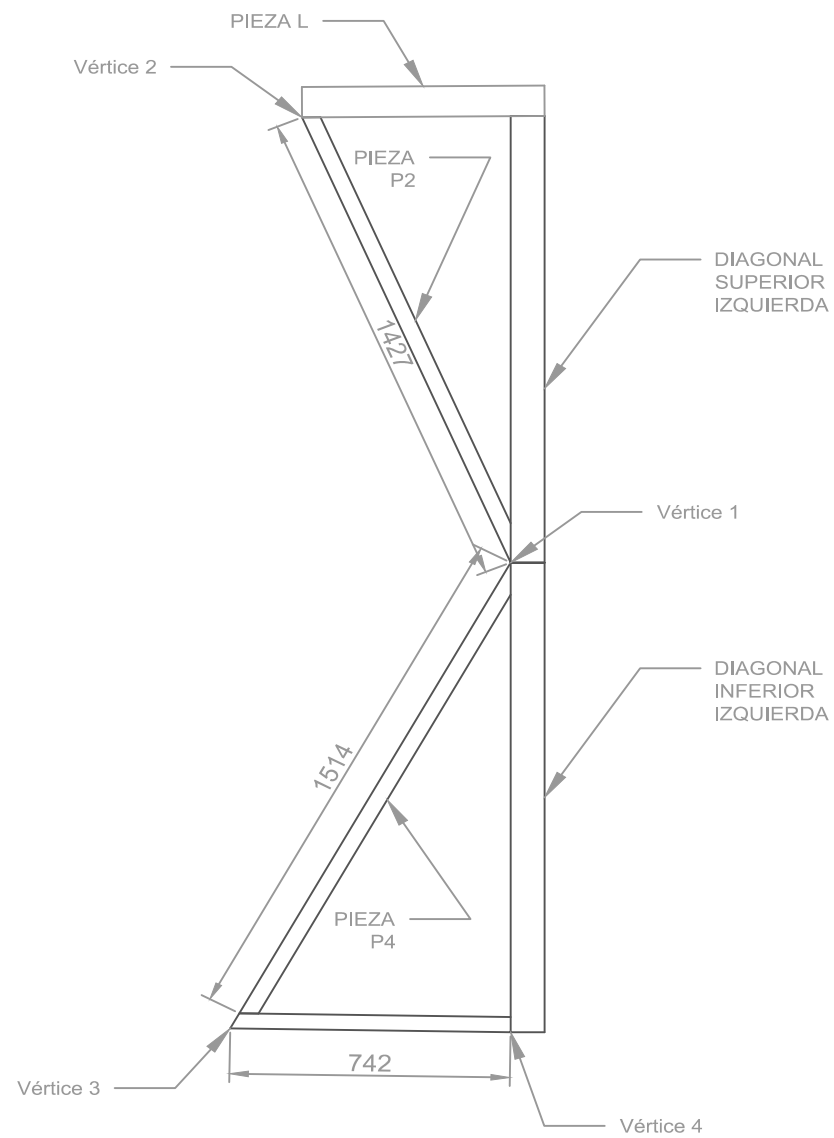
VISTA SECCIÓN
CENTRAL



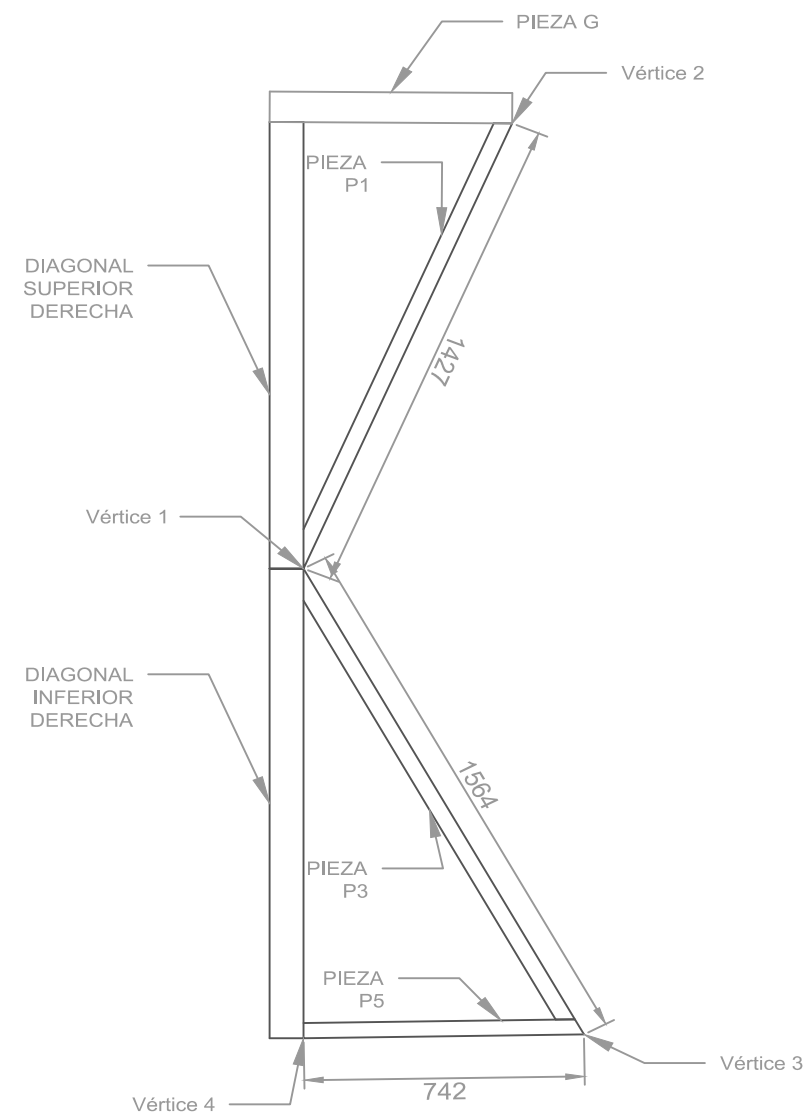
VISTA EN PLANTA



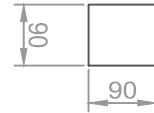
TRIÁNGULOS LATERALES
PARTE IZQUIERDA



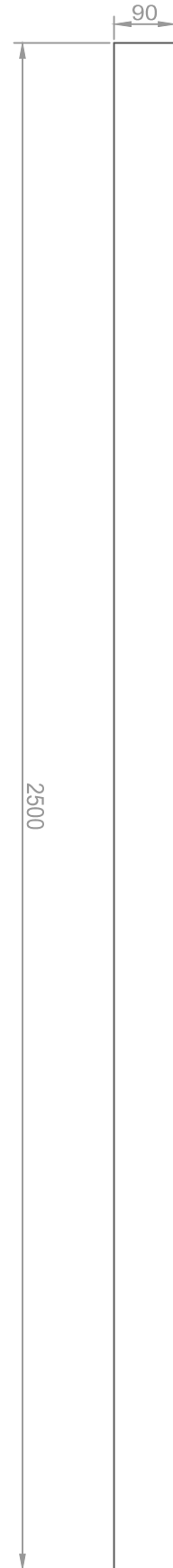
TRIÁNGULOS LATERALES
PARTE DERECHA



Vista en planta



Vista en alzado

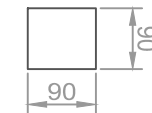


DINTEL

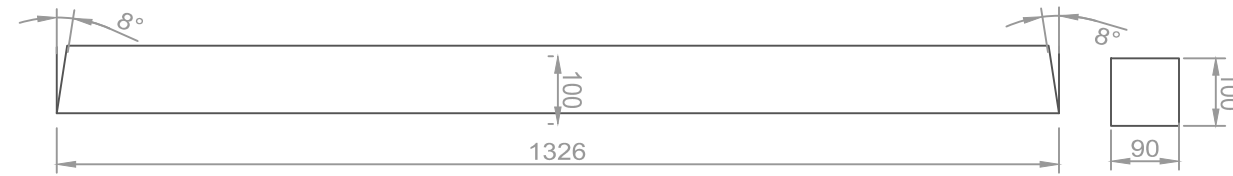
Vista en alzado



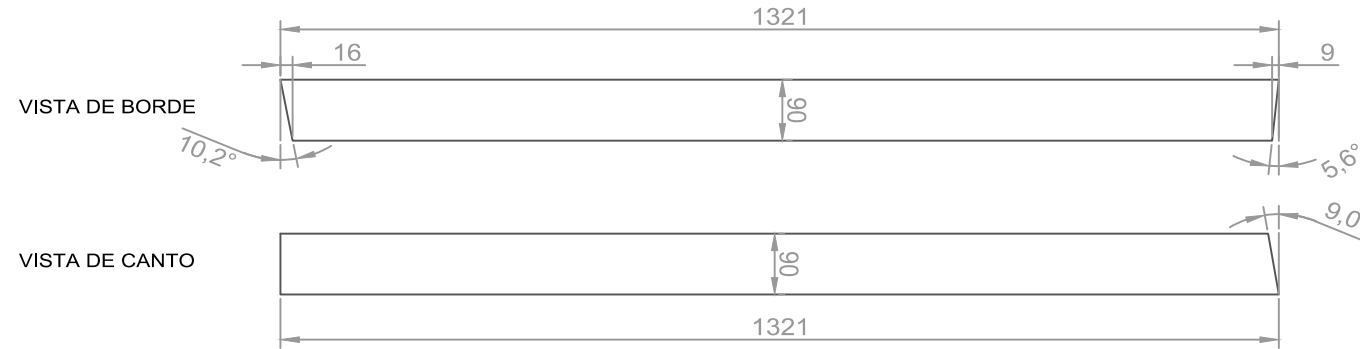
Vista en planta



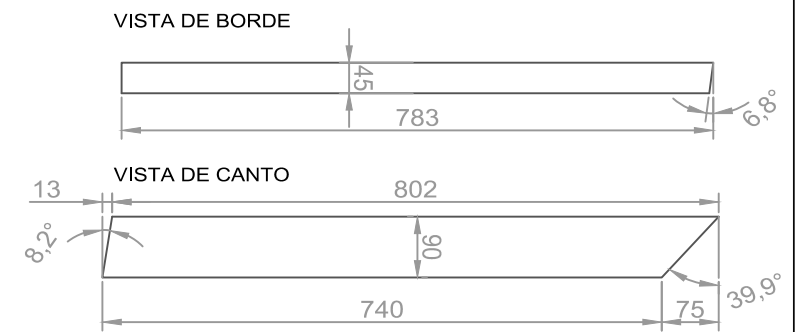
PIEZA PUERTA 100X90



DIAGONAL SUPERIOR (x2)



SUPERIOR CENTRAL (x2)

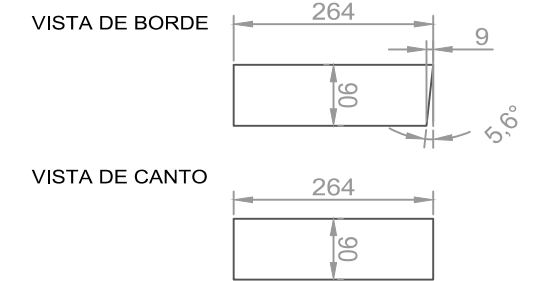


LARGUEROS (x2)

DIAGONAL INFERIOR (x2)



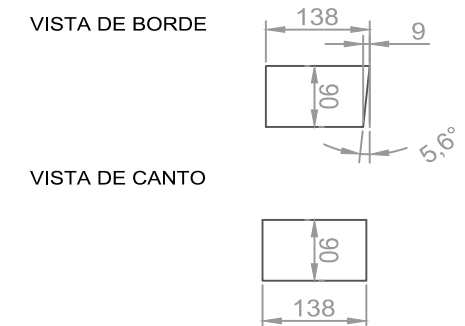
INTERMEDIO LATERAL (x2)



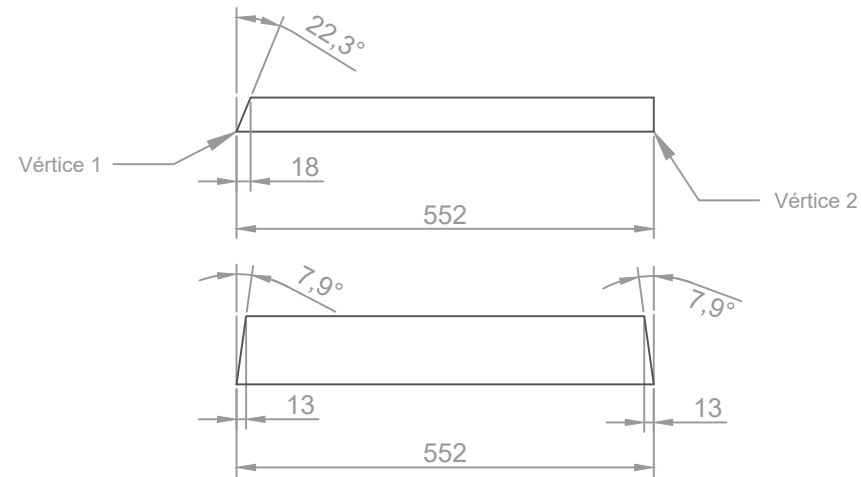
SUPERIOR LATERAL (x2)



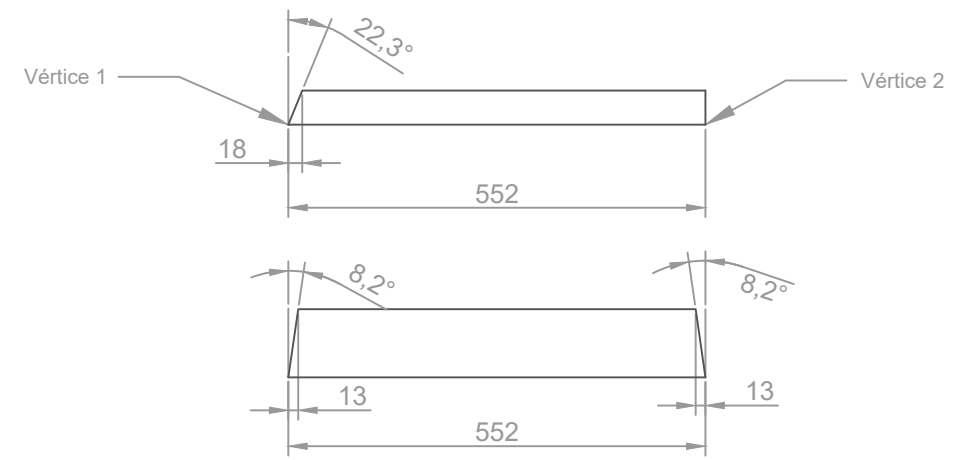
INFERIOR LATERAL (x2)



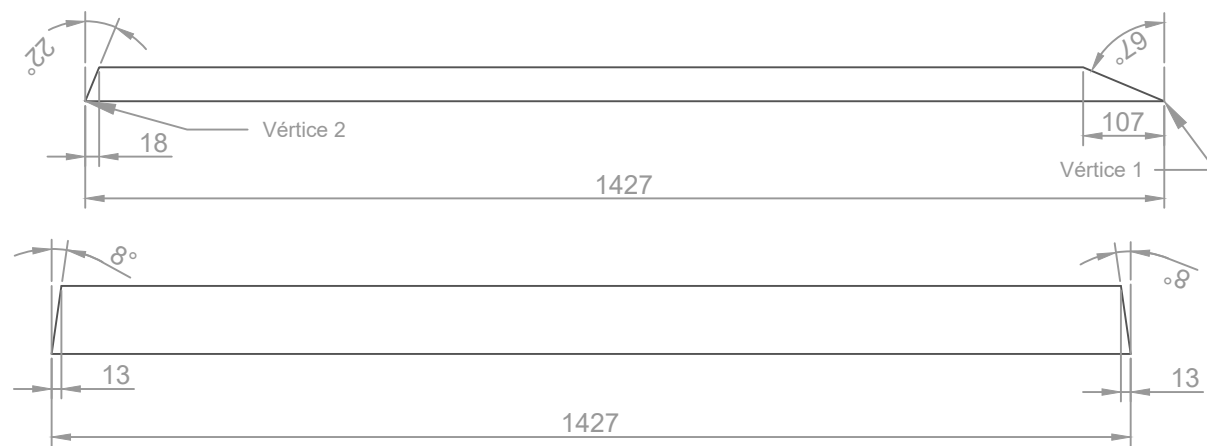
PIEZA P1



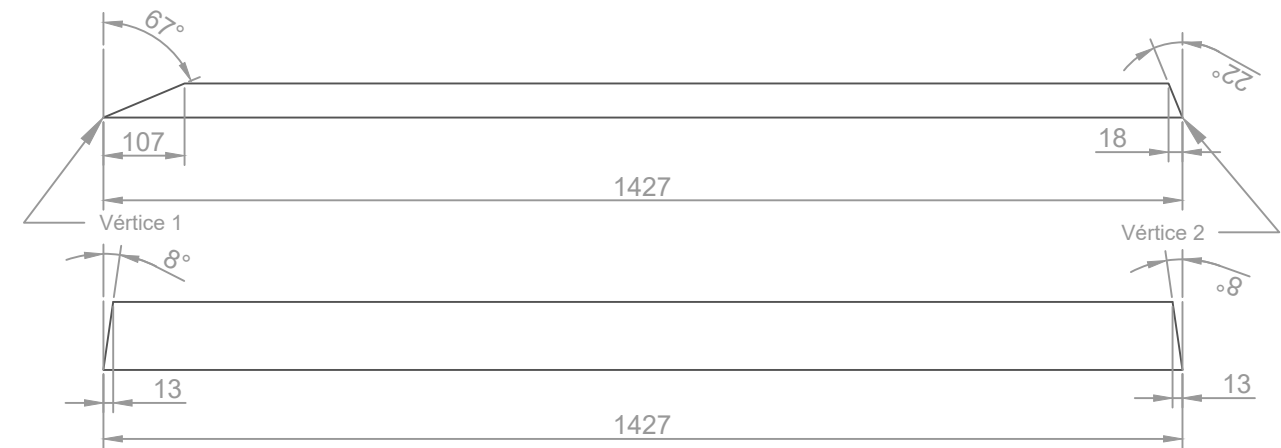
PIEZA P2



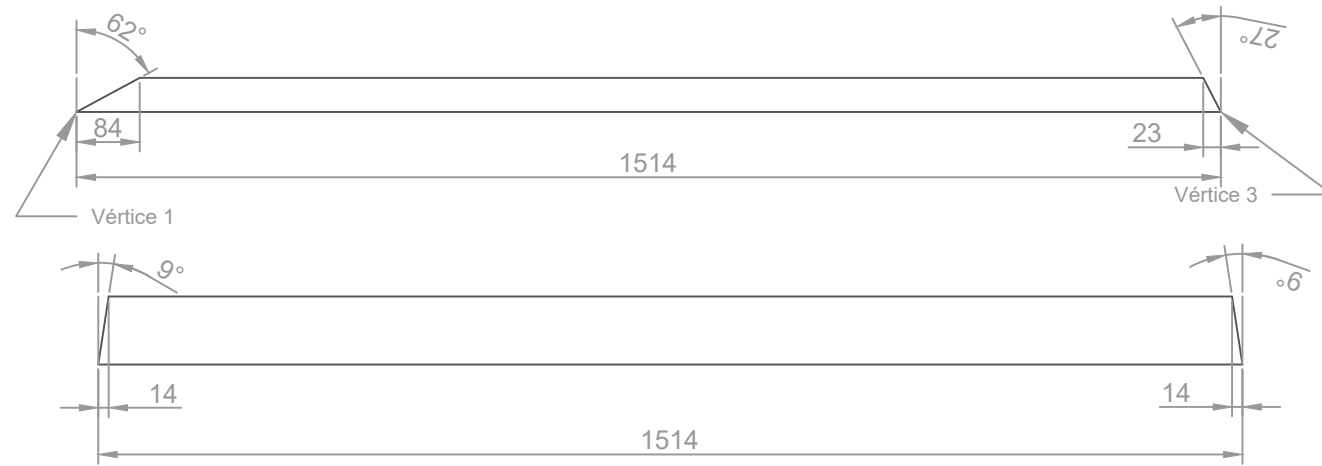
PIEZA P3



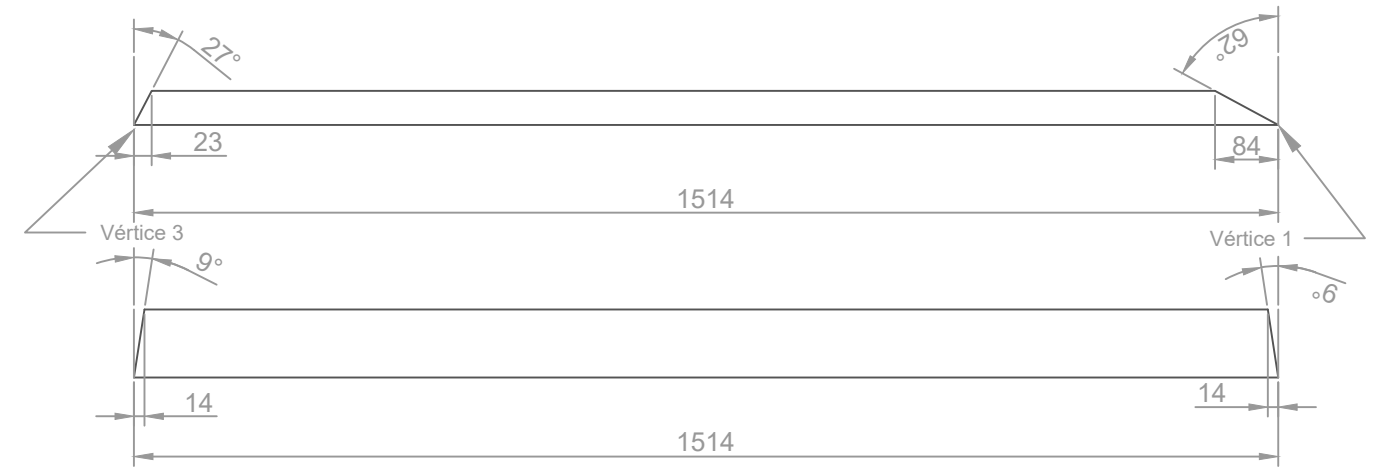
PIEZA P4



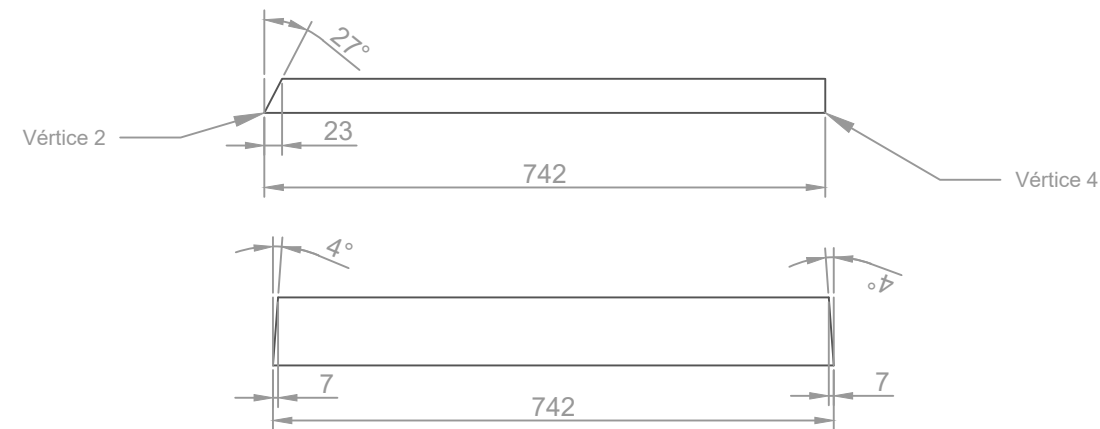
PIEZA P5



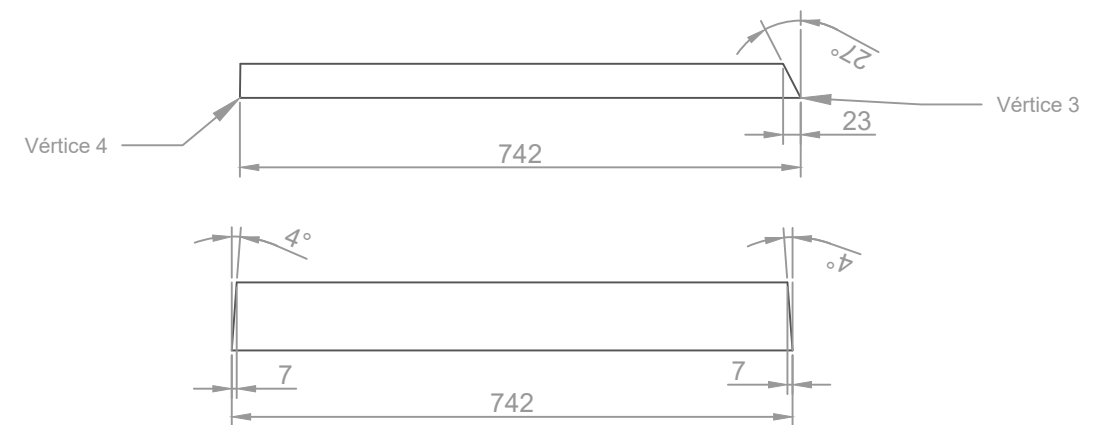
PIEZA P6



PIEZA P7

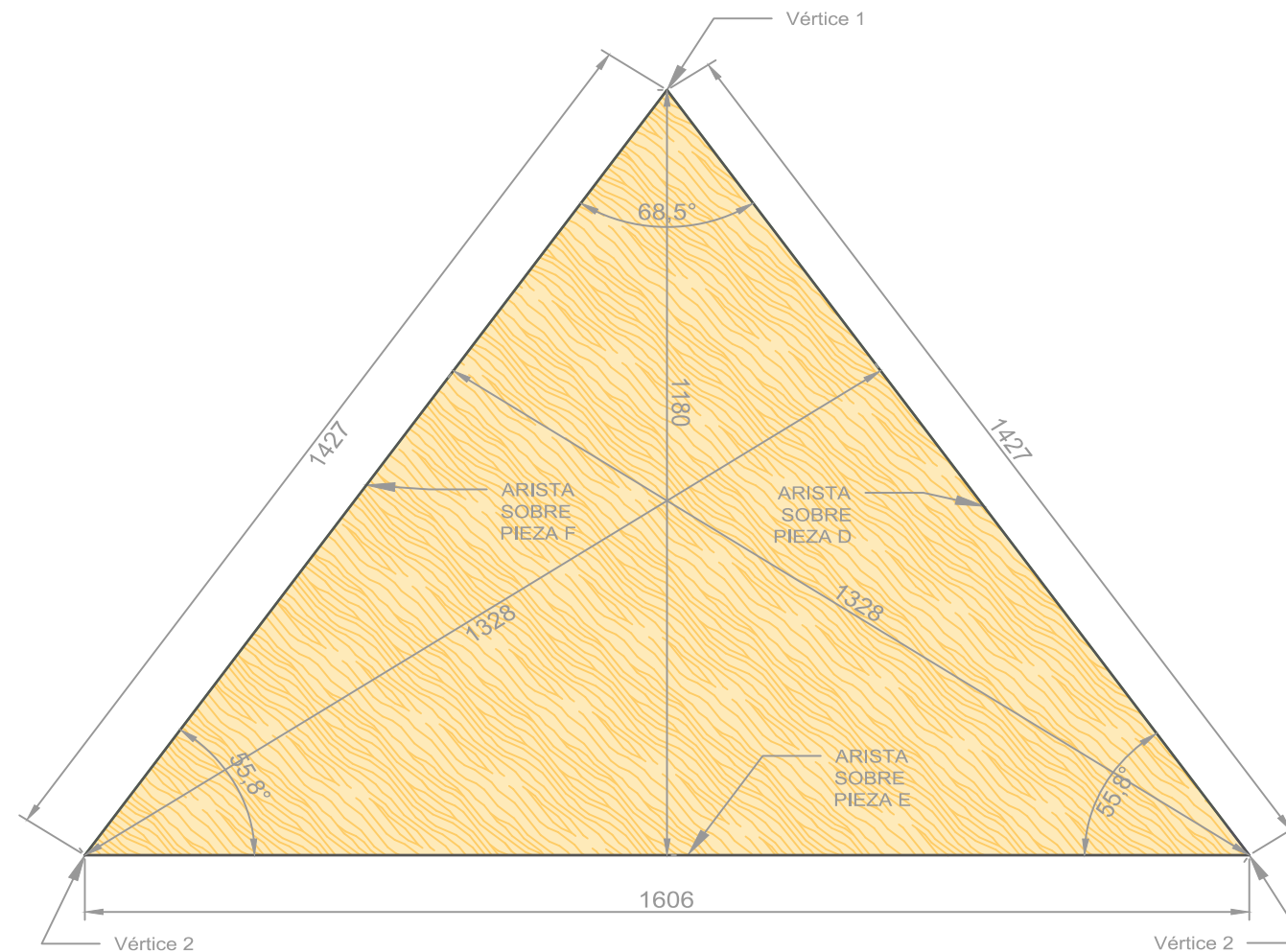
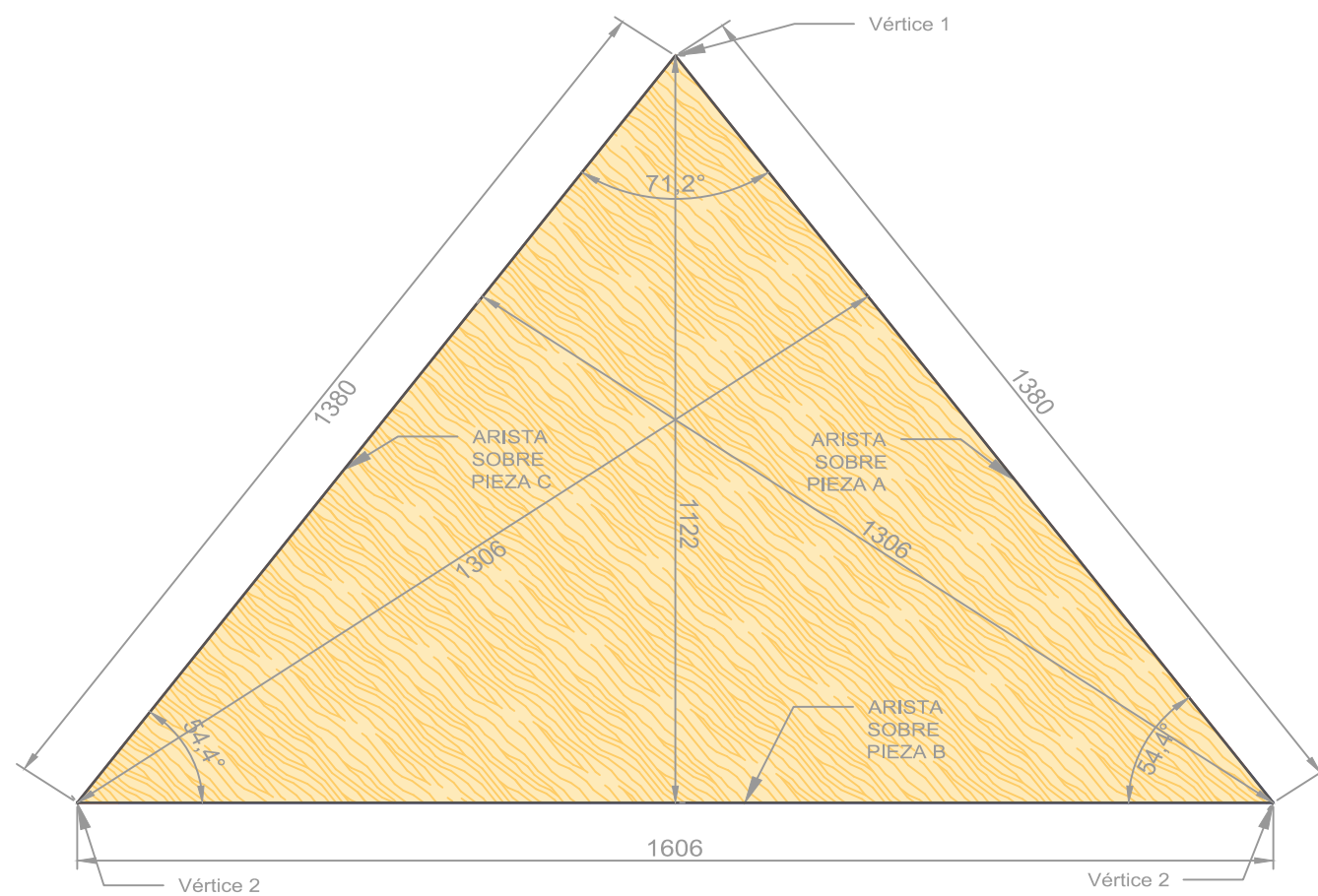


PIEZA P8

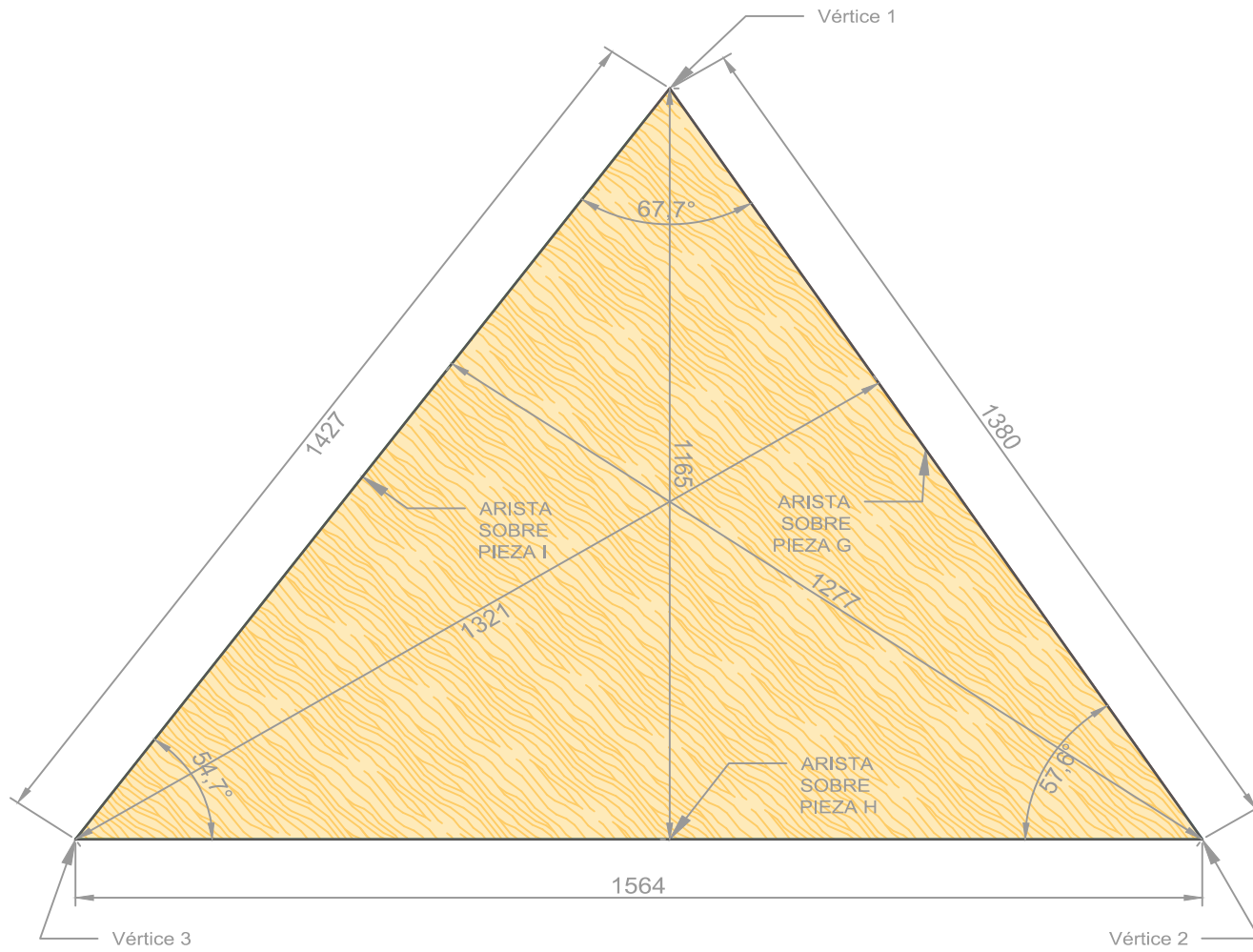


TABLERO OSB Nº1
30 PIEZAS

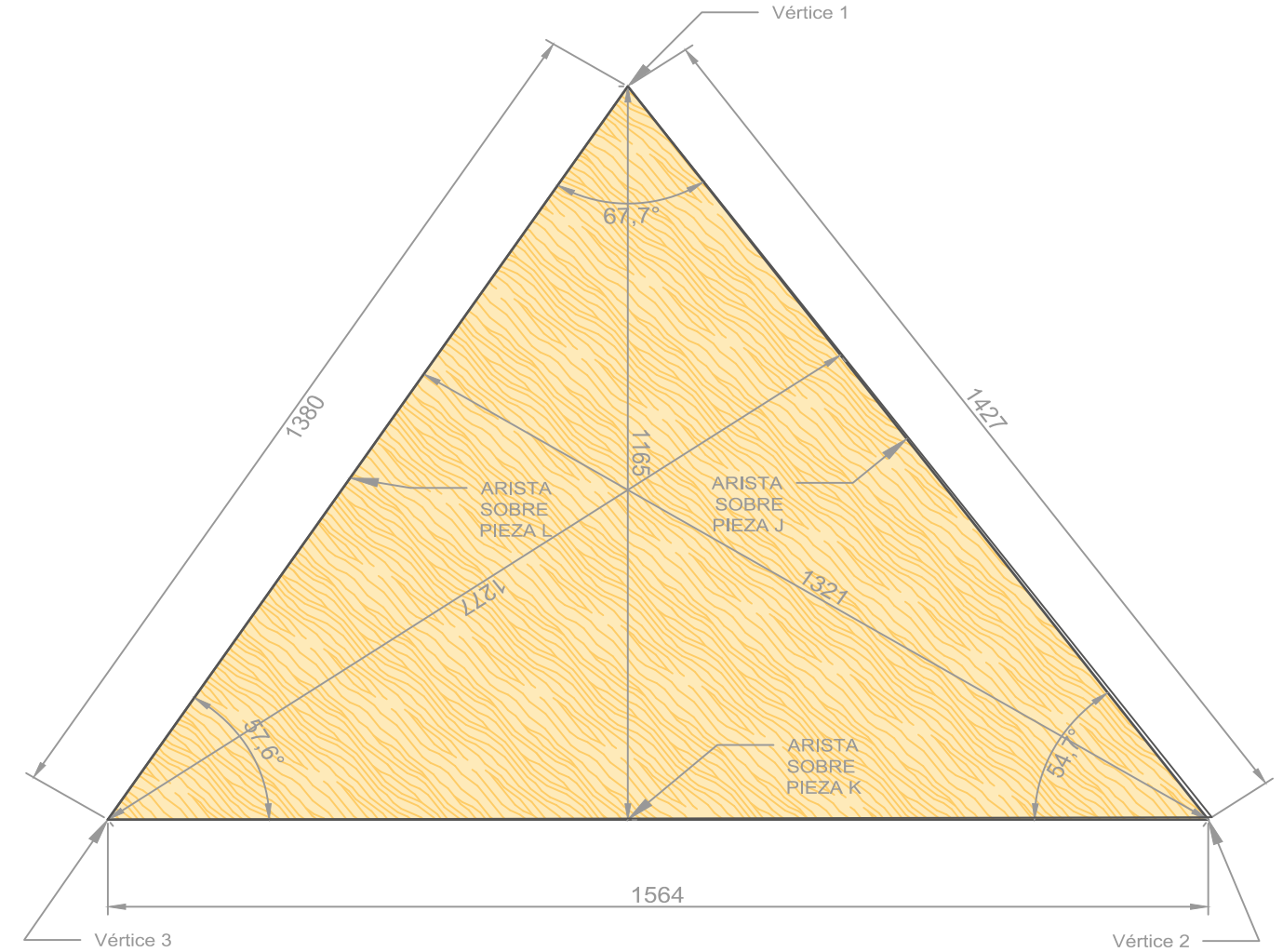
TABLERO OSB Nº2
30 PIEZAS



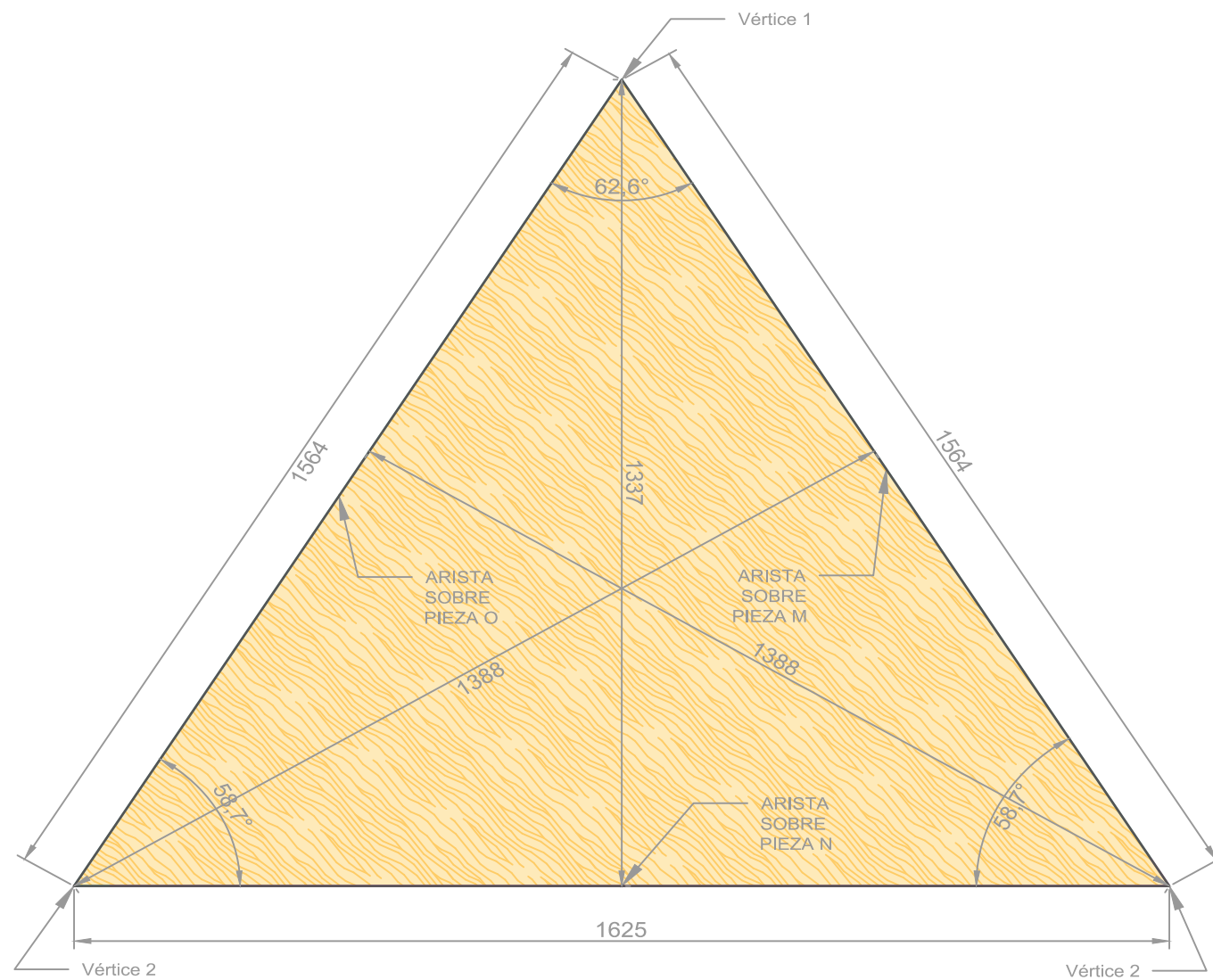
TABLERO OSB Nº3
29 PIEZAS



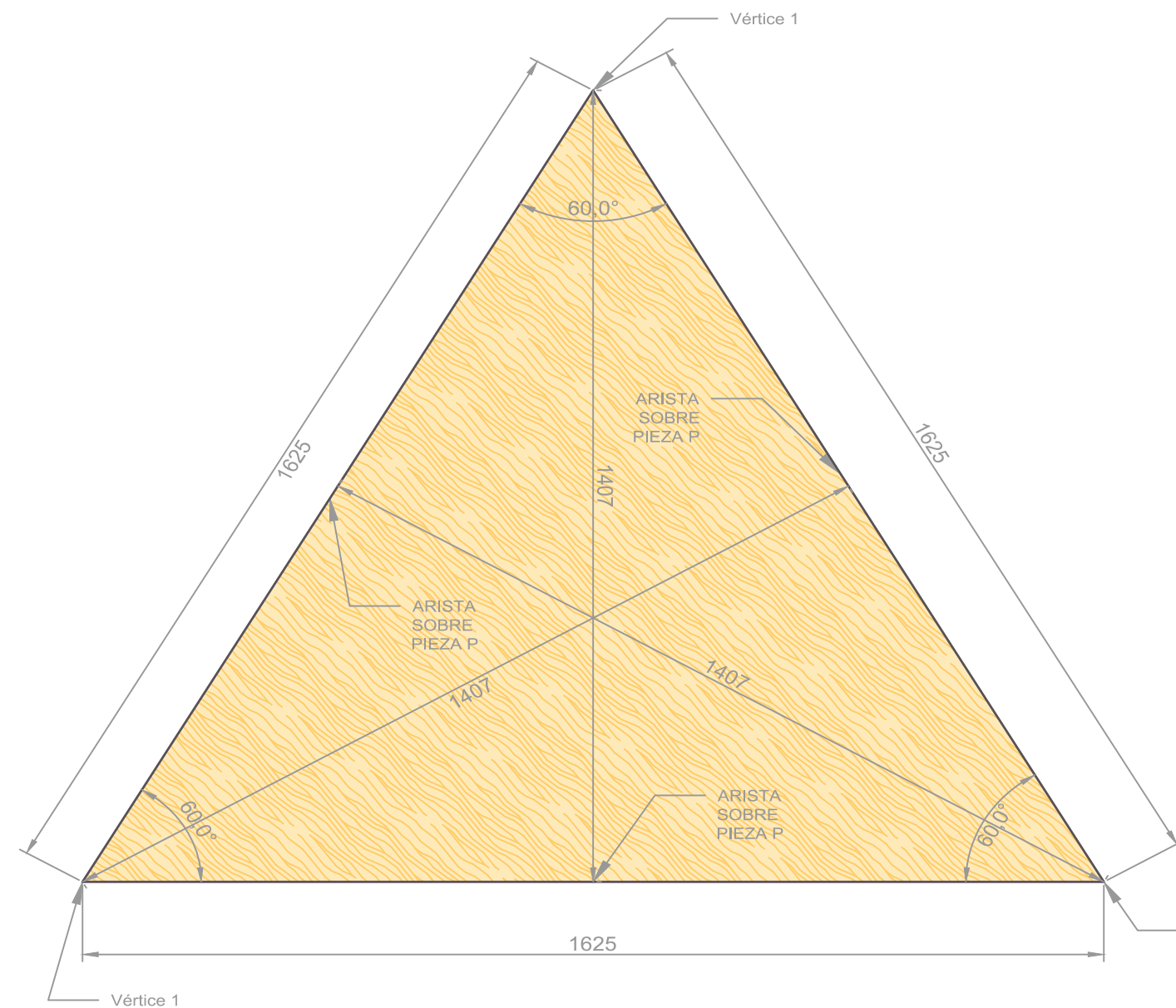
TABLERO OSB Nº4
29 PIEZAS



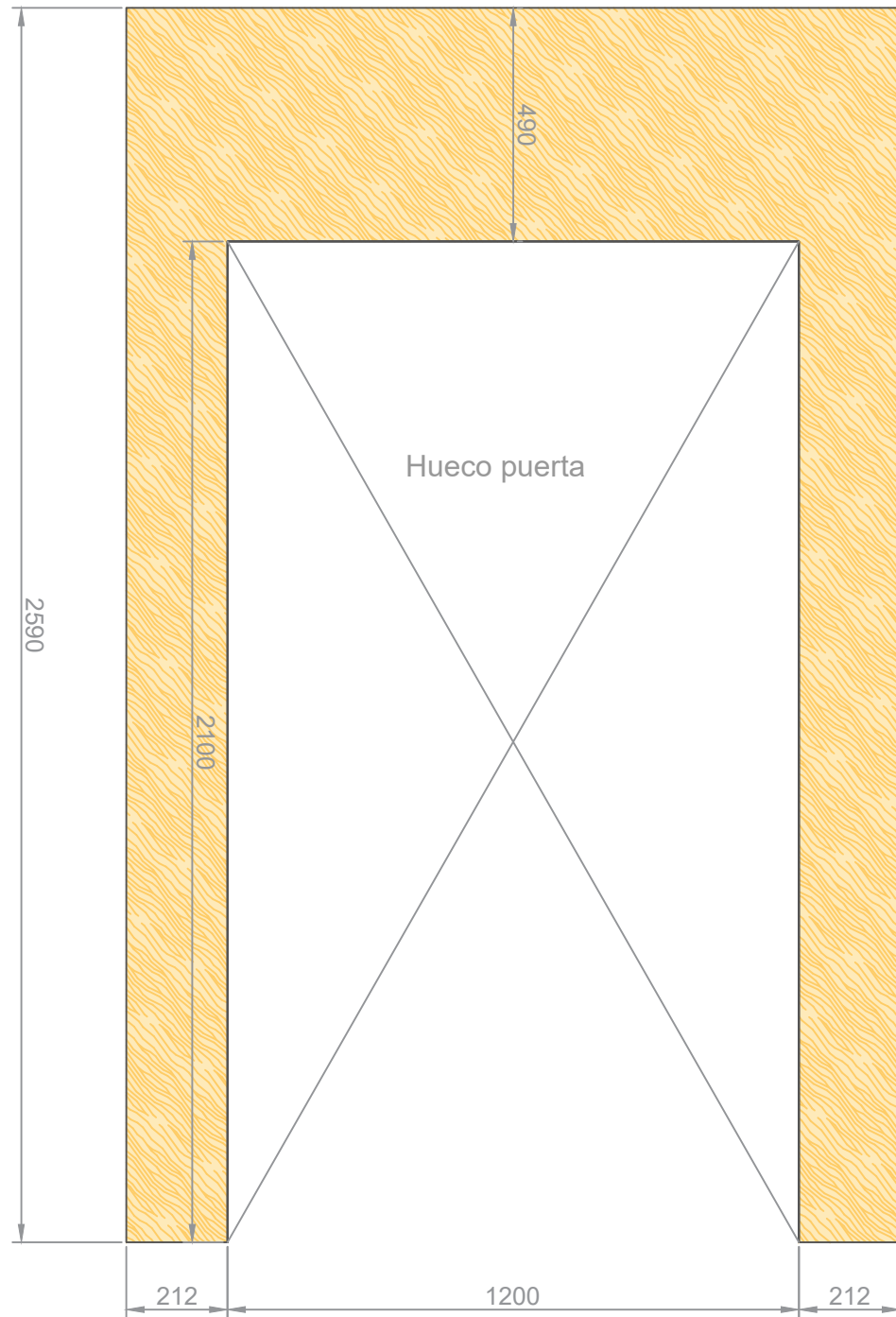
TABLERO OSB Nº5
27 PIEZAS



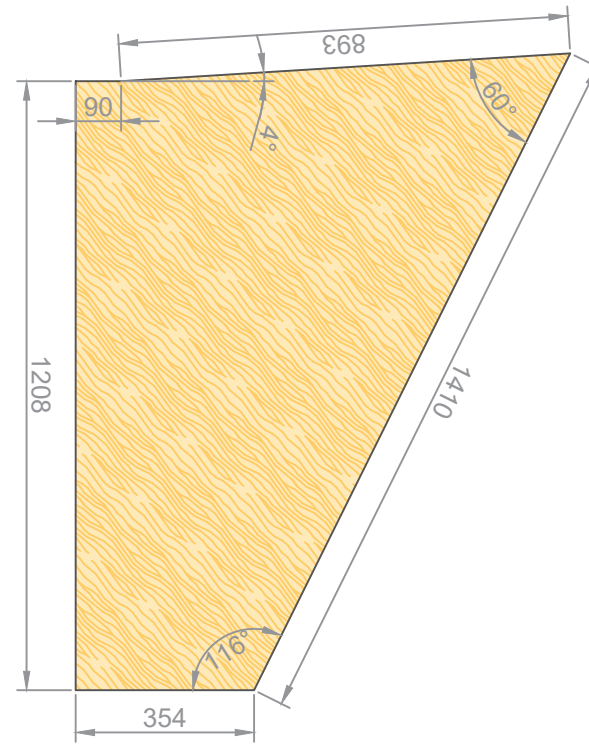
TABLERO OSB Nº6
9 PIEZAS



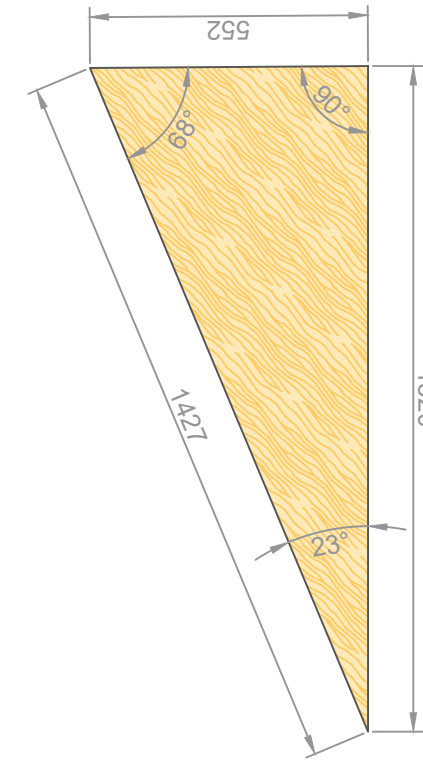
PIEZA DE TABLERO
FRONTAL PUERTA



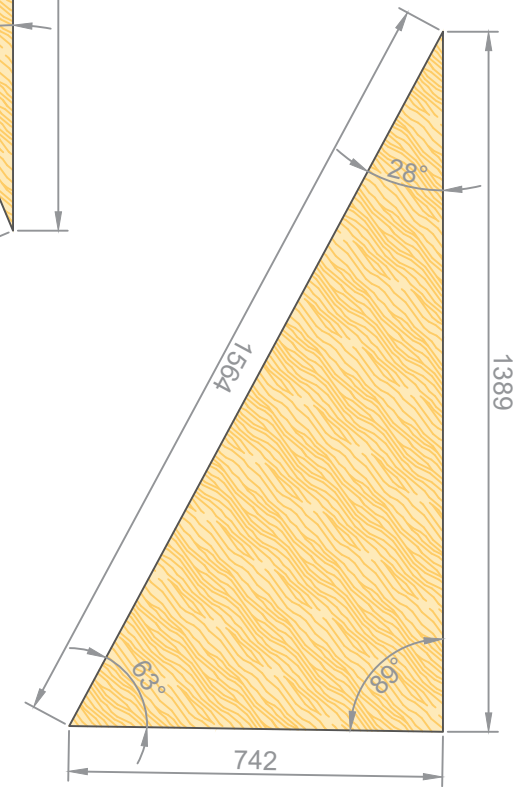
PIEZA DE TABLERO
LATERAL SUPERIOR (x2)



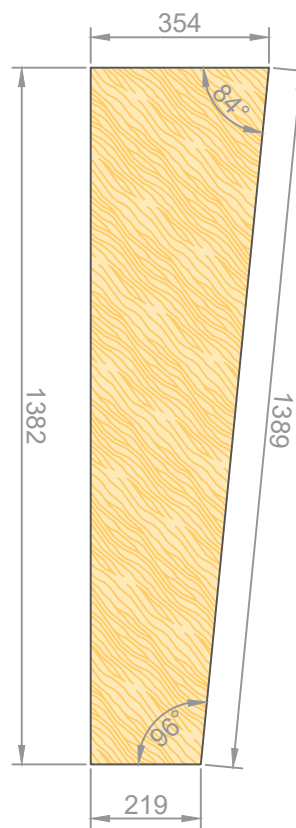
PIEZA DE TRIÁNGULO
SUPERIOR (x2)



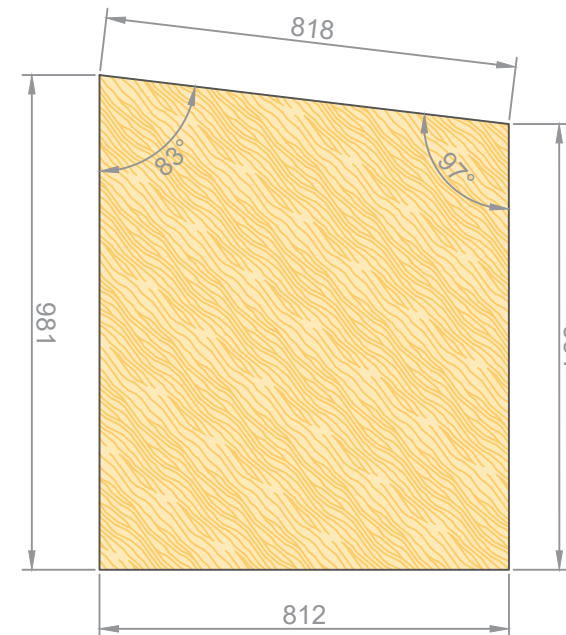
PIEZA DE TRIÁNGULO
INFERIOR (x2)



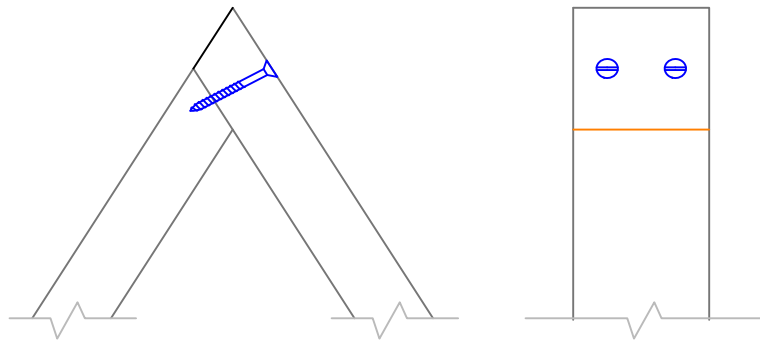
PIEZA DE TABLERO
LATERAL INFERIOR (x2)



PIEZA DE TABLERO SOBRE
DINTEL (x2)

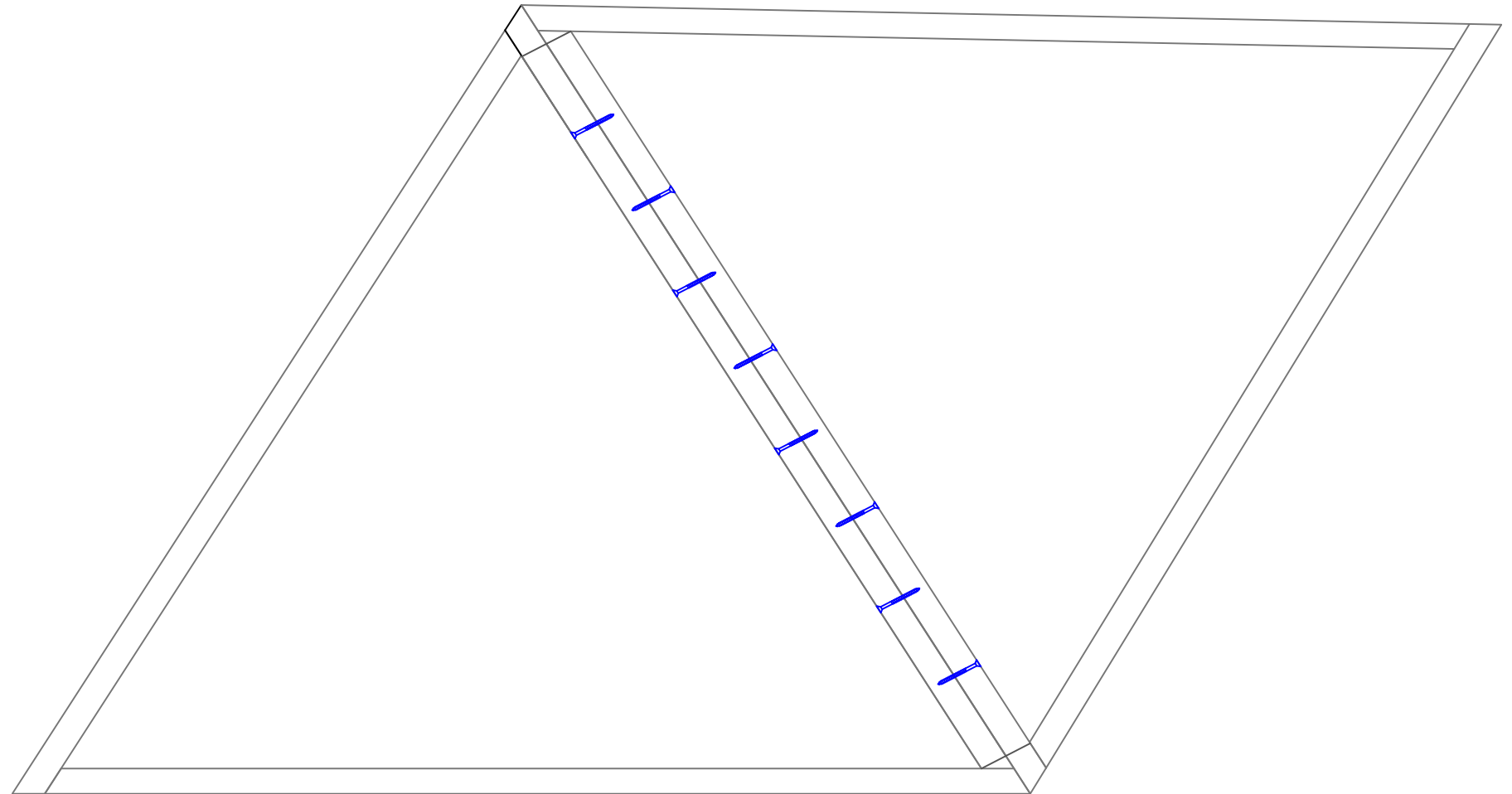


VISTA UNIONES MONTAJE DE TRIÁNGULOS
Escala: 1:5

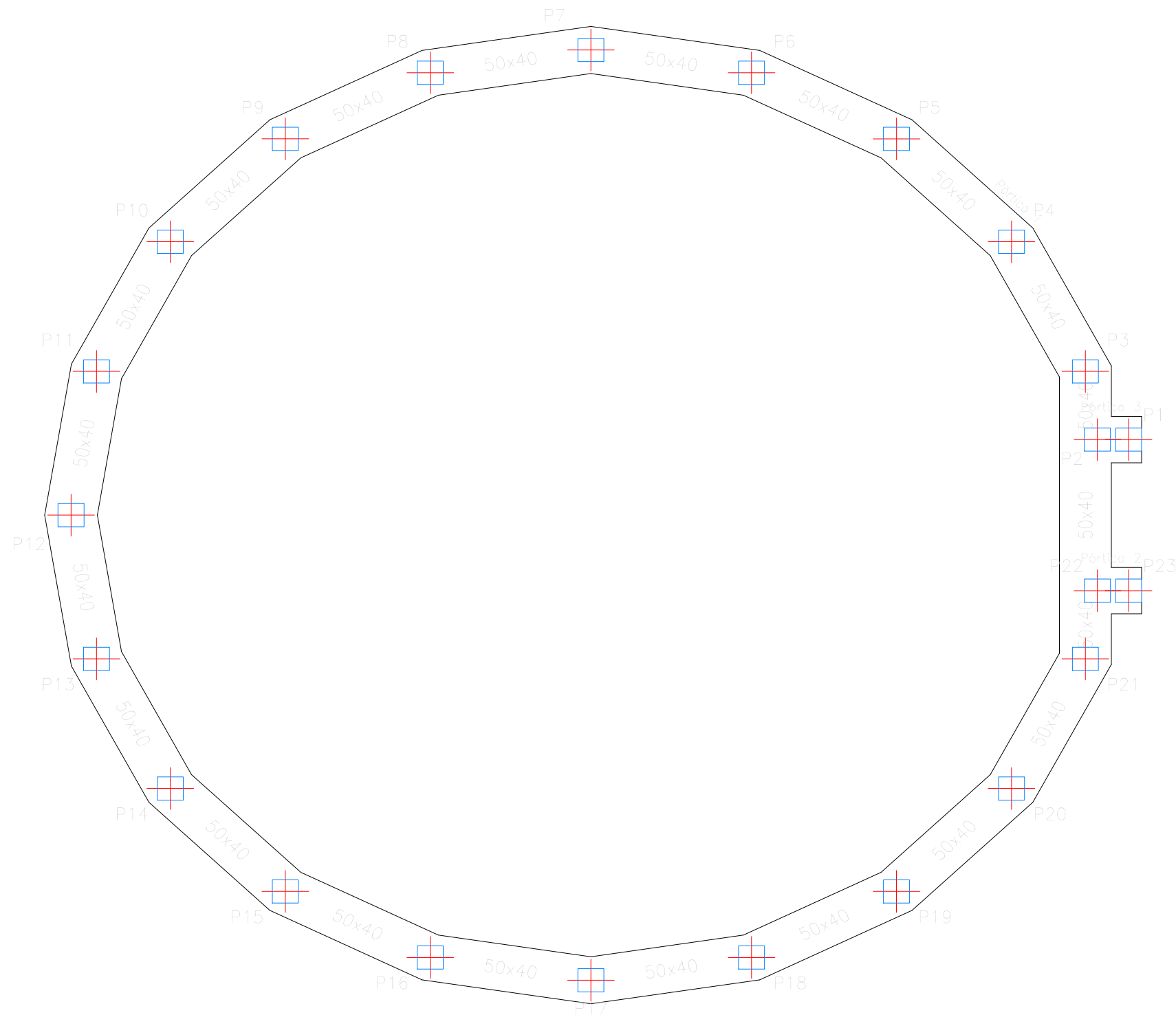


DATOS TORNILLERÍA		
MONTAJE DE TRIÁNGULOS		
Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro	5	mm
Ancho de la cabeza	10	mm
Longitud	8	cm
Nº tirafondos por unión	2	-

VISTA UNIONES ENTRE TRIÁNGULOS
Escala: 1:10



DATOS TORNILLERÍA		
UNIÓN ENTRE TRIÁNGULOS		
Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro	5	mm
Ancho de la cabeza	10	mm
Longitud	8	cm
Nº tirafondos por unión	8	-



CUADRO DE CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

HORMIGON (Código Estructural)						ACERO EN BARRAS CORRUGADAS (Código Estructural)		
Elemento estructural	Tipo de hormigón	Nivel de control	Coefficiente minoración	Relación máx. agua / cemento	Contenido mínimo cemento	Elemento estructural	Tipo de acero	Coefficiente de minoración
Cimentación	HA-25/F/20/XC2	Estadístico	$\gamma_c = 1.50$	0.60	275 kg	Toda la obra	B 500 S	$\gamma_s = 1.15$



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER:
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos - Universitat Politècnica de València

AUTOR DEL PROYECTO:
IVÁN FRANCISCO ESQUER ROCH
Iván Esquer

ESCALA A3:
1:50
UNIDADES:
Metros

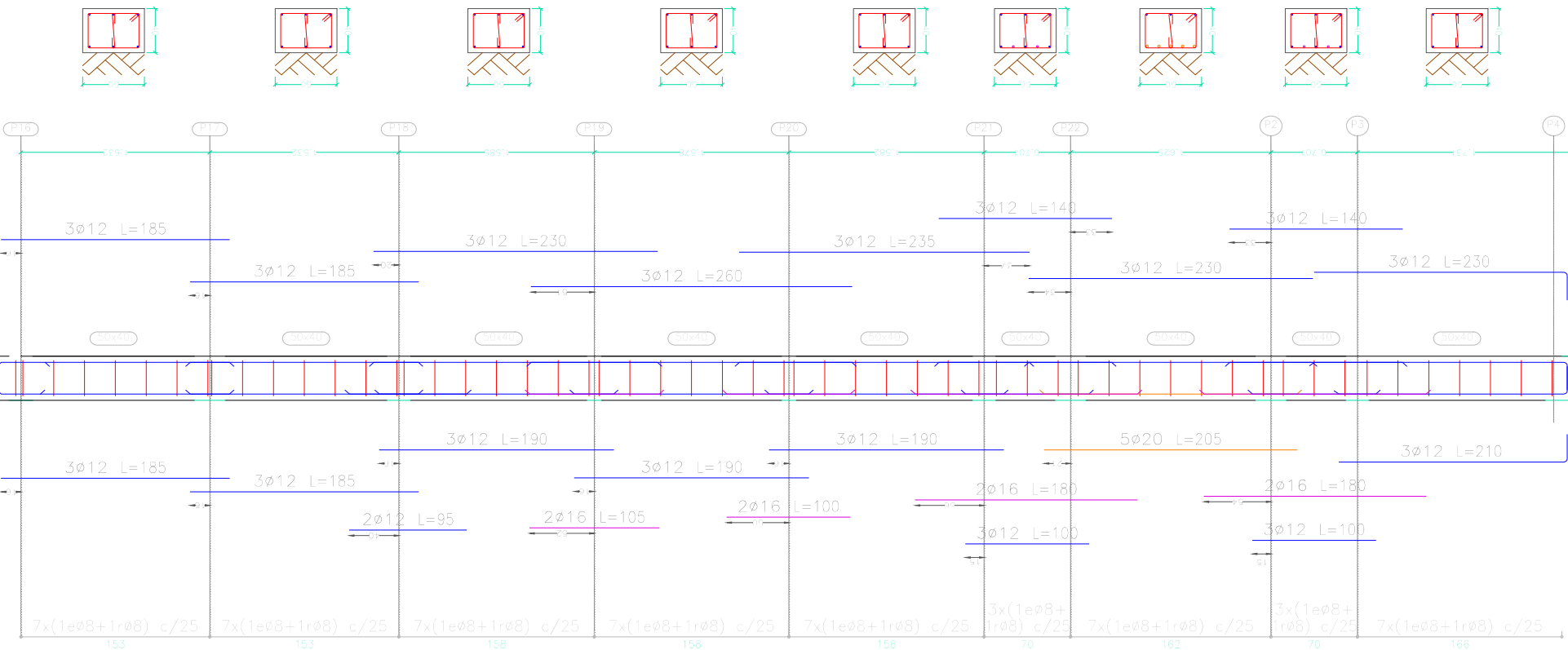
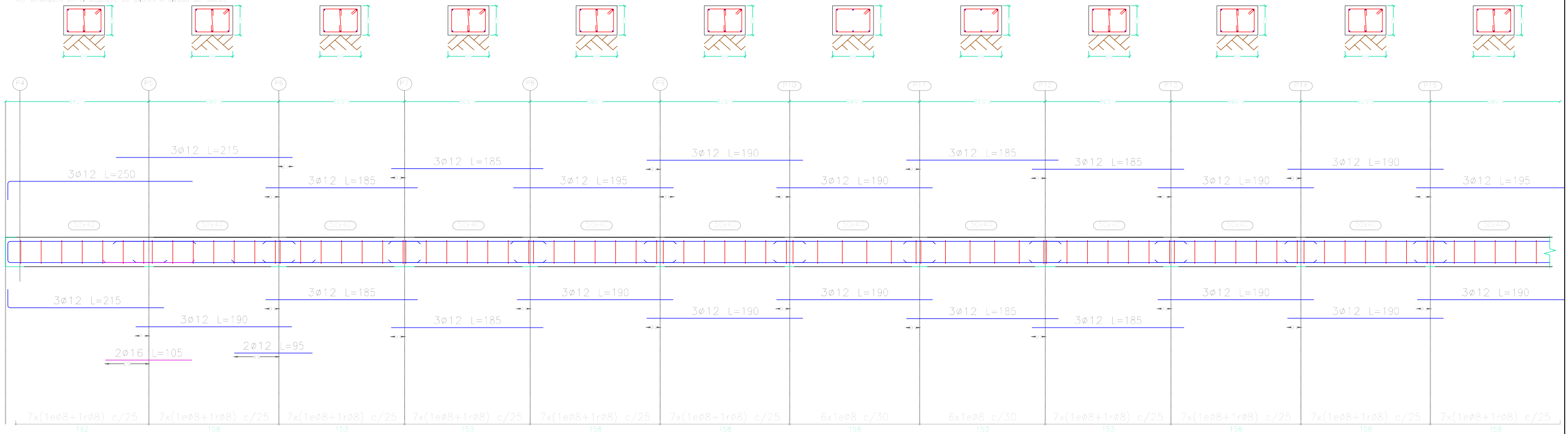
PROYECTO:
PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).

FECHA:
SEPT- 2022

TÍTULO DEL PLANO:
DOMO 1 C1/V4 Ø10m
CIMENTACIÓN
PLANTA CIMENTACIÓN

Nº DE PLANO:
01.09.01
HOJA 1 DE 1

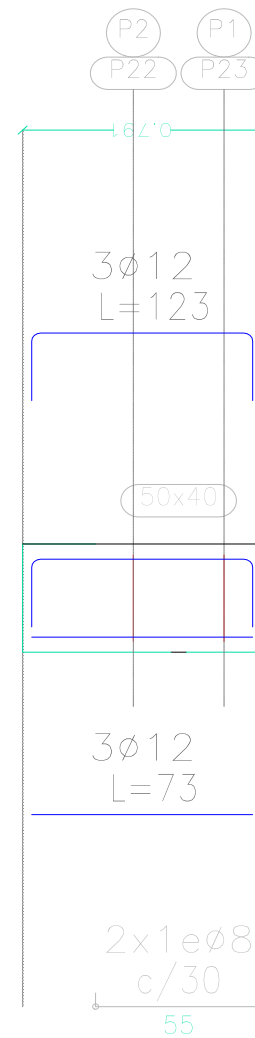
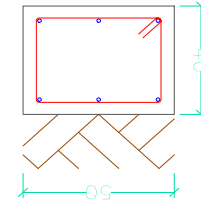
Pórtico 1
Ver arranques en el despiece de pilares o alzado de muros



CUADRO DE CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

HORMIGÓN (Código Estructural)						ACERO EN BARRAS CORRUGADAS (Código Estructural)		
Elemento estructural	Tipo de hormigón	Nivel de control	Coefficiente minoración	Relación máx. agua / cemento	Contenido mínimo cemento	Elemento estructural	Tipo de acero	Coefficiente de minoración
Cimentación	HA-25/F/20/XC2	Estadístico	$\gamma_c = 1.50$	0.60	275 kg	Toda la obra	B 500 S	$\gamma_s = 1.15$

Pórtico 2
 Pórtico 3
 Ver arranques en el despiece de pilares o alzado de muros



CUADRO DE CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

HORMIGÓN (Código Estructural)						ACERO EN BARRAS CORRUGADAS (Código Estructural)		
Elemento estructural	Tipo de hormigón	Nivel de control	Coefficiente minoración	Relación máx. agua / cemento	Contenido mínimo cemento	Elemento estructural	Tipo de acero	Coefficiente de minoración
Cimentación	HA-25/F/20/XC2	Estadístico	$\gamma_c = 1.50$	0.60	275 kg	Toda la obra	B 500 S	$\gamma_s = 1.15$



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER:
 MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE
 CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de
 Caminos, Canales y Puertos - Universitat
 Politècnica de València

AUTOR DEL PROYECTO:
 IVÁN FRANCISCO ESQUER ROCH
Iván Esquer

ESCALA A3:
 1:50
 UNIDADES:
 Metros

PROYECTO:
 PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN
 E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES.
 APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).

FECHA:
 SEPT- 2022

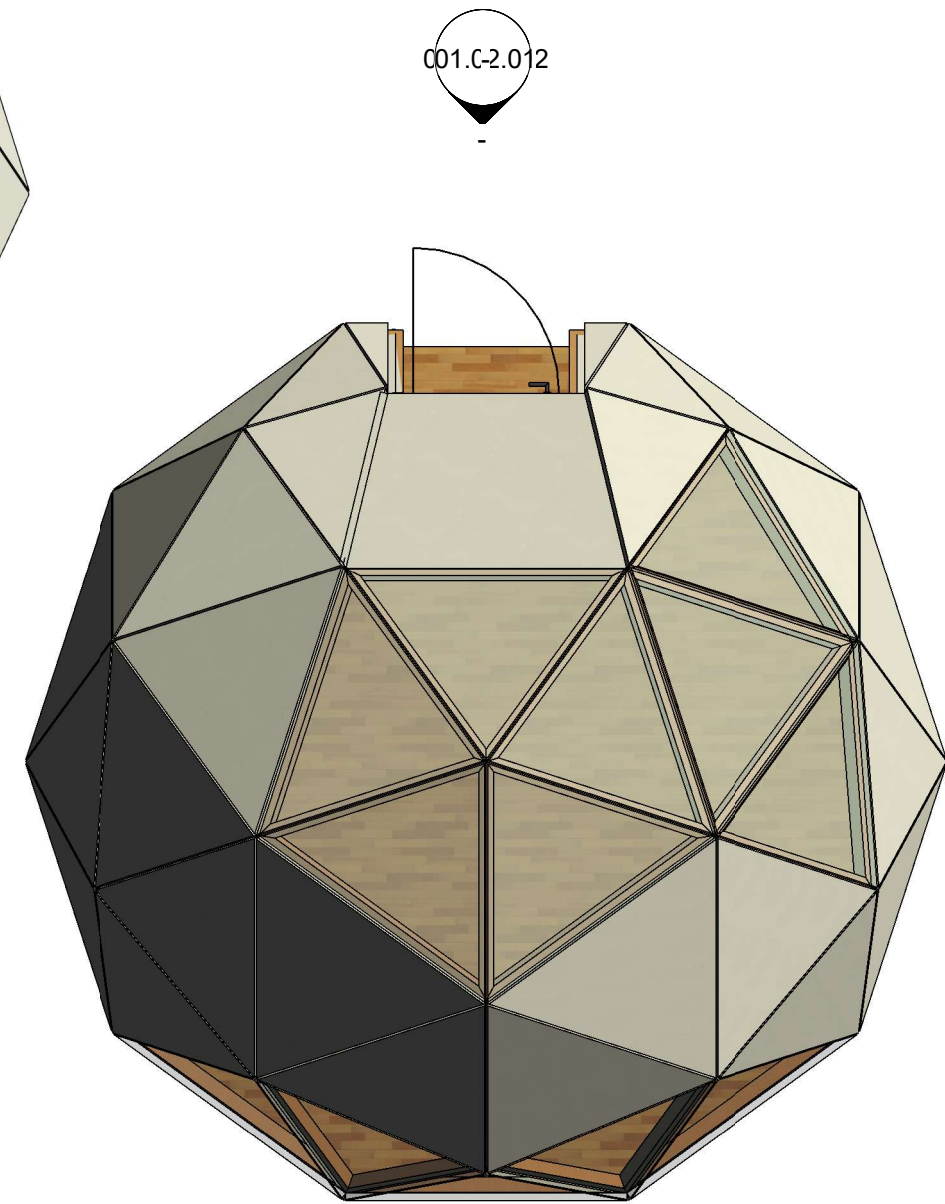
TÍTULO DEL PLANO:
DOMO 1 C1/V4 Ø10m
CIMENTACIÓN
 ALZADO CIMENTACIÓN

Nº DE PLANO:
 01.09.02

HOJA 2 DE 2



2 3D ARQUITECTURA

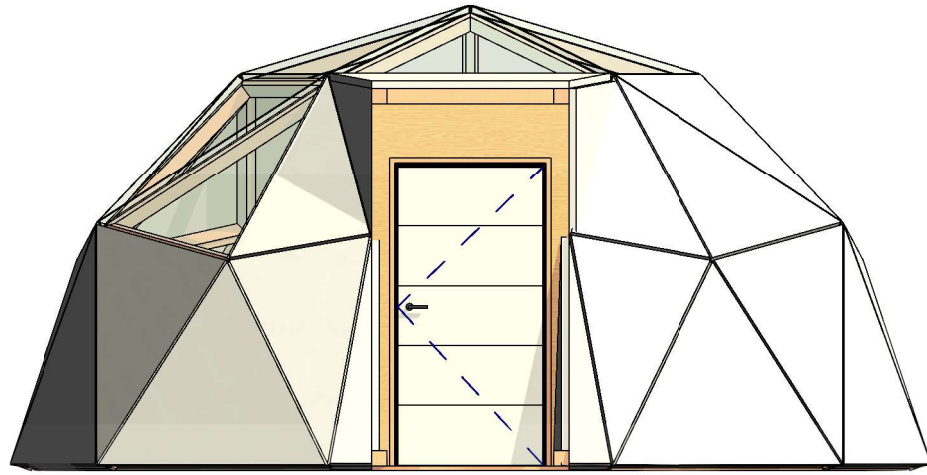


001.02.01 4

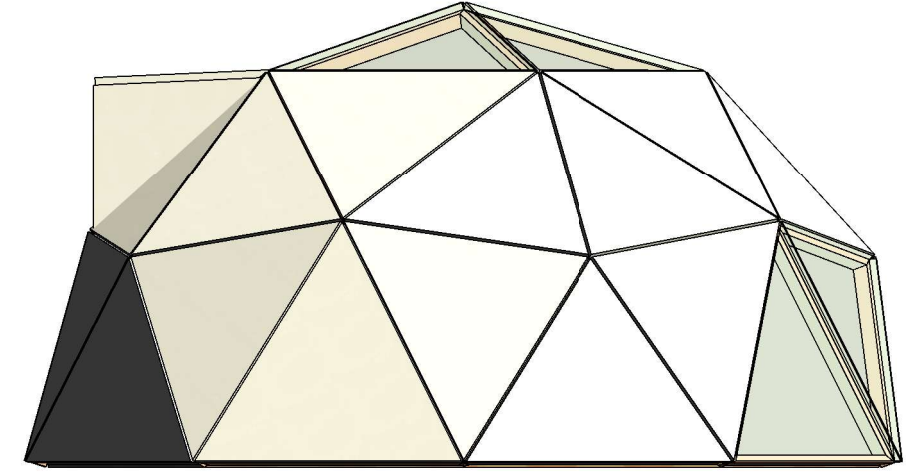
2 001.02.012

1 PLANTA GENERAL ARQUITECTURA
1:50

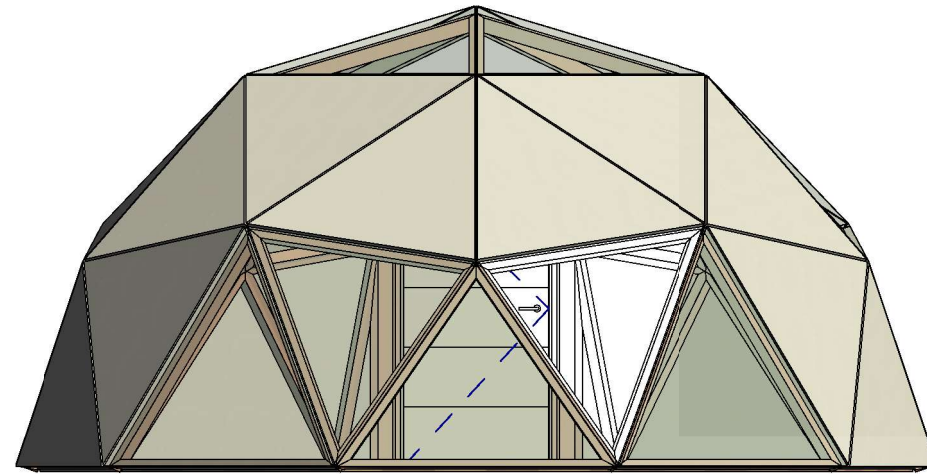
3
001.02.012



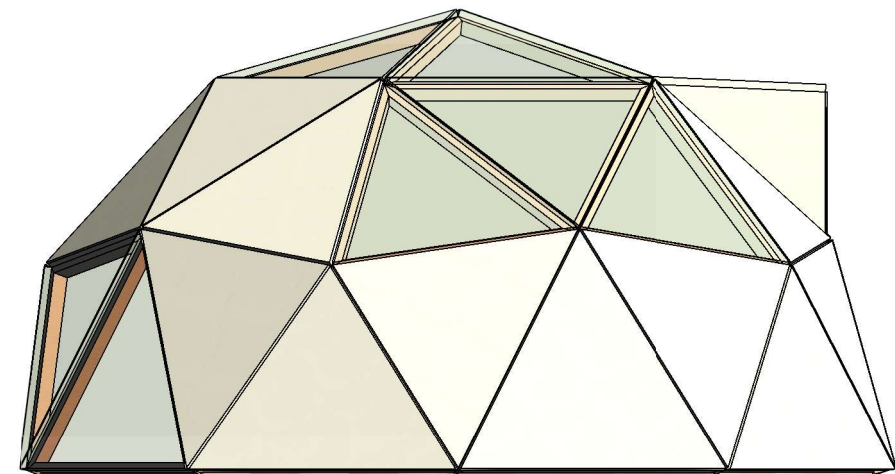
2 ALZADO FRONTAL
1:50



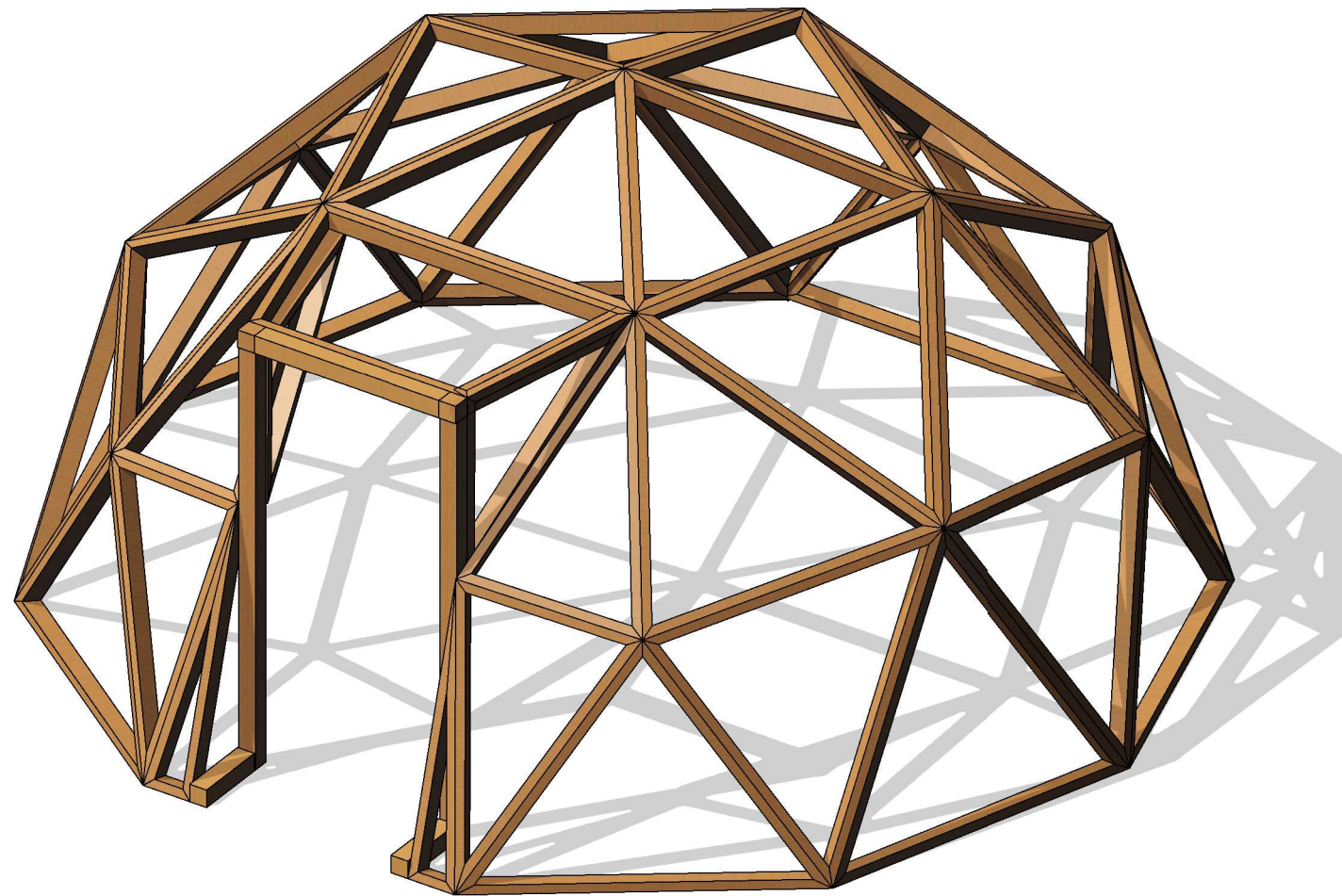
1 ALZADO LATERAL ESTE
1:50



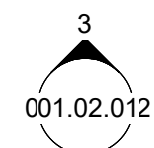
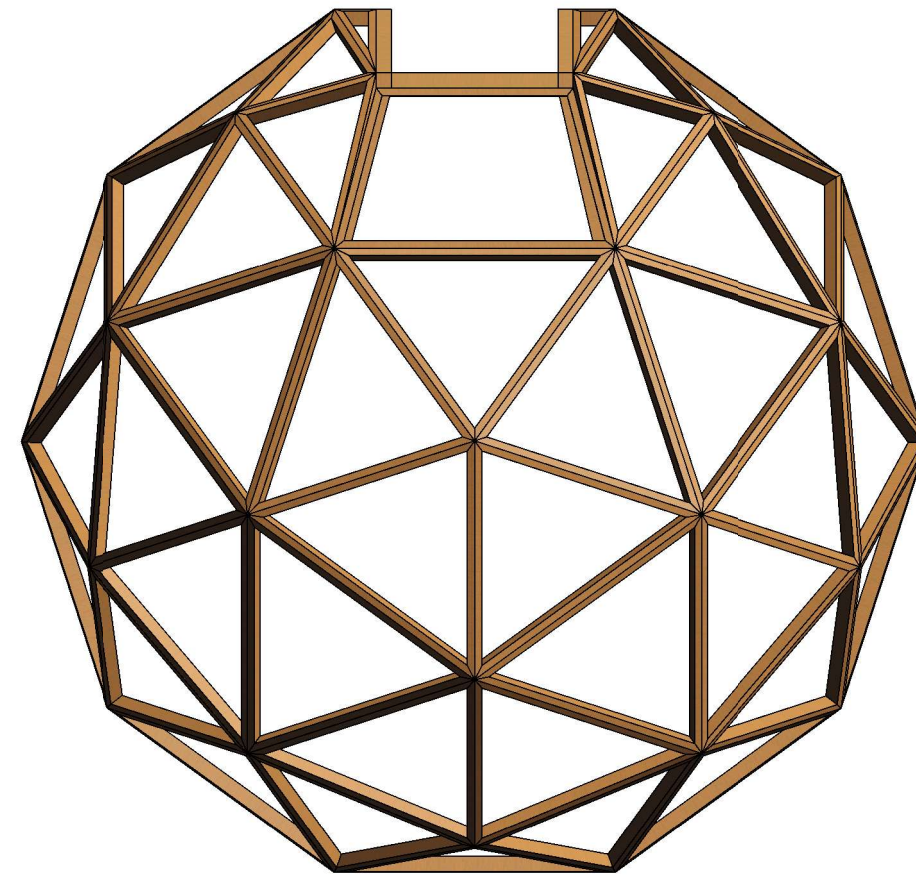
4 ALZADO DORSAL
1:50



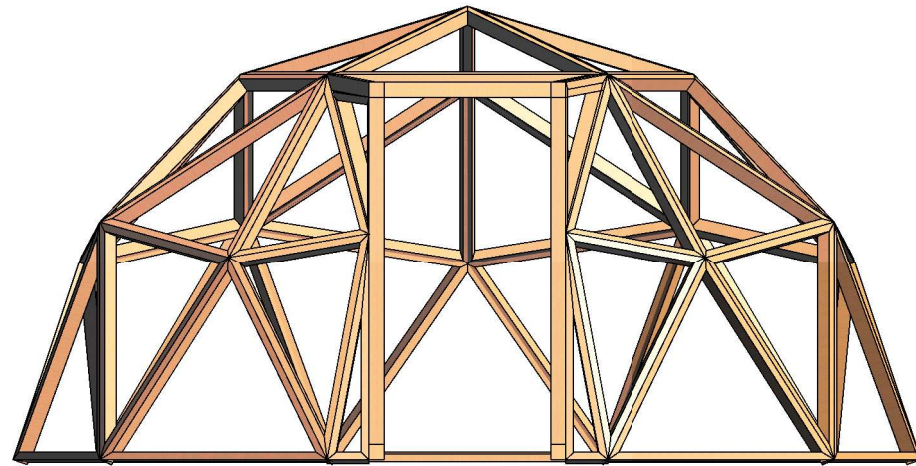
3 ALZADO LATERAL OESTE
1:50



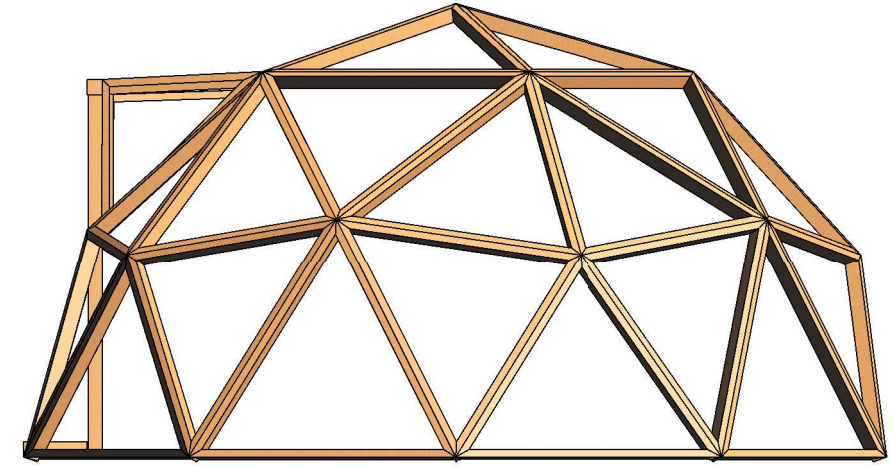
1 3D ESTRUCTURA



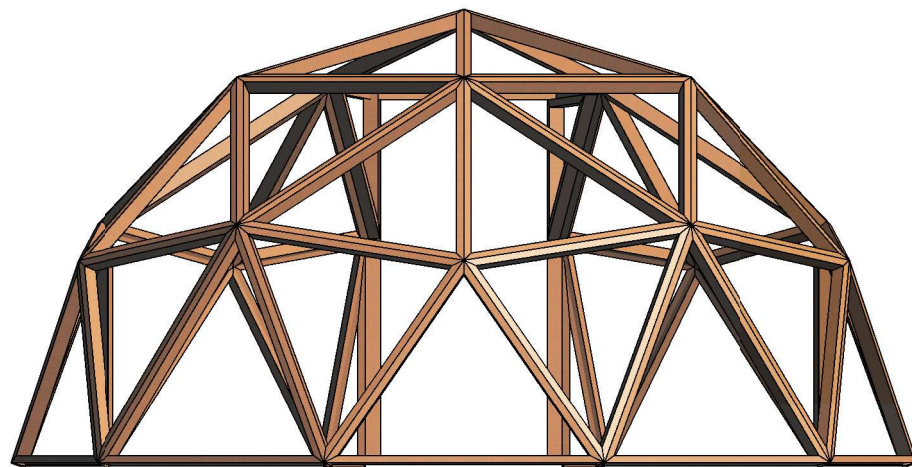
2 PLANTA GENERAL ESTRUCTURA
1 : 50



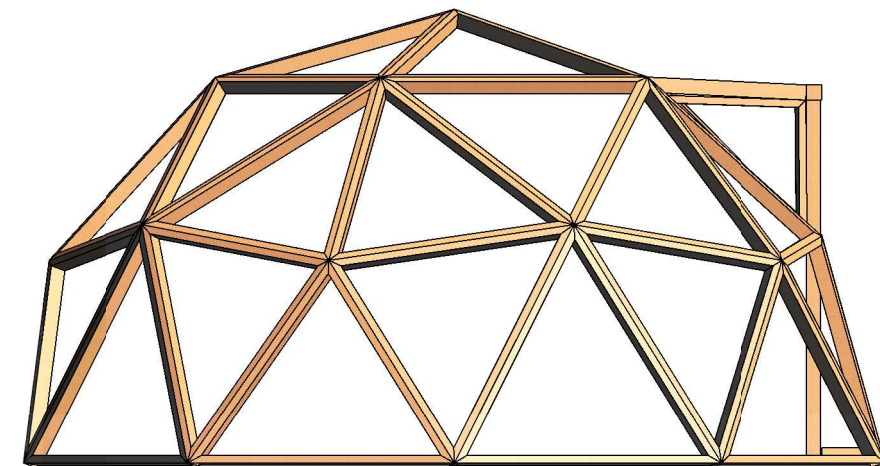
1 ALZADO FRONTAL ESTRUCTURA
1 : 50



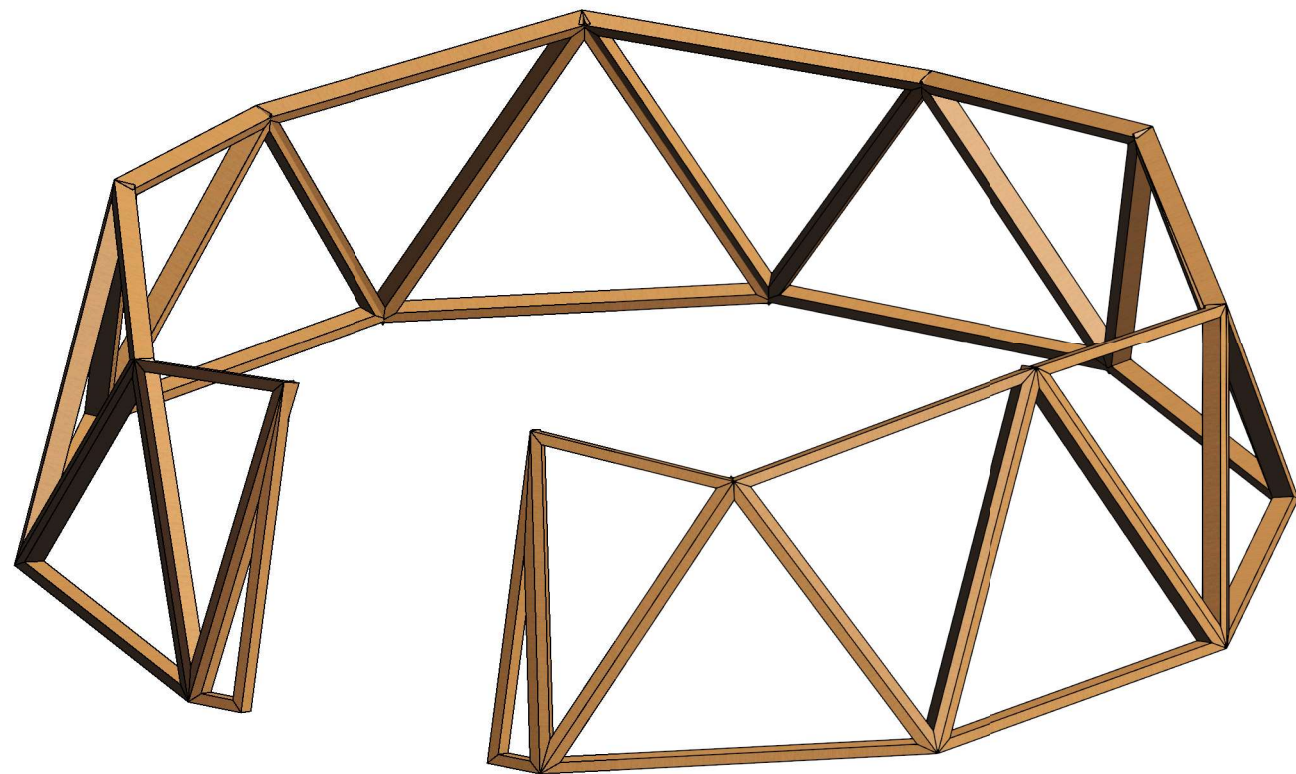
4 ALZADO LATERAL ESTE ESTRUCTURA
1 : 50



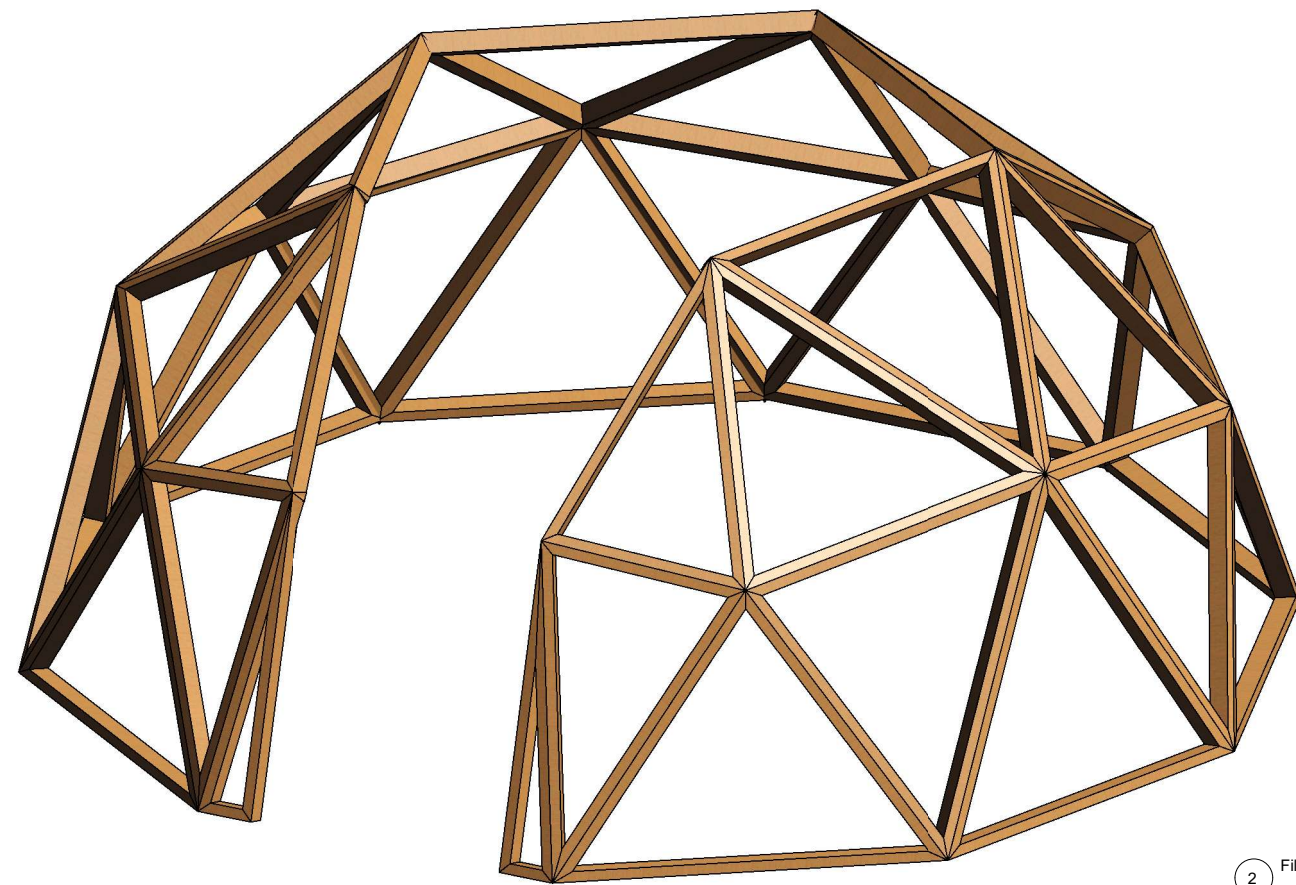
3 ALZADO DORSAL ESTRUCTURA
1 : 50



2 ALZADO LATERAL OESTE ESTRUCTURA
1 : 50



1 Fila 1



2 Fila 2



UNIVERSITAT
POLITÀCNICA
DE VALÈNCIA

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE
CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



ESCUELA POLITÈCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y
PUERTOS - UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

AUTOR DEL PROYECTO:
IVÁN FRANCISCO ESQUER ROCH

Iván Esquer

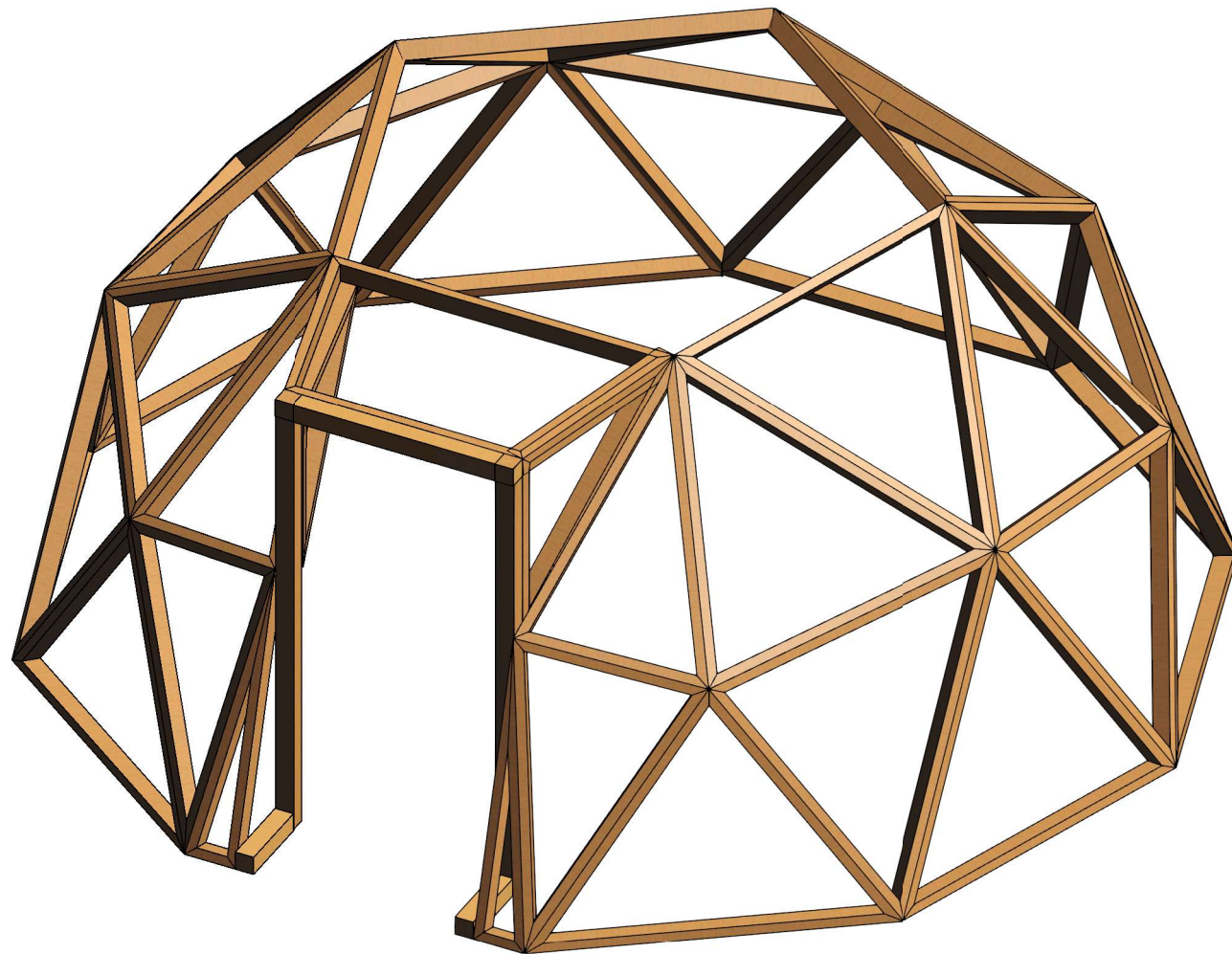
ESCALA A3:
S/E
UNIDADES:
METROS

PROYECTO:
PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA
PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE
DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN
PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).

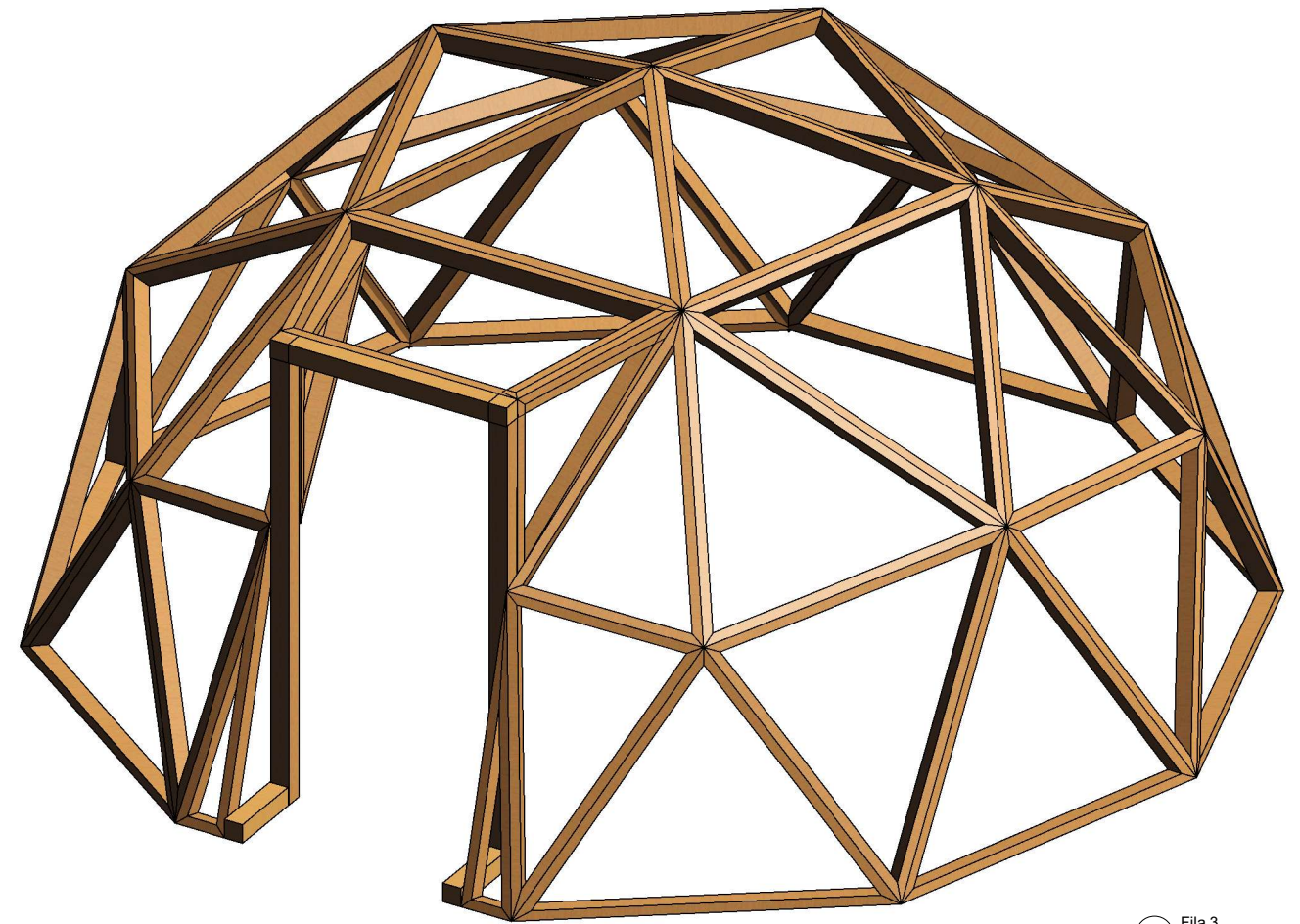
FECHA:
SEPT - 2022

TÍTULO DEL PLANO:
DOMO 2 C1/V2/6M
MONTAJE ESTRUCTURA
PROCESO CONSTRUCTIVO

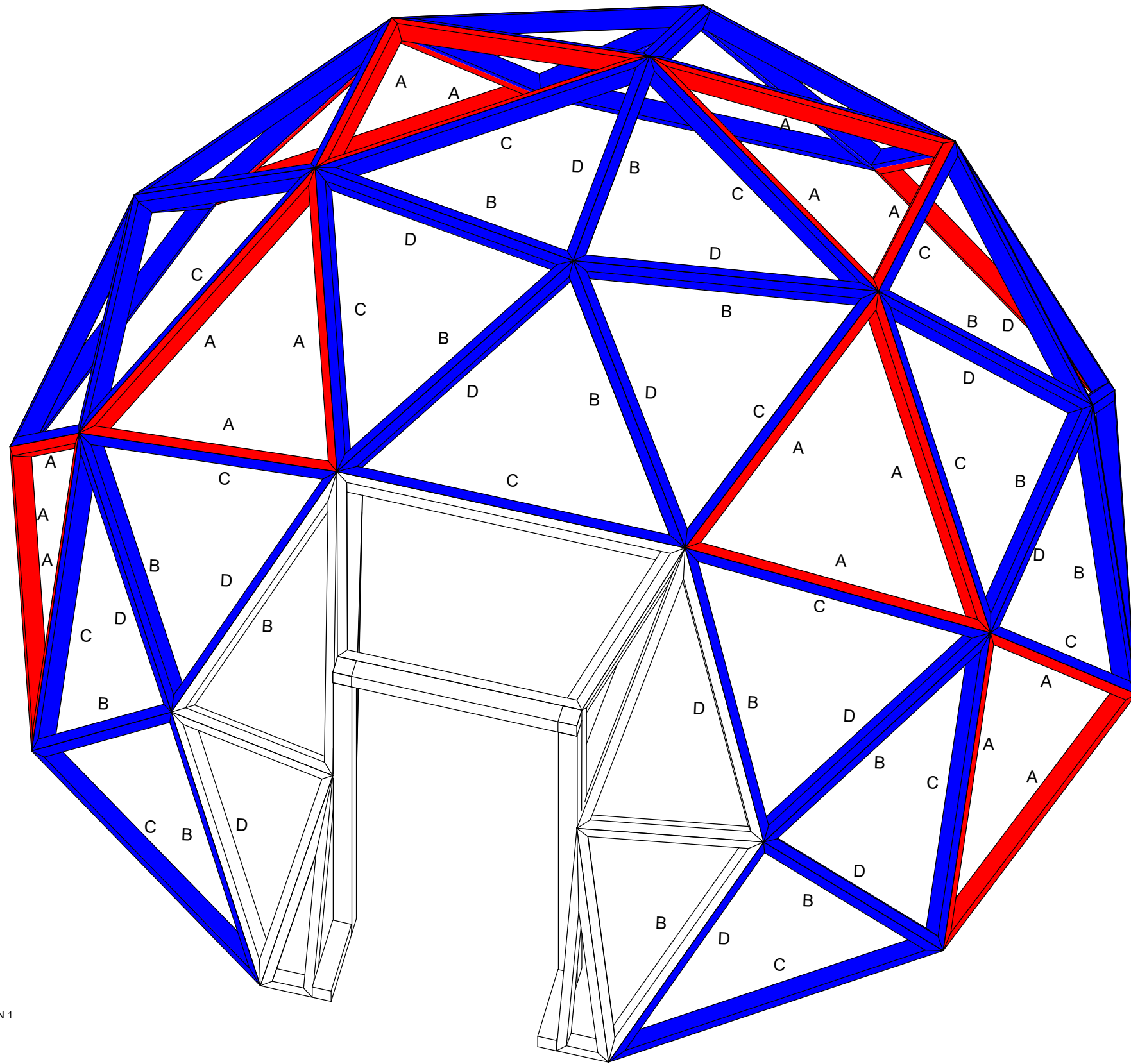
Nº DE PLANO:
02.03.01
HOJA 1 DE 2



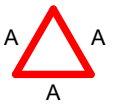
1 Puerta



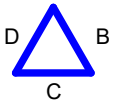
2 Fila 3



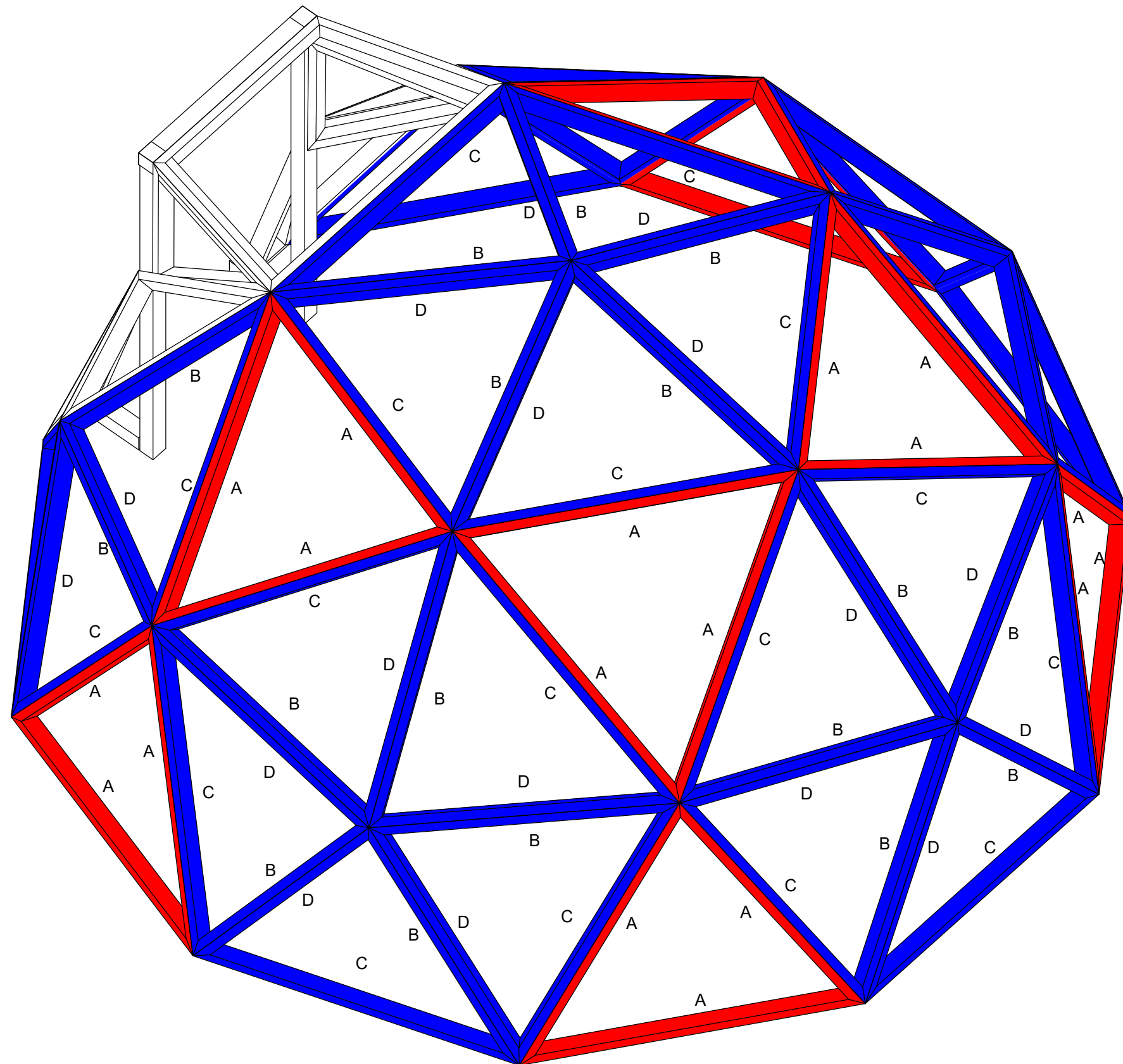
TRIÁNGULO Nº 1



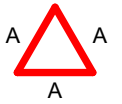
TRIÁNGULO Nº 2



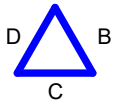
1 IDENTIFICACIÓN 1

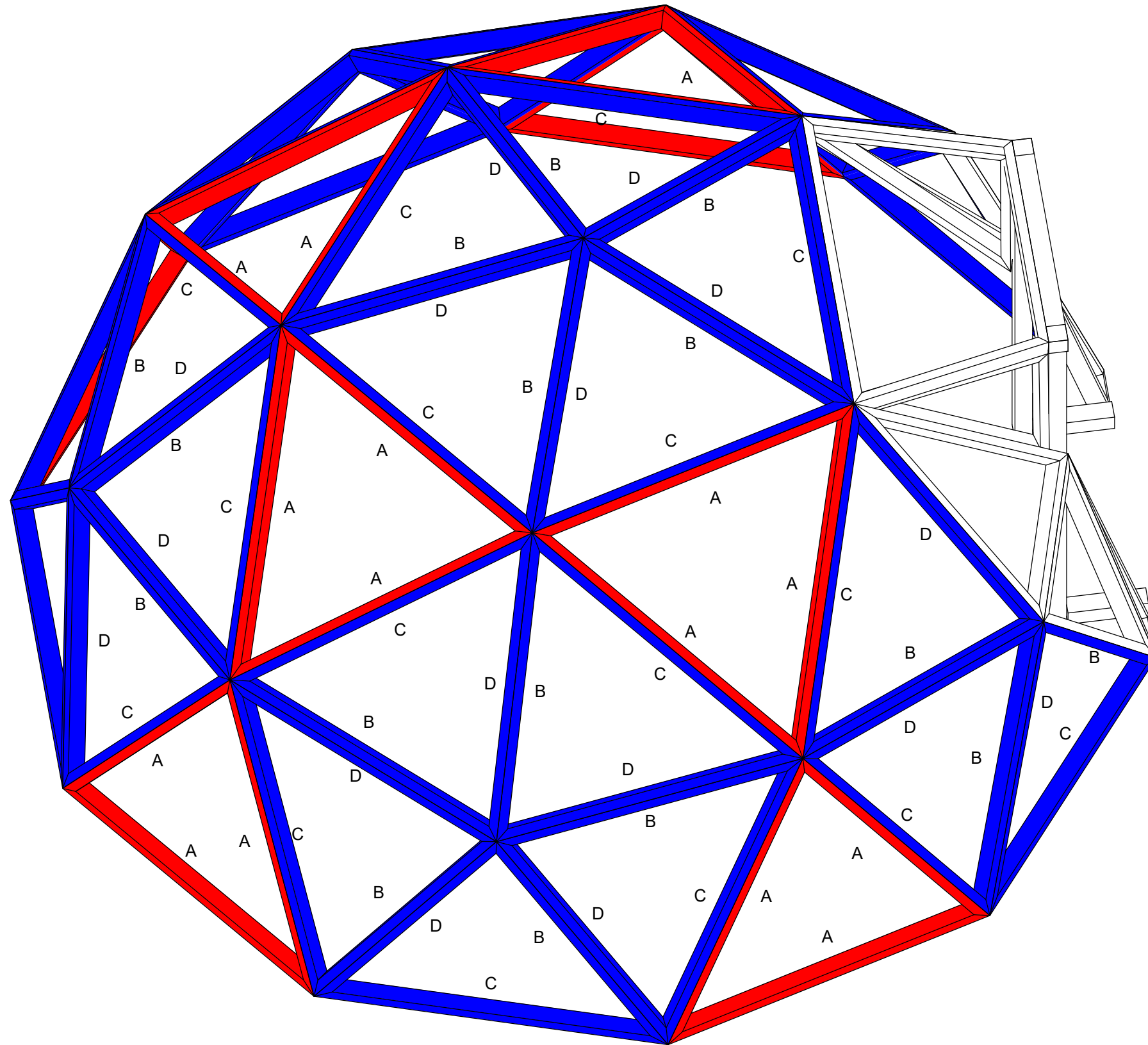


TRIÁNGULO Nº 1

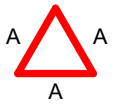


TRIÁNGULO Nº 2

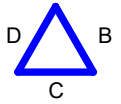




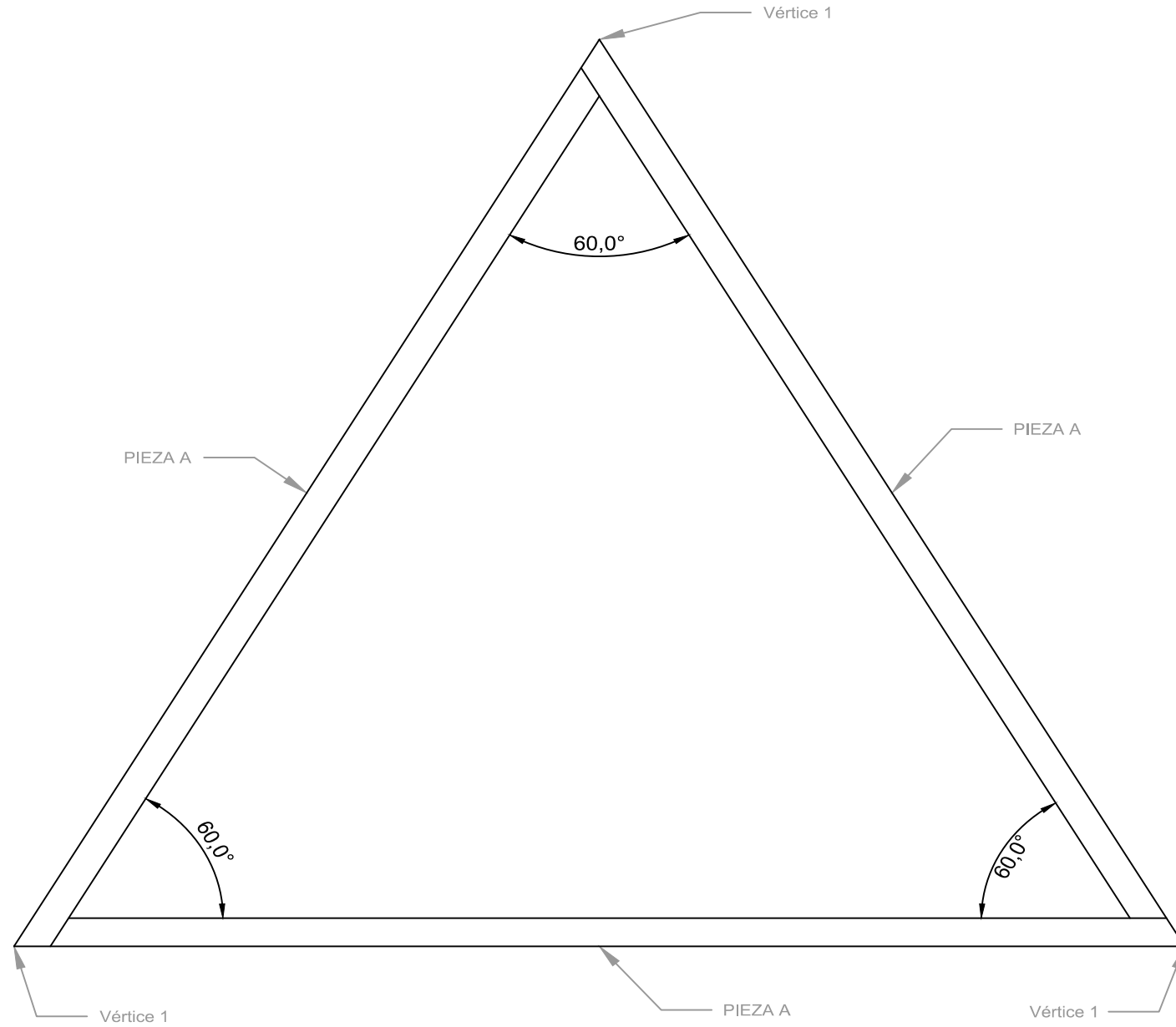
TRIÁNGULO Nº 1



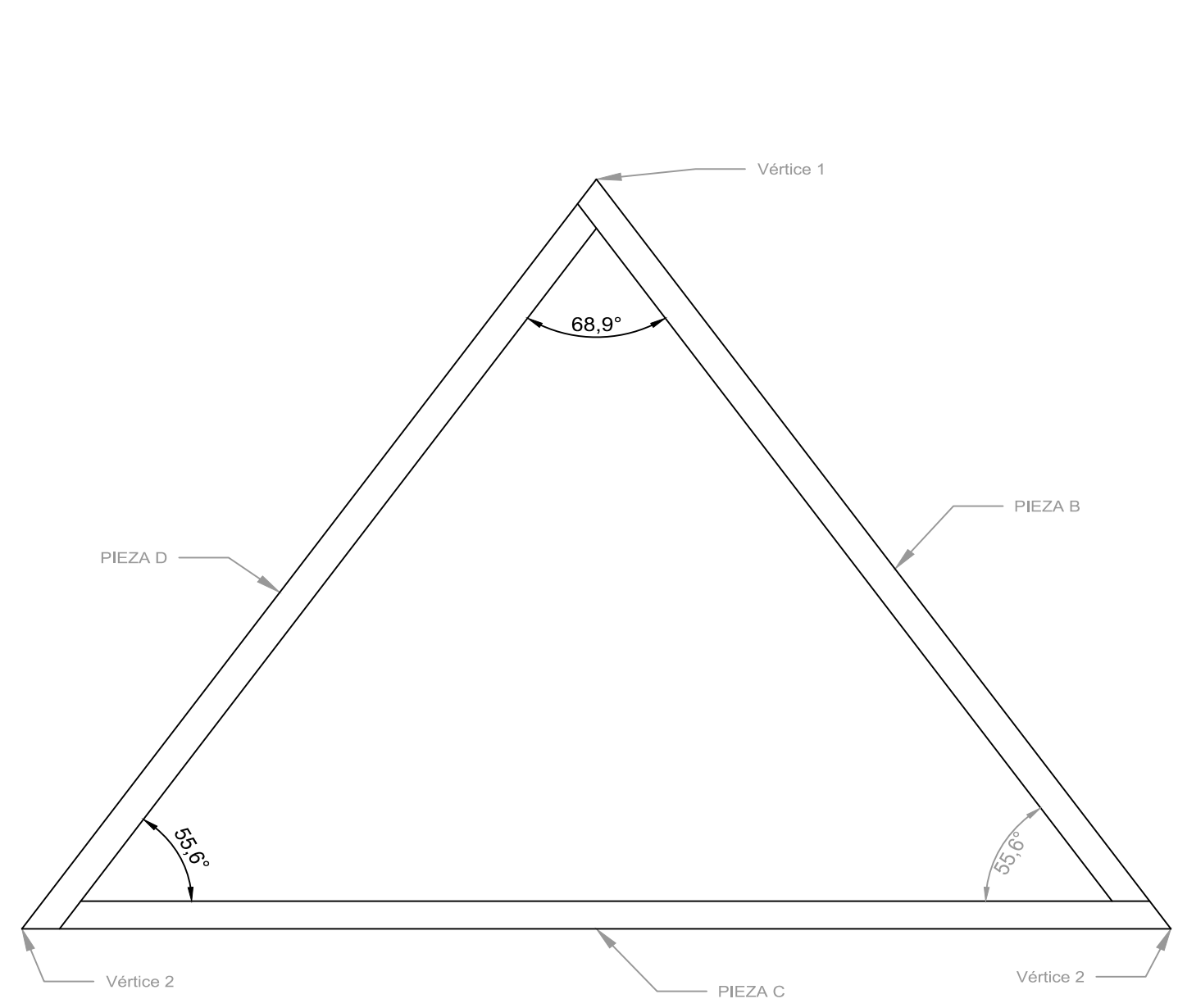
TRIÁNGULO Nº 2



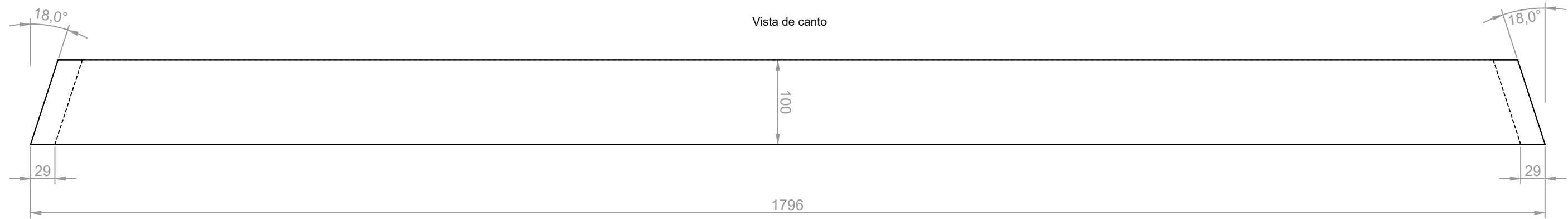
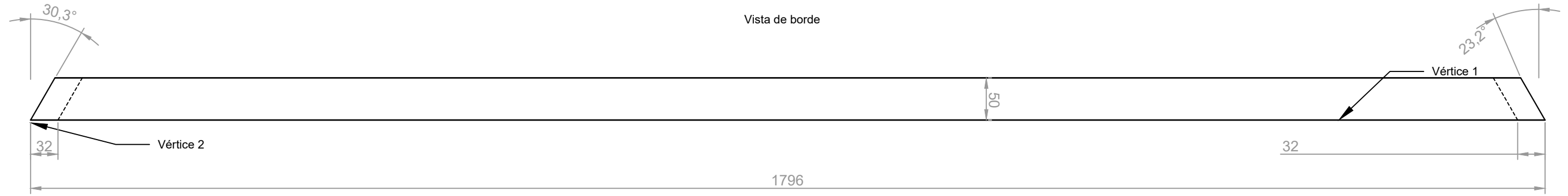
TRIÁNGULO N°1
20 PIEZAS



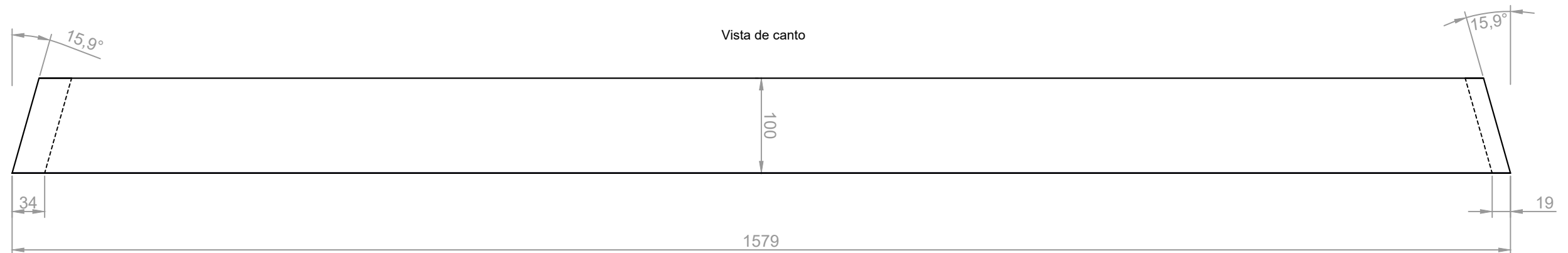
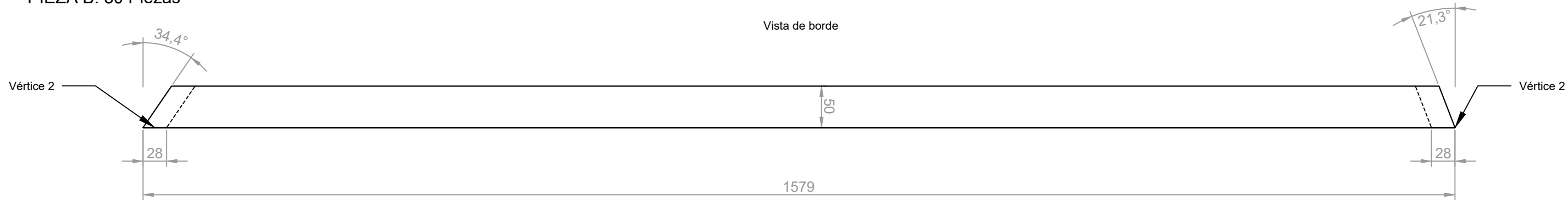
TRIÁNGULO N°2
30 PIEZAS



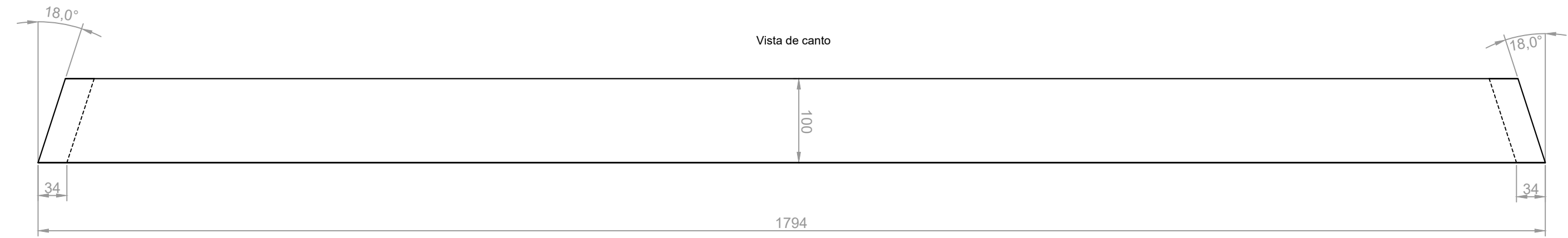
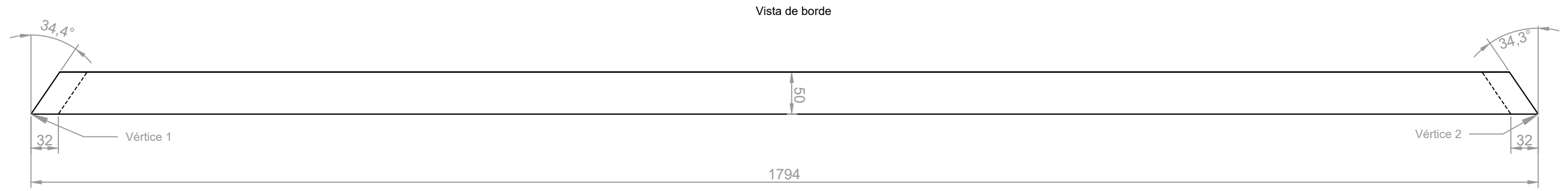
PIEZA A: 60 Piezas



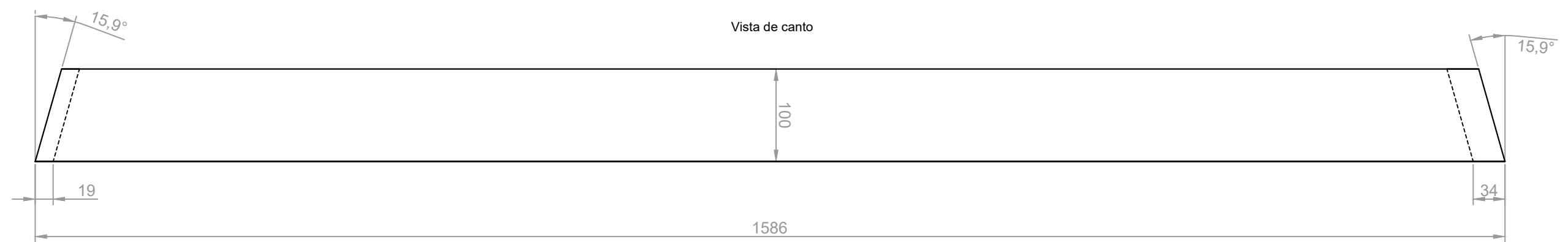
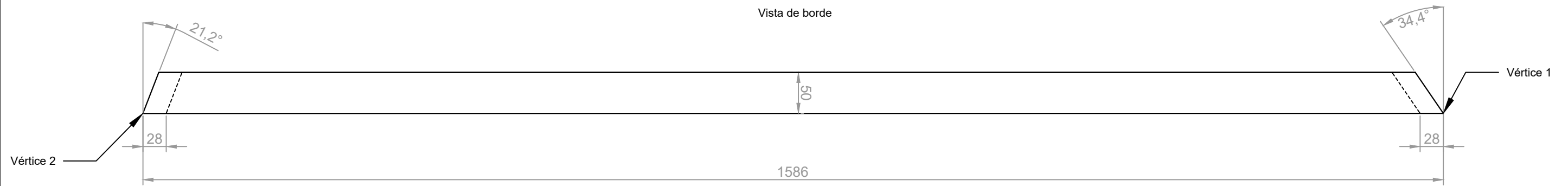
PIEZA B: 30 Piezas

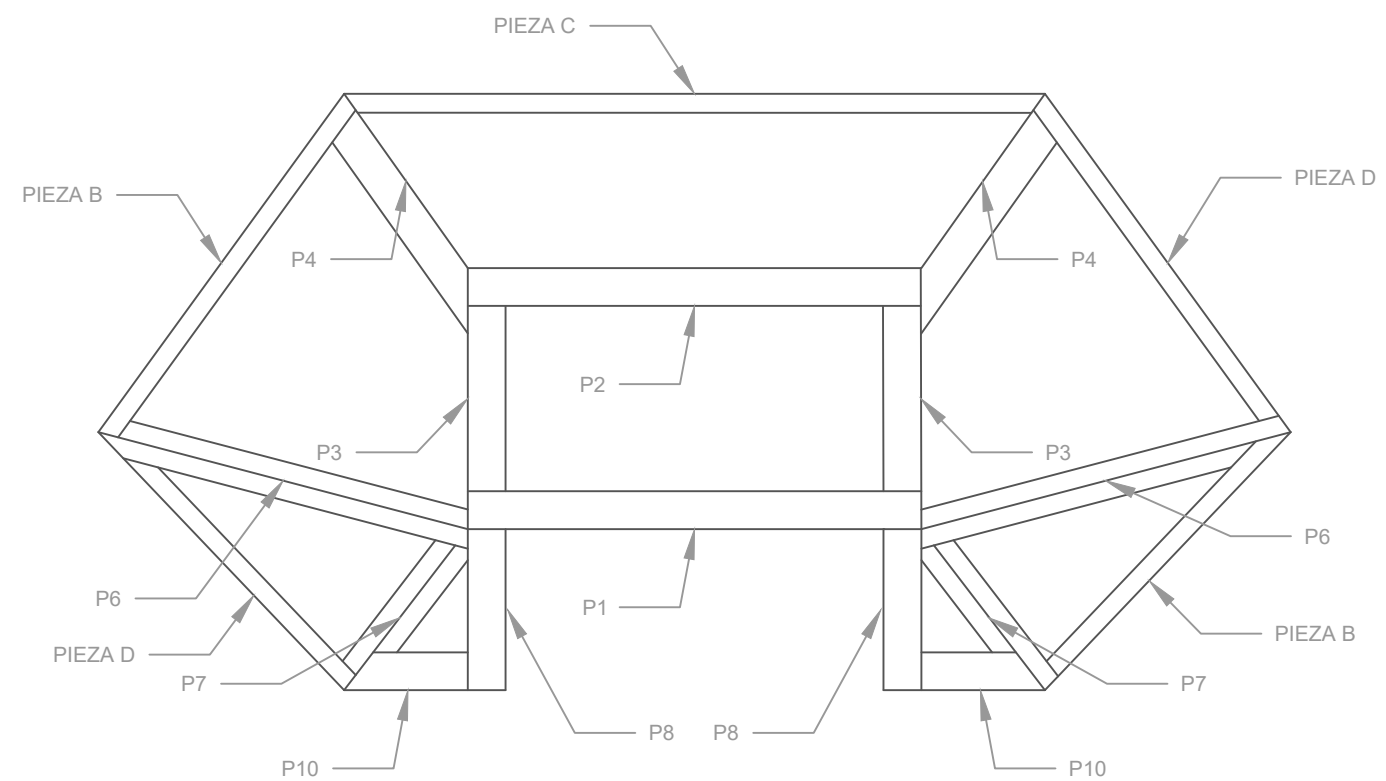
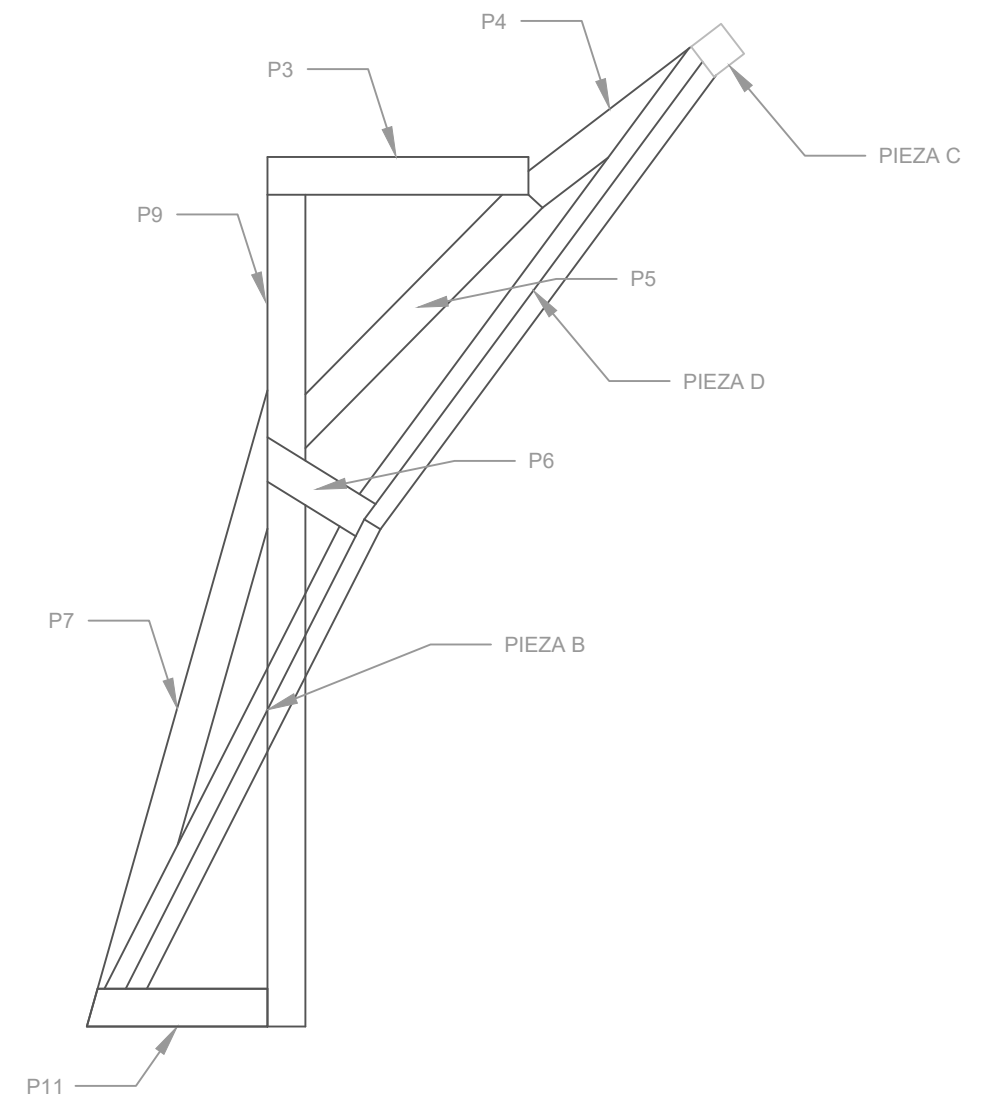
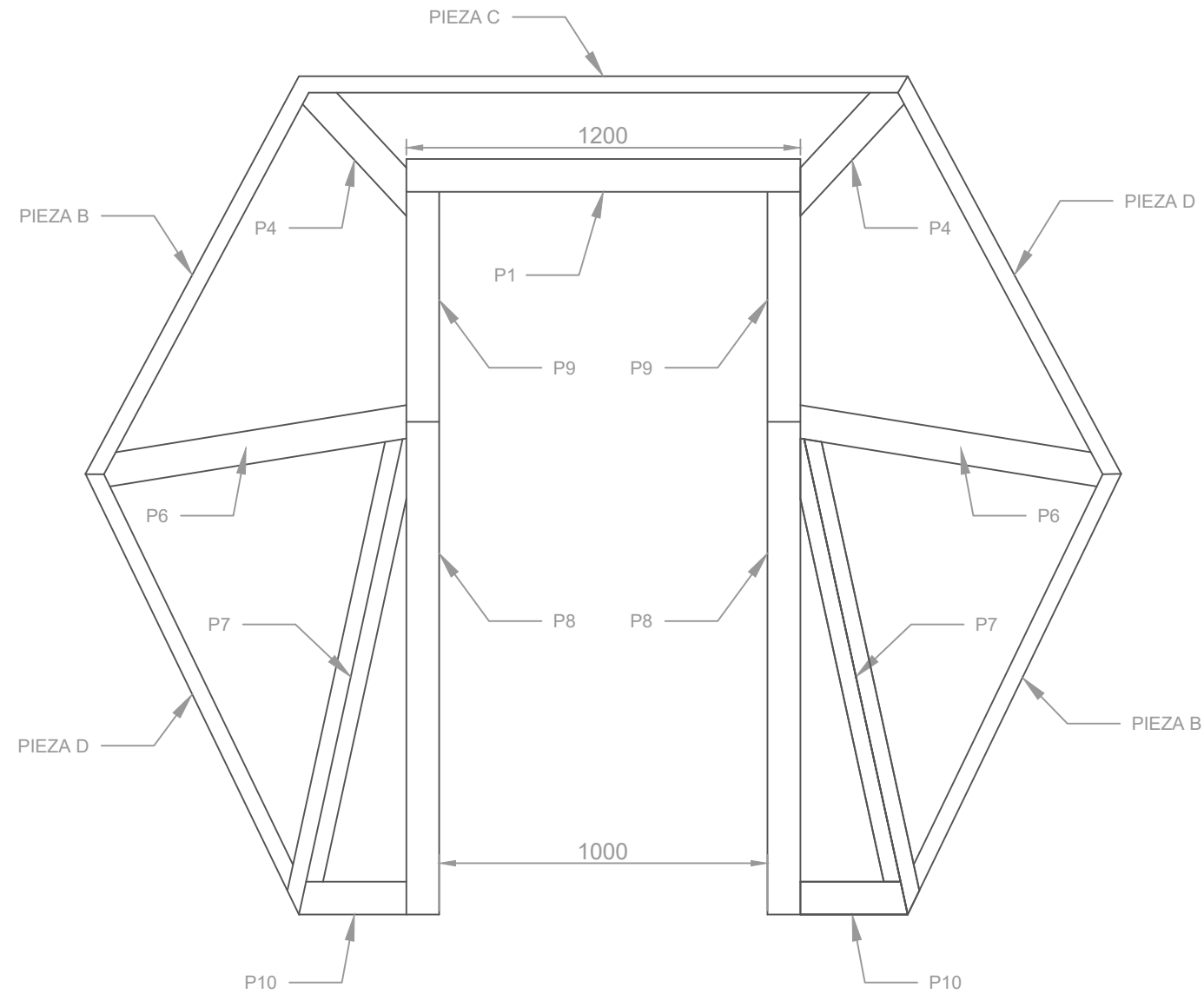


PIEZA C: 30 Piezas

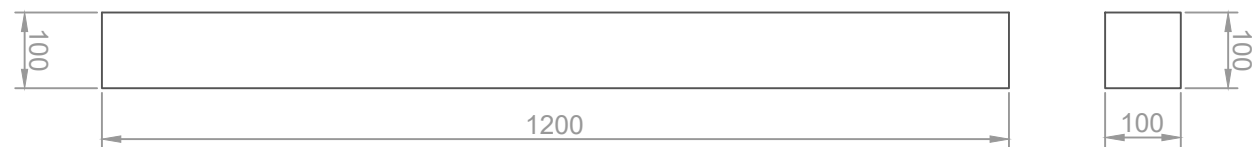


PIEZA D: 30 Piezas





PIEZAS: P1 y P3



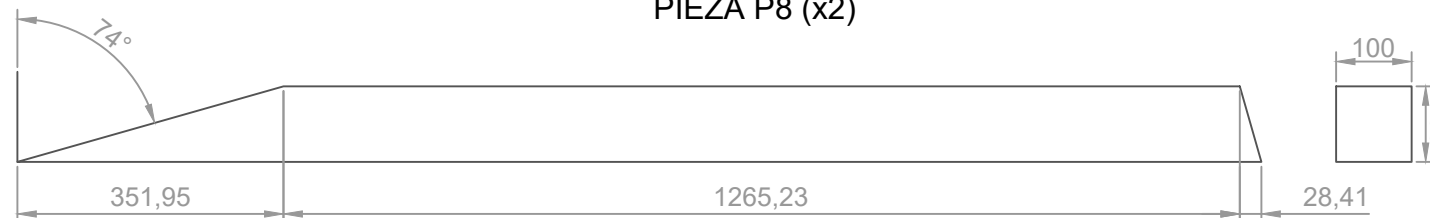
PIEZA P9 (x2)



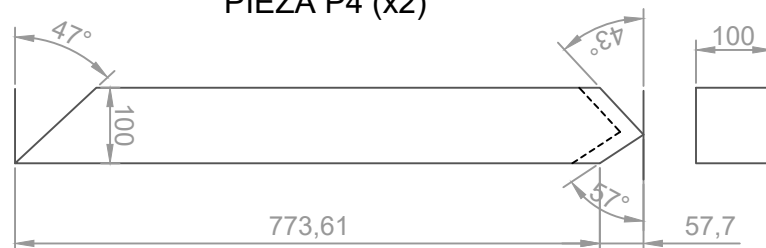
PIEZA P2 (x2)



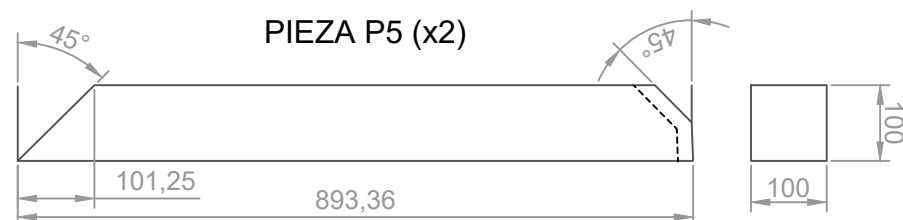
PIEZA P8 (x2)



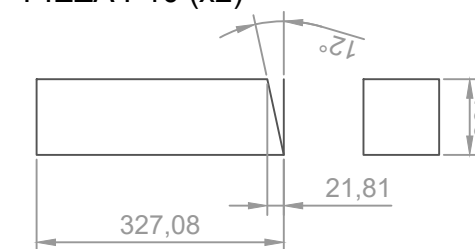
PIEZA P4 (x2)



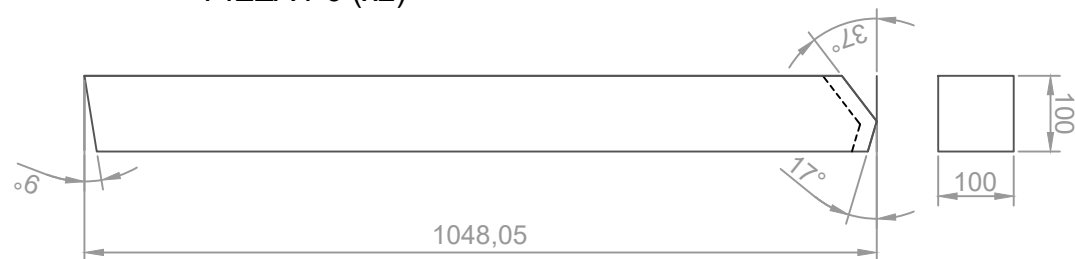
PIEZA P5 (x2)



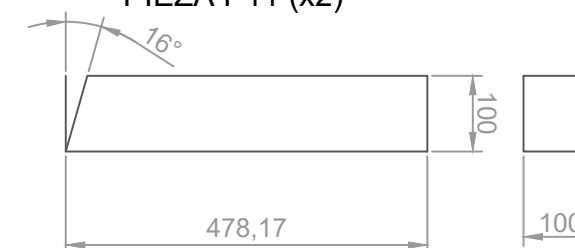
PIEZA P10 (x2)



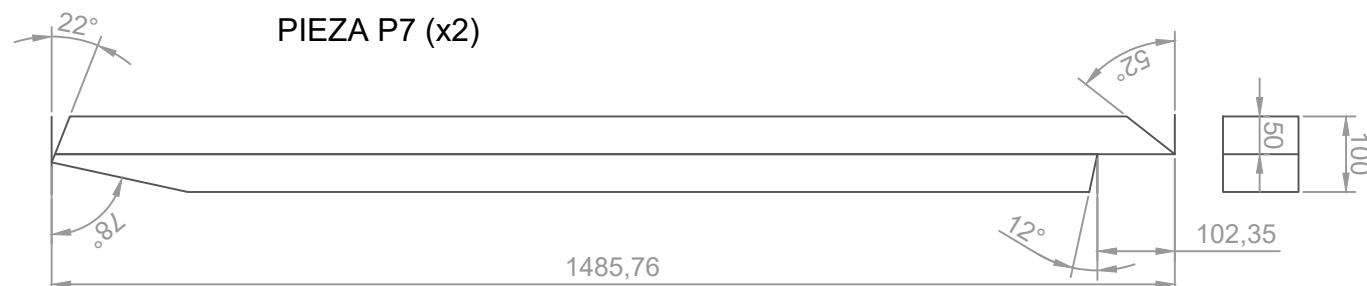
PIEZA P6 (x2)



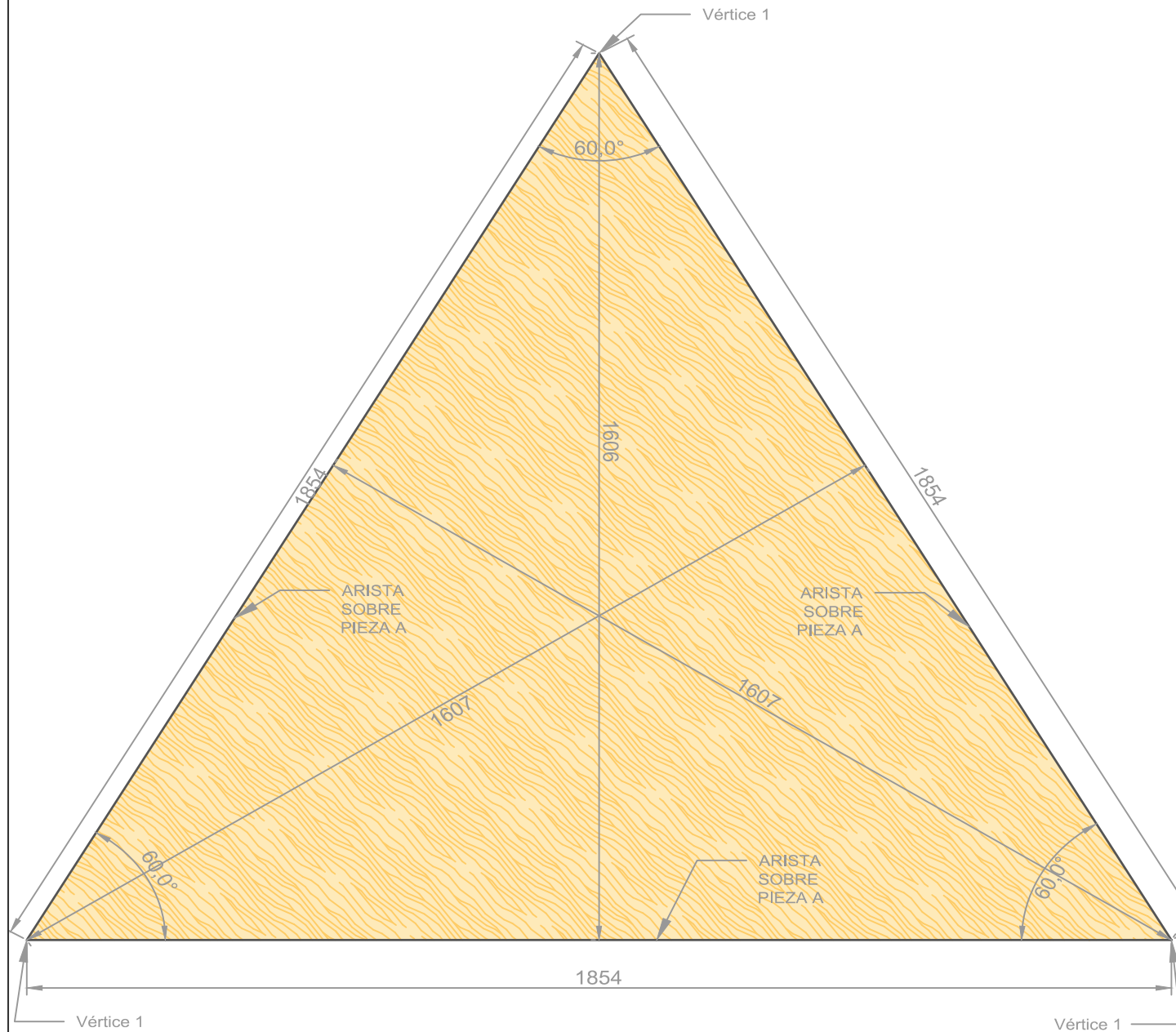
PIEZA P11 (x2)



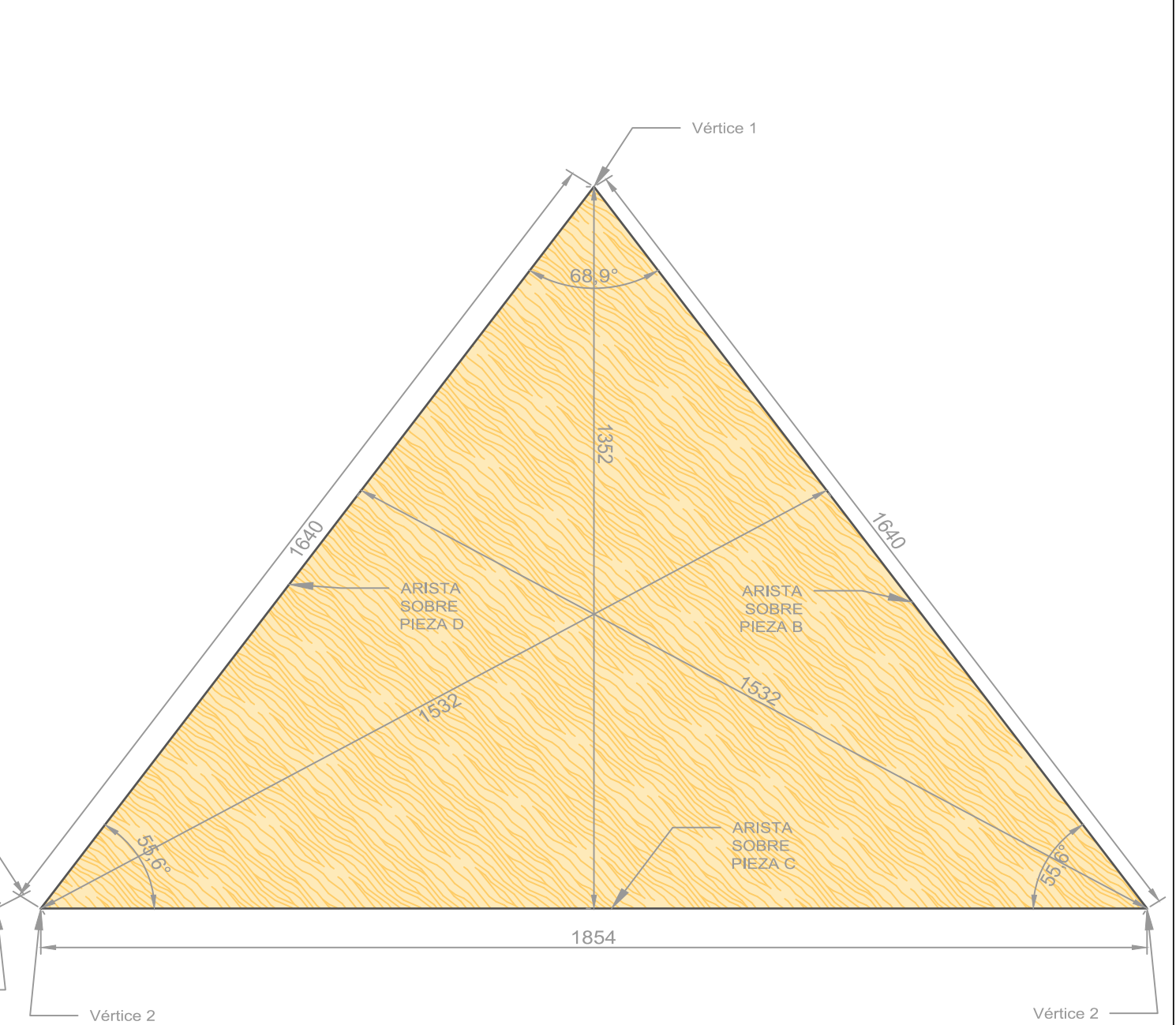
PIEZA P7 (x2)



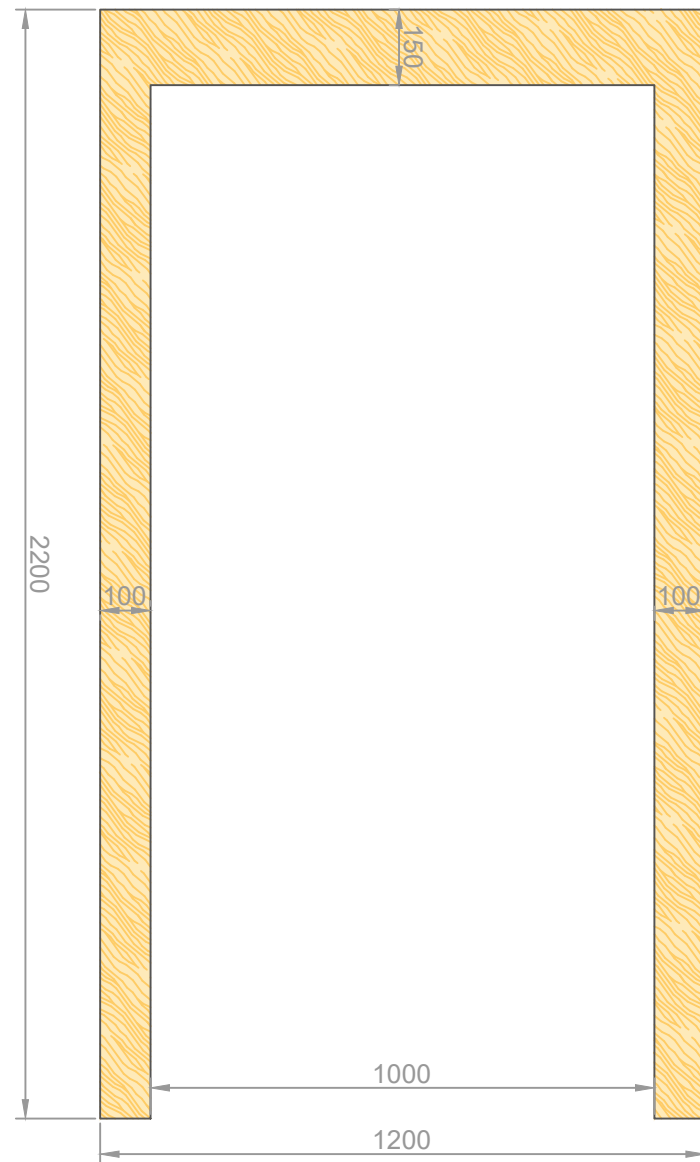
TABLERO OSB Nº1
30 PIEZAS



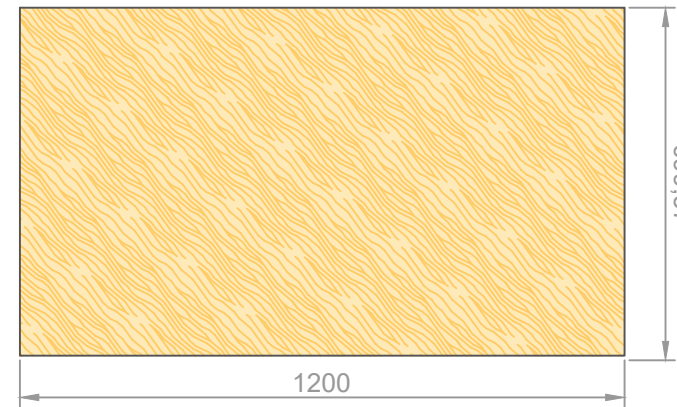
TABLERO OSB Nº2
30 PIEZAS



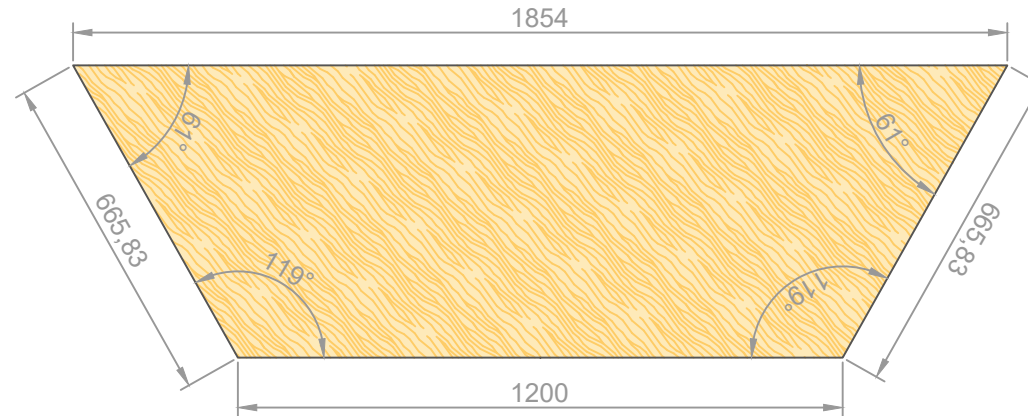
PIEZA DE TABLERO
FRONTAL PUERTA



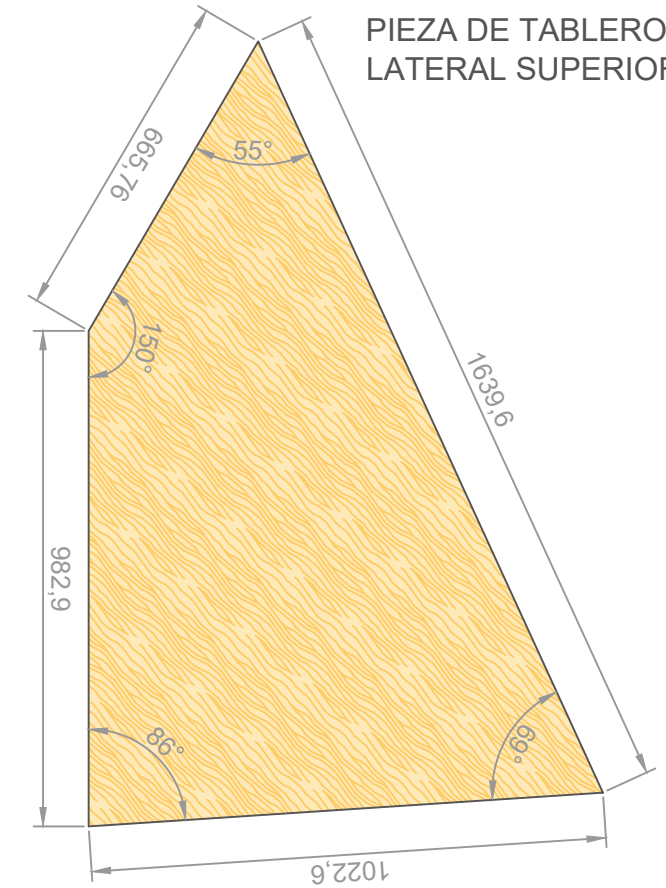
PIEZA DE TABLERO
SOBRE DINTEL



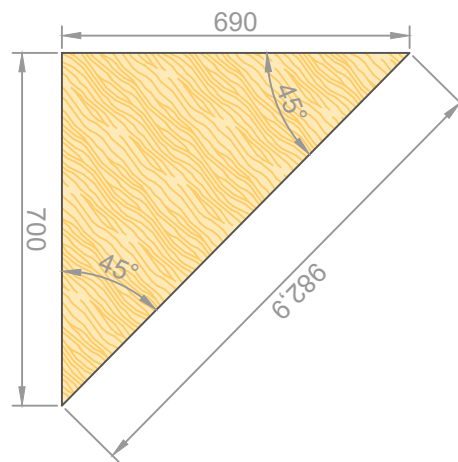
PIEZA DE TABLERO
PIEZA CENTRAL SOBRE DOMO



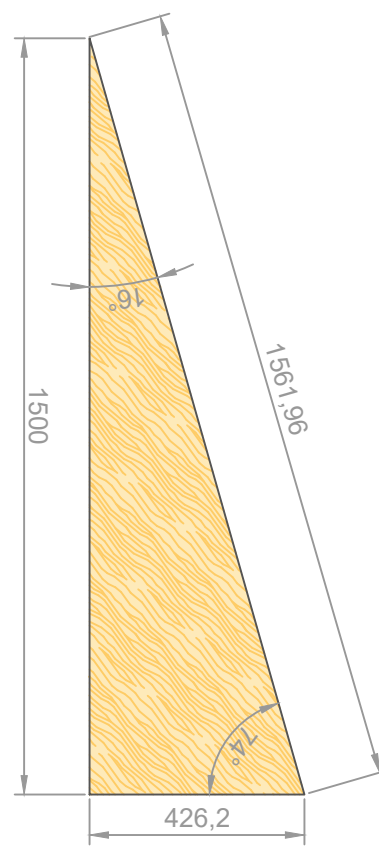
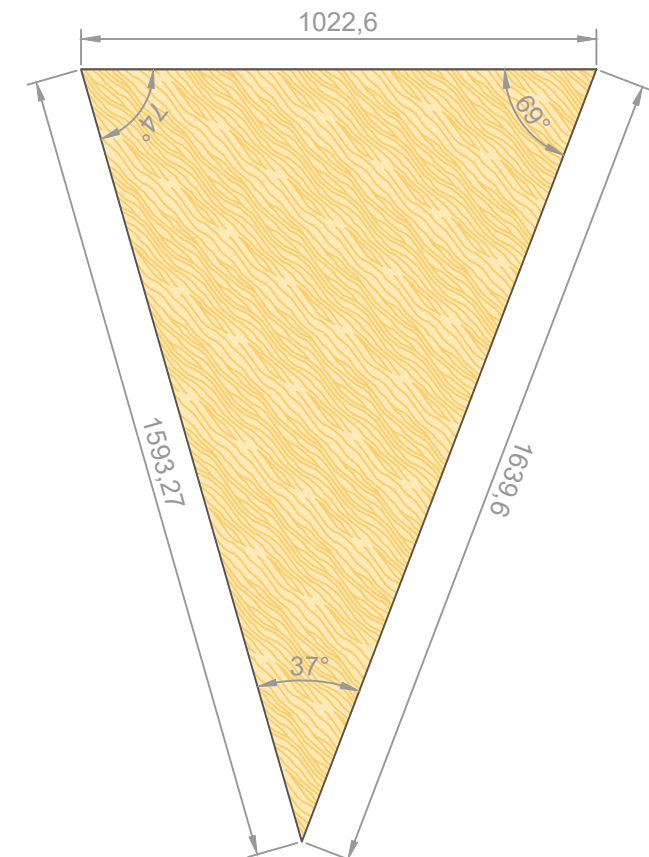
PIEZA DE TABLERO (X2)
LATERAL SUPERIOR



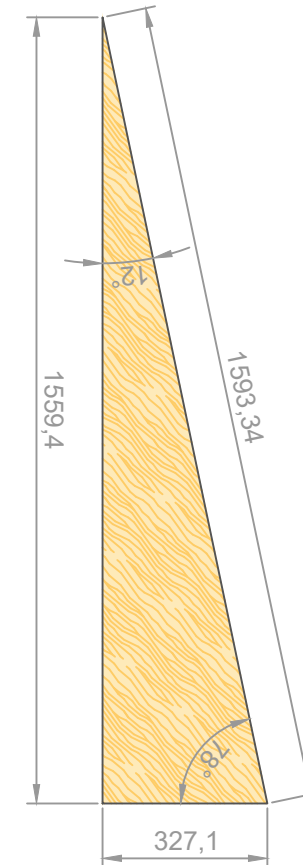
PIEZA DE TABLERO (X2)
FRONTAL PUERTA



PIEZA DE TABLERO (X2)
LATERAL INTERMEDIA

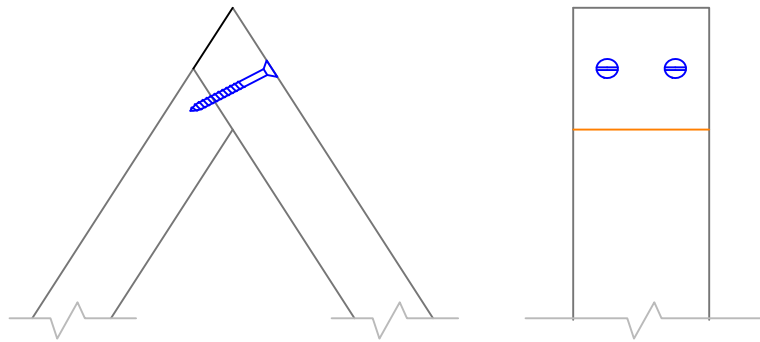


PIEZA DE TABLERO
INTERIOR PUERTA (x2)



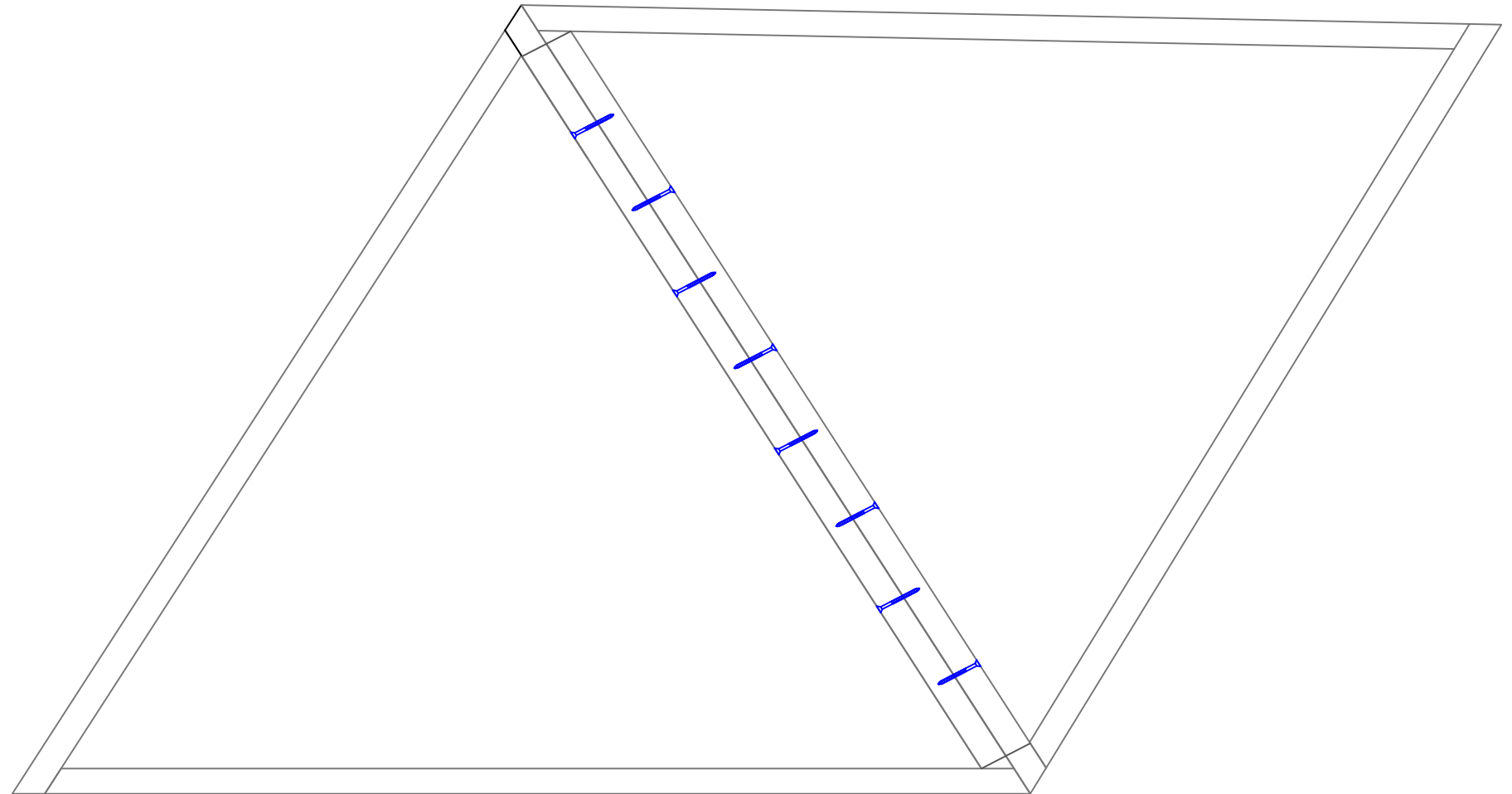
PIEZA DE TABLERO
LATERAL INFERIOR (X2)

VISTA UNIONES MONTAJE DE TRIÁNGULOS
Escala: 1:5

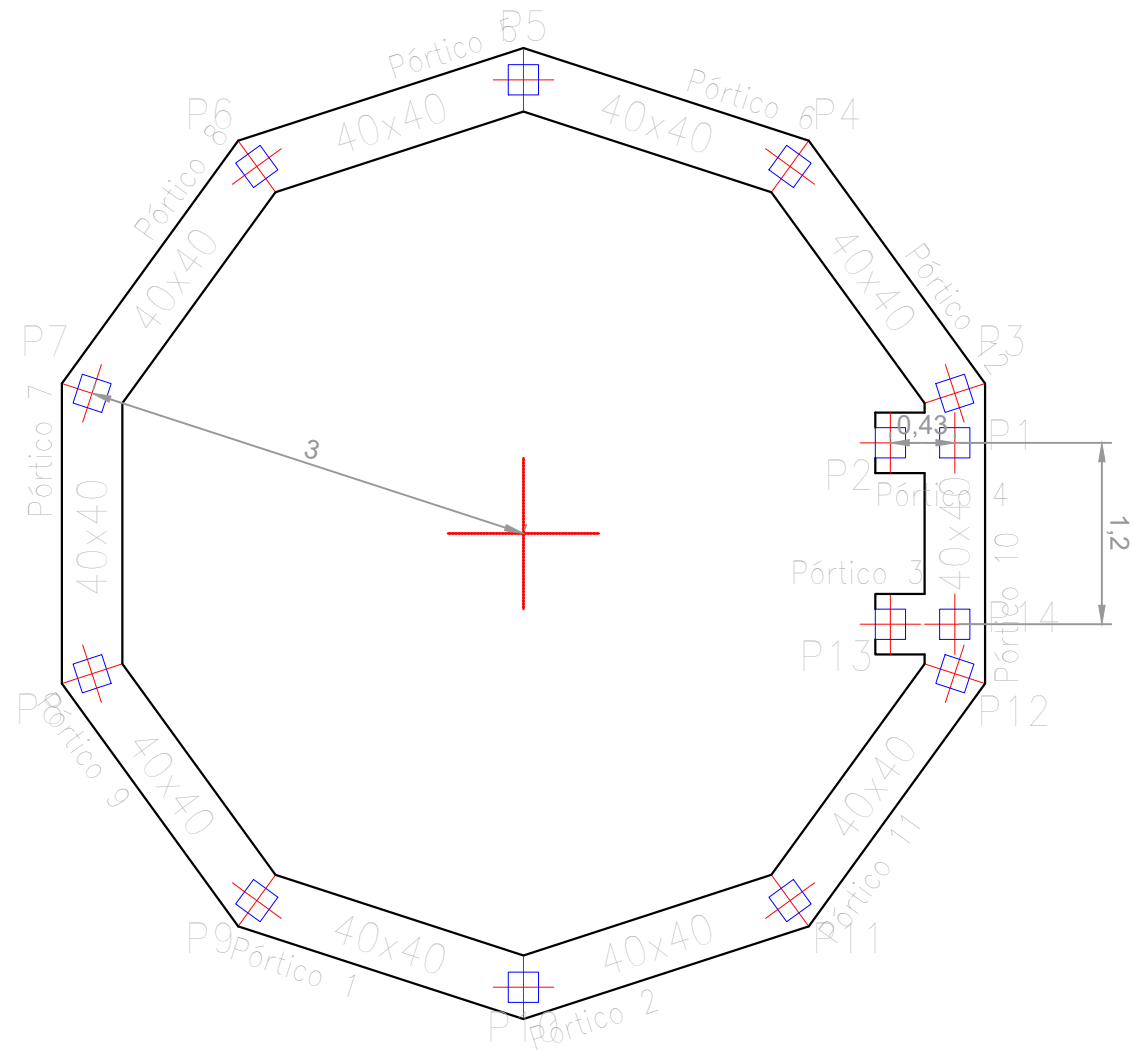


DATOS TORNILLERÍA		
MONTAJE DE TRIÁNGULOS		
Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro	8	mm
Ancho de la cabeza	16	mm
Longitud	7	cm
Nº tirafondos por unión	2	-

VISTA UNIONES ENTRE TRIÁNGULOS
Escala: 1:10



DATOS TORNILLERÍA		
UNIÓN ENTRE TRIÁNGULOS		
Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro	6	mm
Ancho de la cabeza	12	mm
Longitud	8	cm
Nº tirafondos por unión	8	-



CUADRO DE CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

HORMIGON (Código Estructural)						ACERO EN BARRAS CORRUGADAS (Código Estructural)		
Elemento estructural	Tipo de hormigón	Nivel de control	Coefficiente minoración	Relación máx. agua / cemento	Contenido mínimo cemento	Elemento estructural	Tipo de acero	Coefficiente de minoración
Cimentación	HA-25/F/20/XC2	Estadístico	$\gamma_c = 1.50$	0.60	275 kg	Toda la obra	B 500 S	$\gamma_s = 1.15$



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER:
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos - Universitat Politècnica de València

AUTOR DEL PROYECTO:
IVÁN FRANCISCO ESQUER ROCH

Iván Esquer

ESCALA A3:
1:50
UNIDADES:
Metros

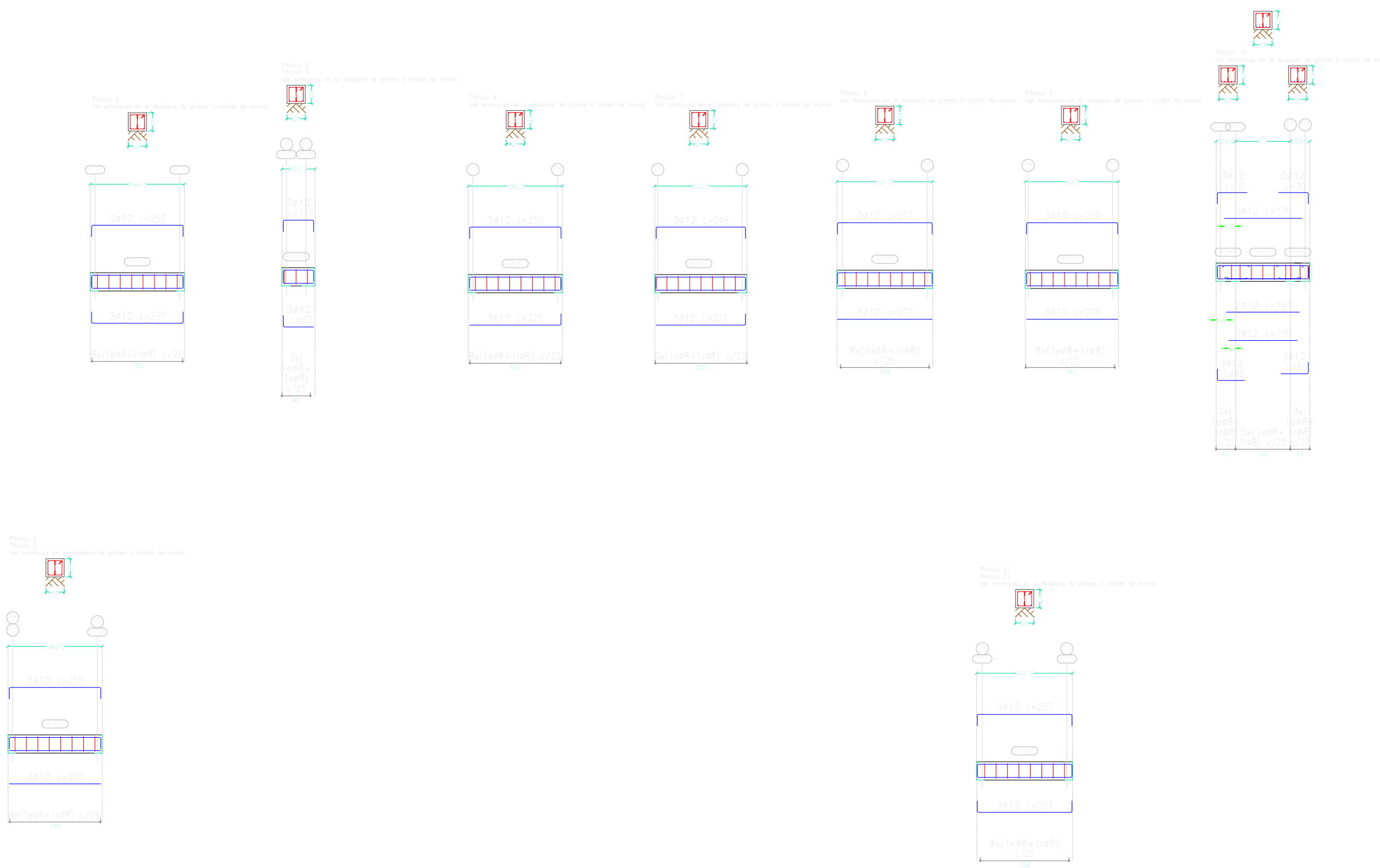
PROYECTO:
PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).

FECHA:
SEPT- 2022

TÍTULO DEL PLANO:
DOMO 2 C1/V2 Ø6m
CIMENTACIÓN
PLANTA CIMENTACIÓN

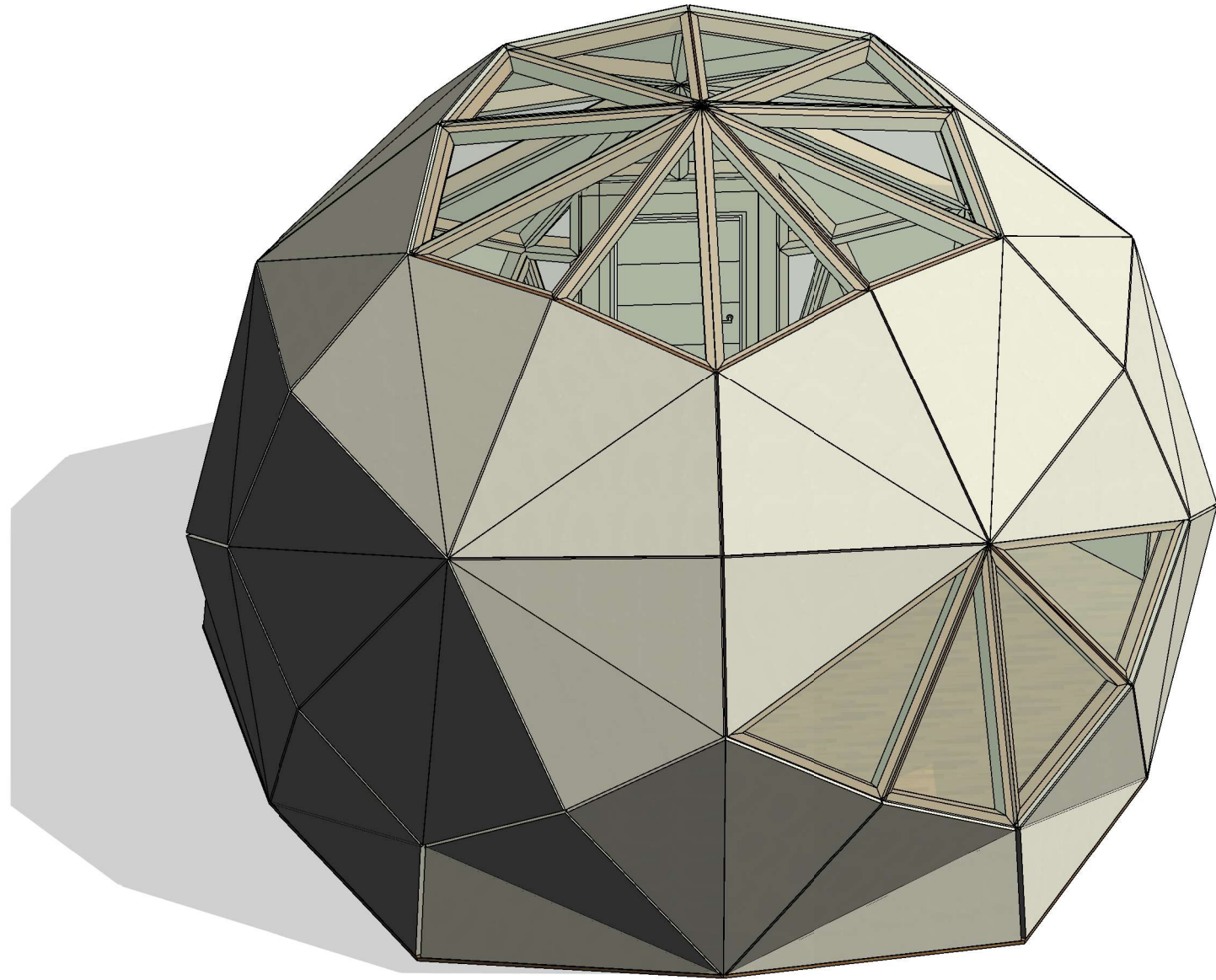
Nº DE PLANO:
02.09.01

HOJA 1 DE 1

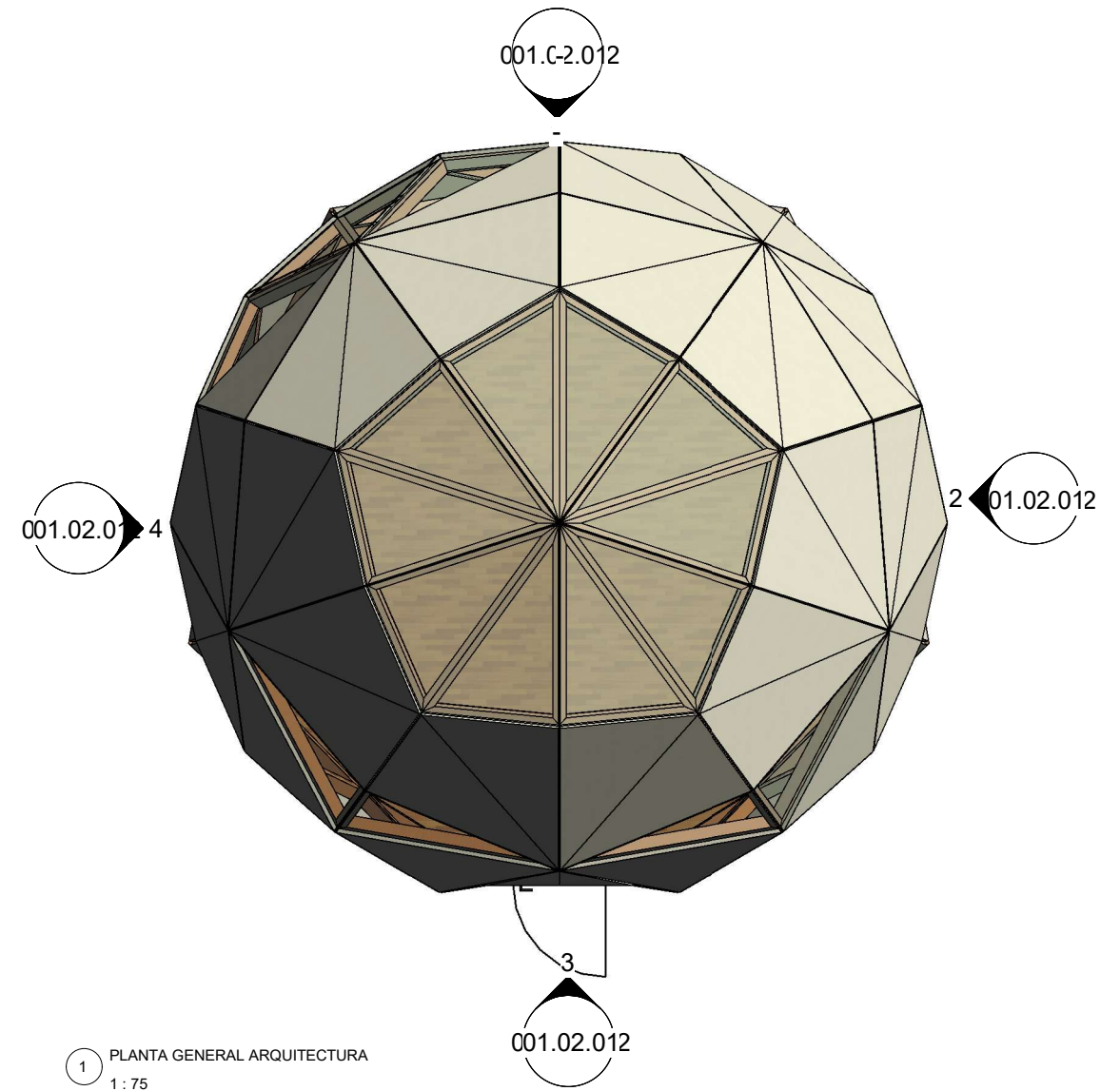


CUADRO DE CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES

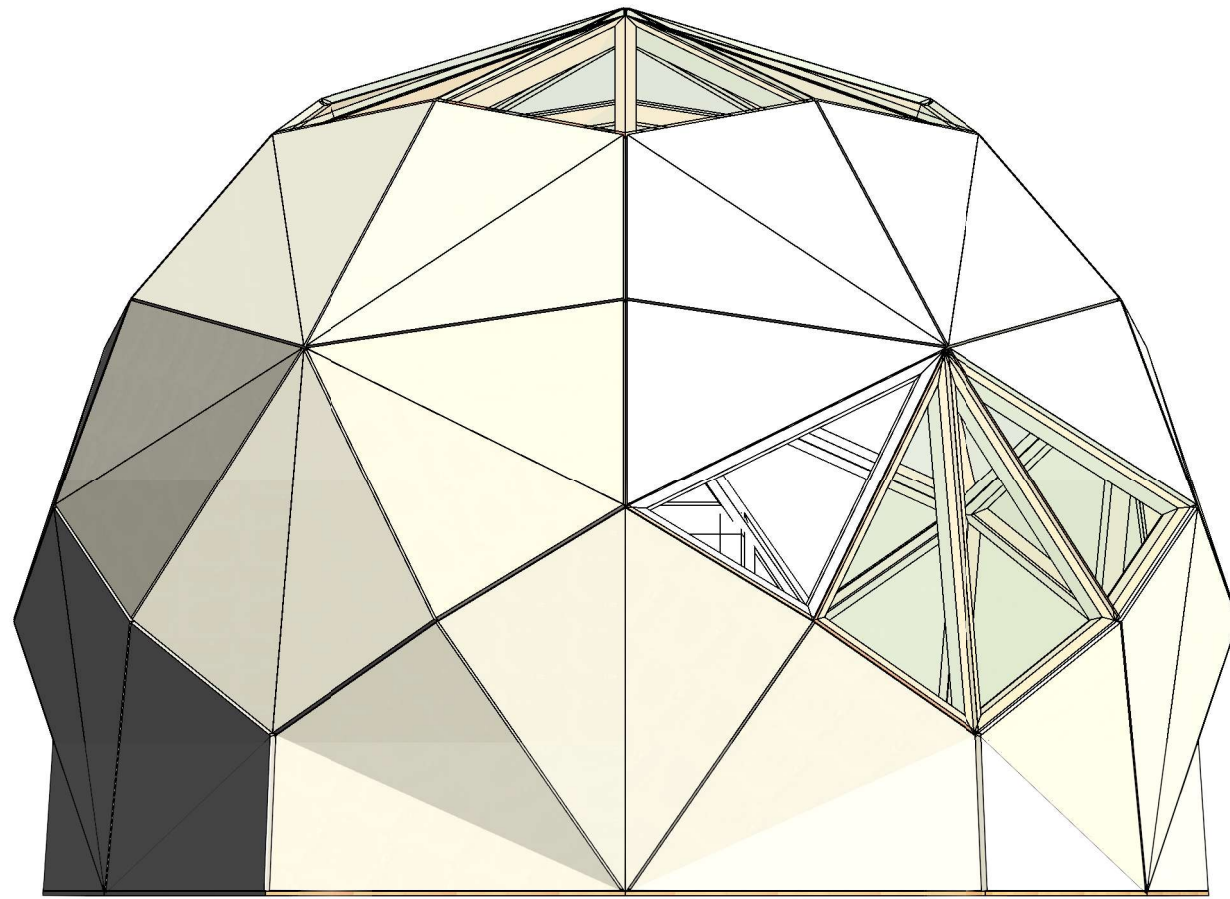
HORMIGON (Código Estructural)						ACERO EN BARRAS CORRUGADAS (Código Estructural)		
Elemento estructural	Tipo de hormigón	Nivel de control	Coefficiente minoración	Relación máx. agua / cemento	Contenido mínimo cemento	Elemento estructural	Tipo de acero	Coefficiente de minoración
Cimentación	HA-25/F/20/XC2	Estadístico	$\gamma_c = 1.50$	0.60	275 kg	Toda la obra	B 500 S	$\gamma_s = 1.15$



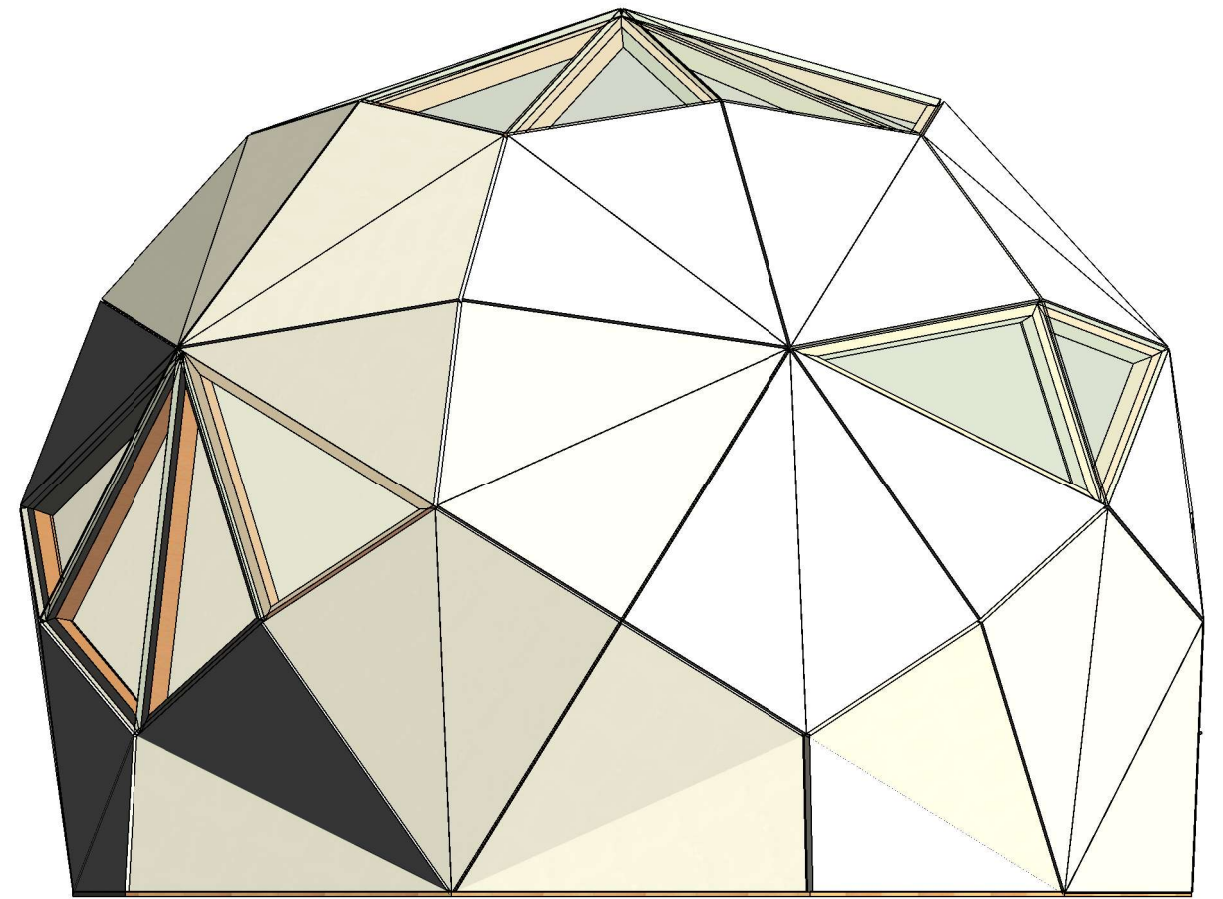
2 3D ARQUITECTURA



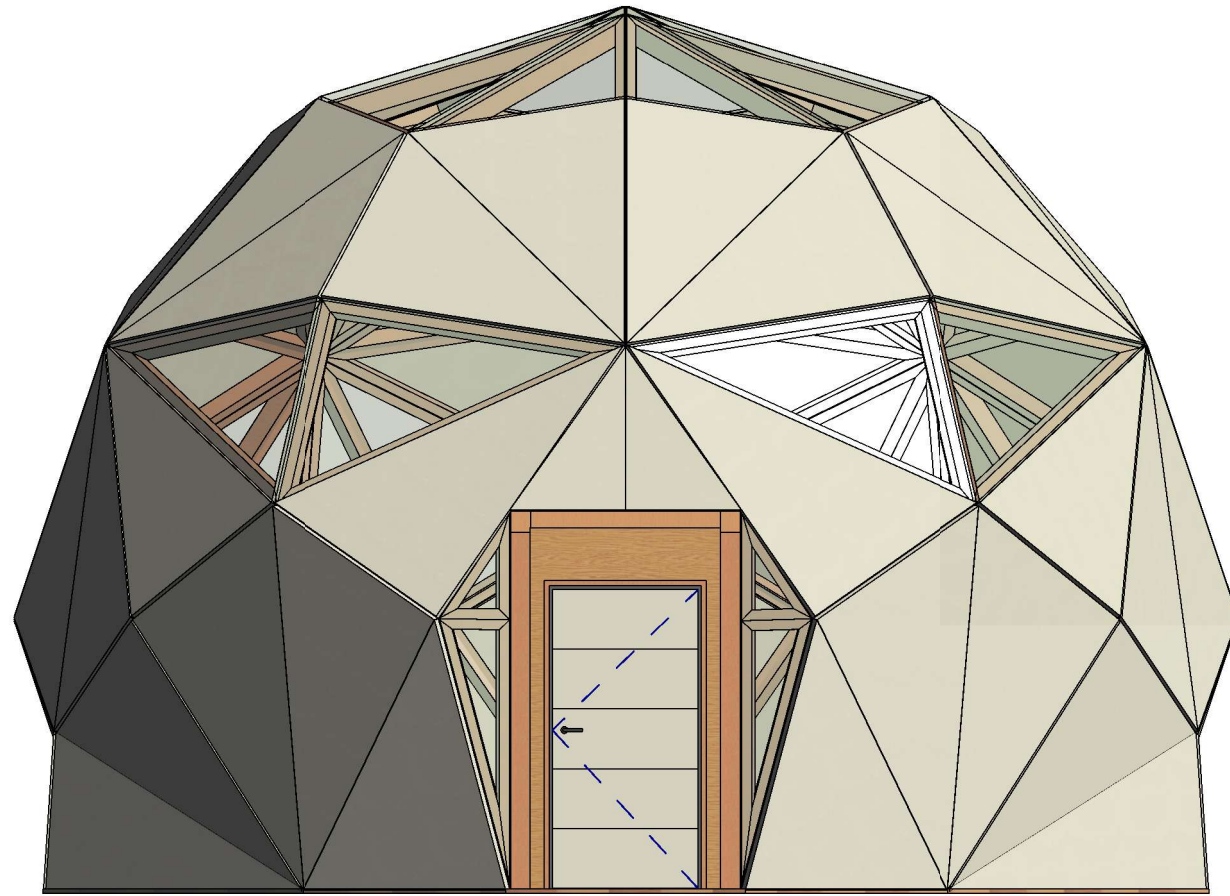
1 PLANTA GENERAL ARQUITECTURA
1:75



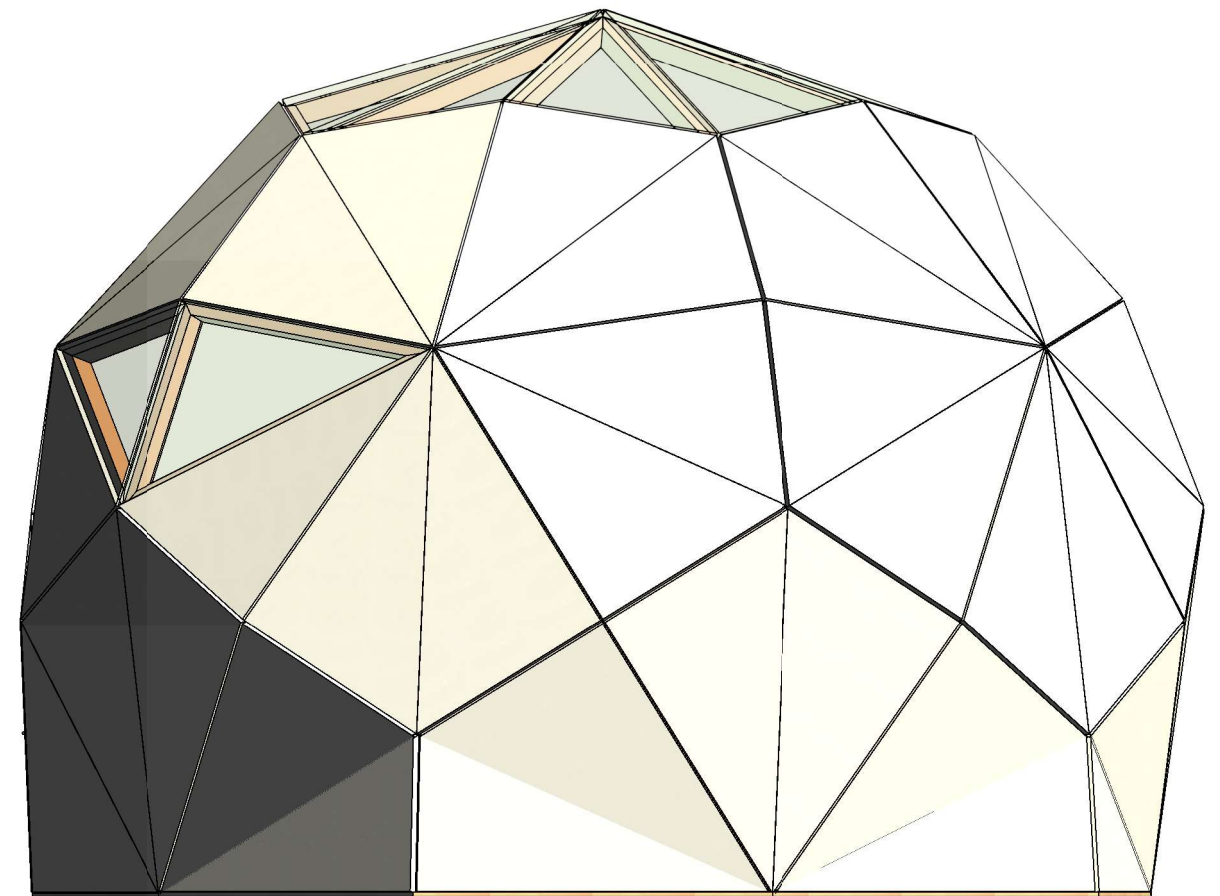
2 ALZADO DORSAL
1:50



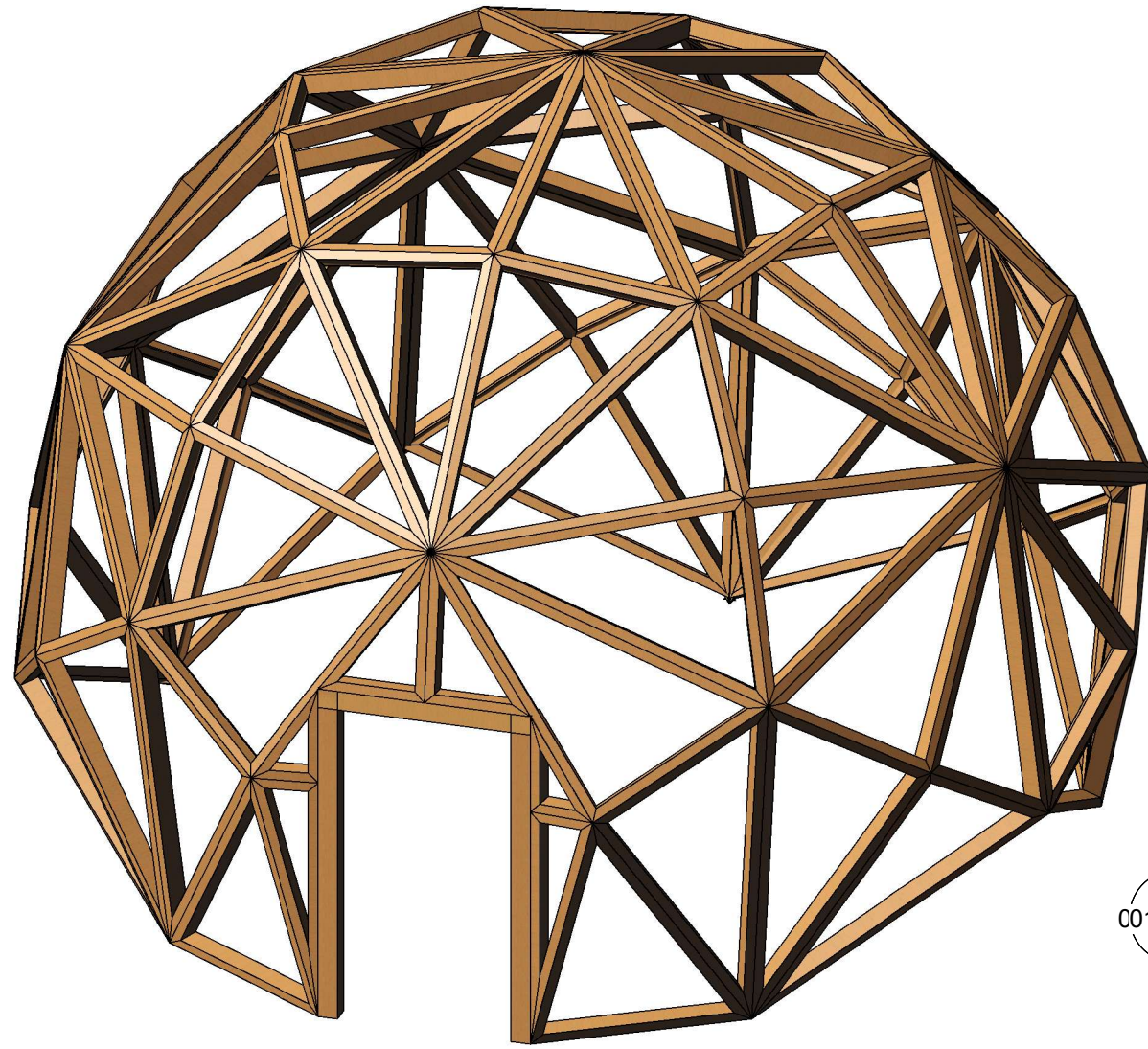
1 ALZADO LATERAL ESTE
1:50



4 ALZADO FRONTAL
1:50

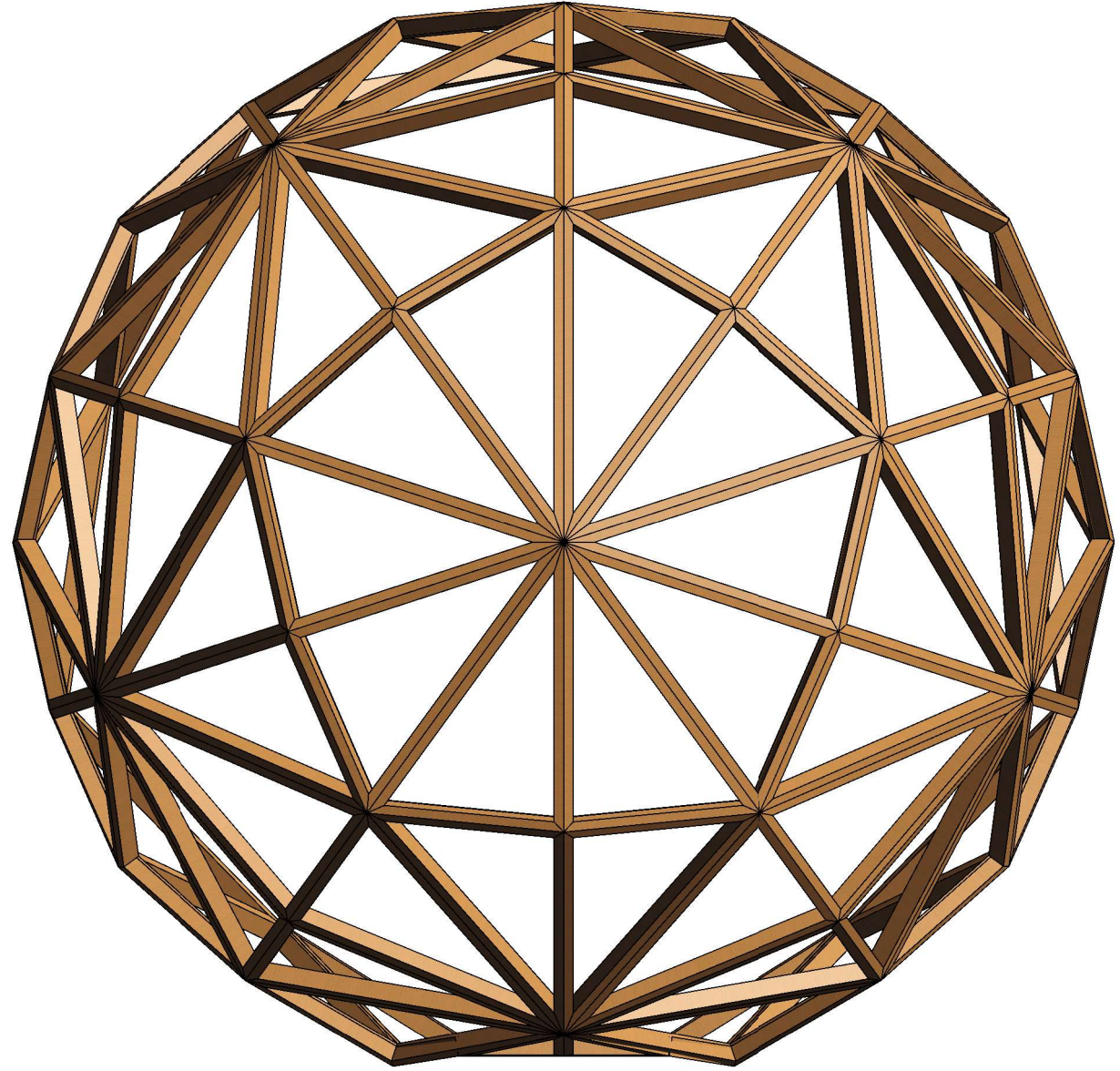


3 ALZADO LATERAL OESTE
1:50



1 3D ESTRUCTURA

001.02.012 4

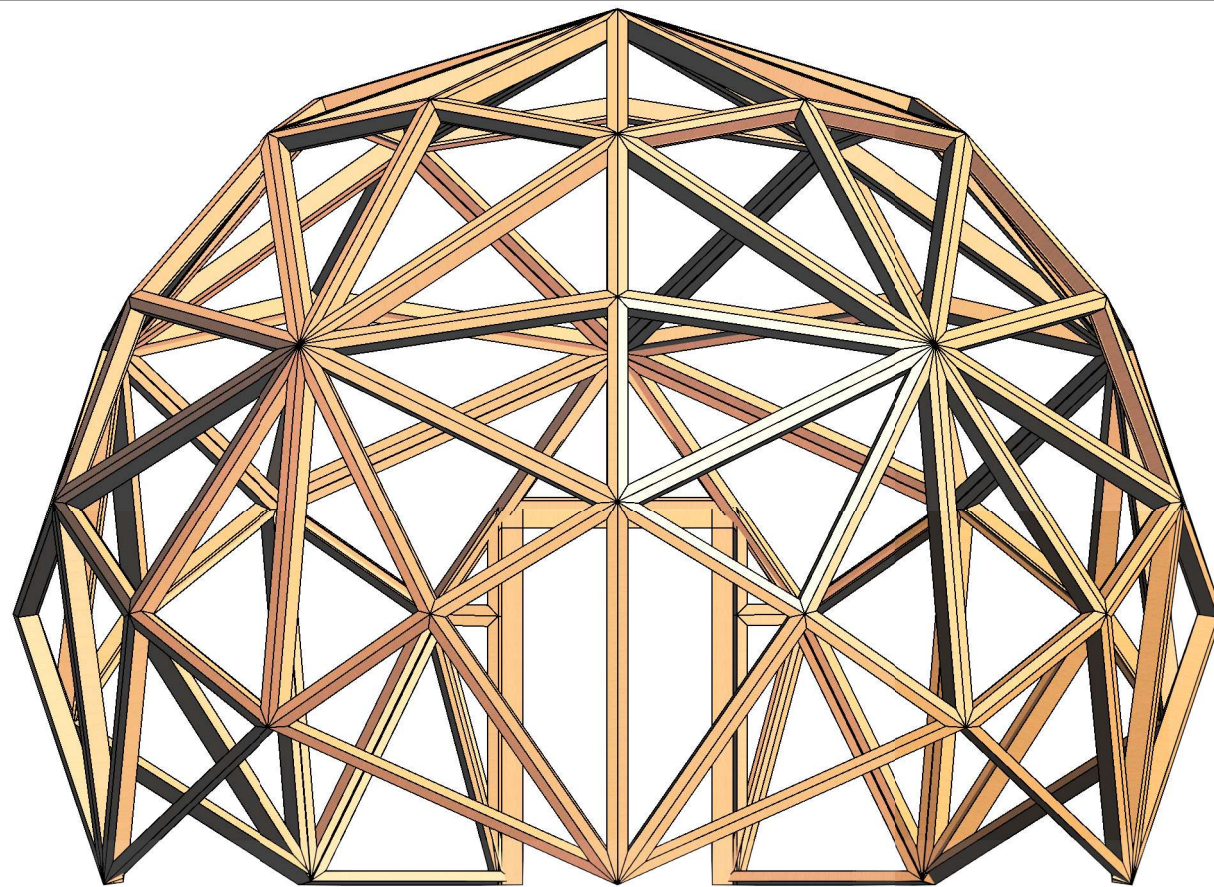


2 001.02.012

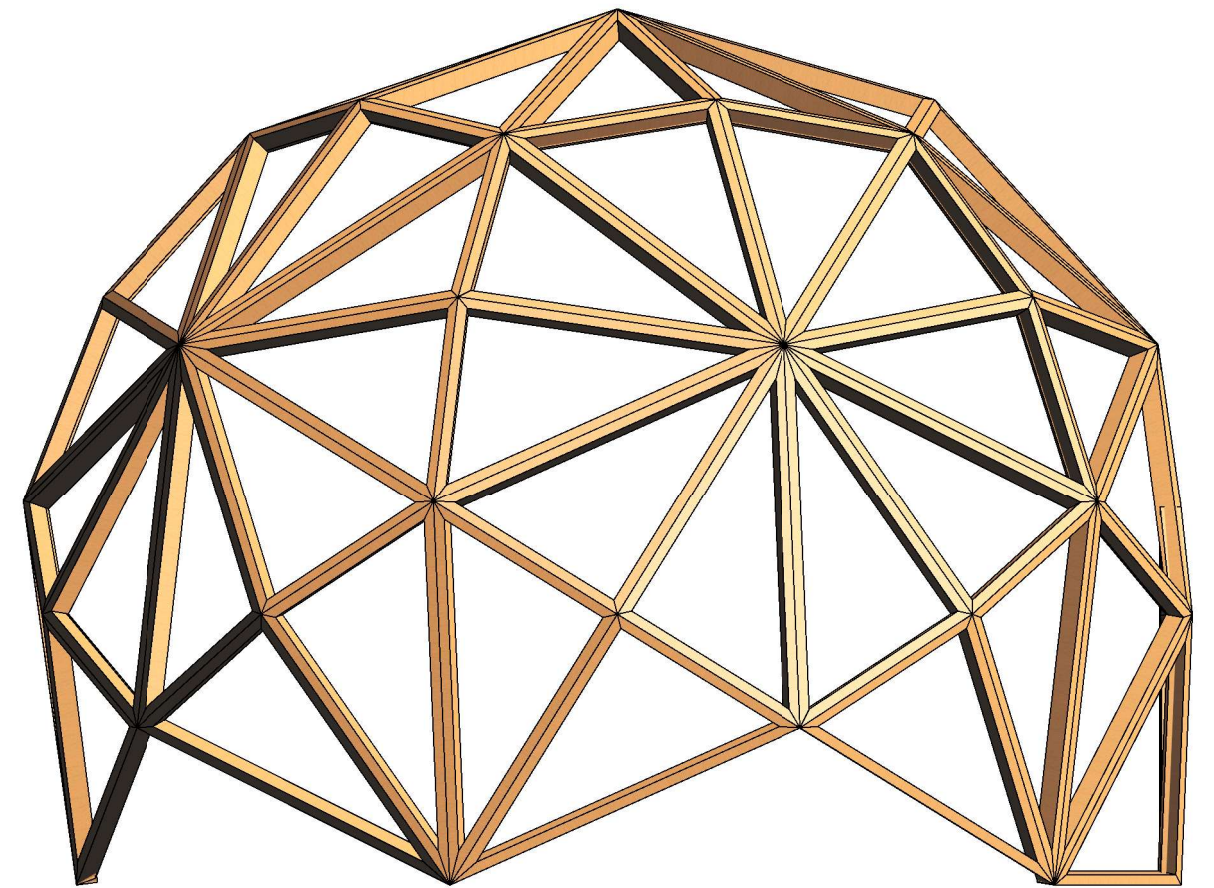
2 PLANTA GENERAL ESTRUCTURA
1:50

001.C-2.012

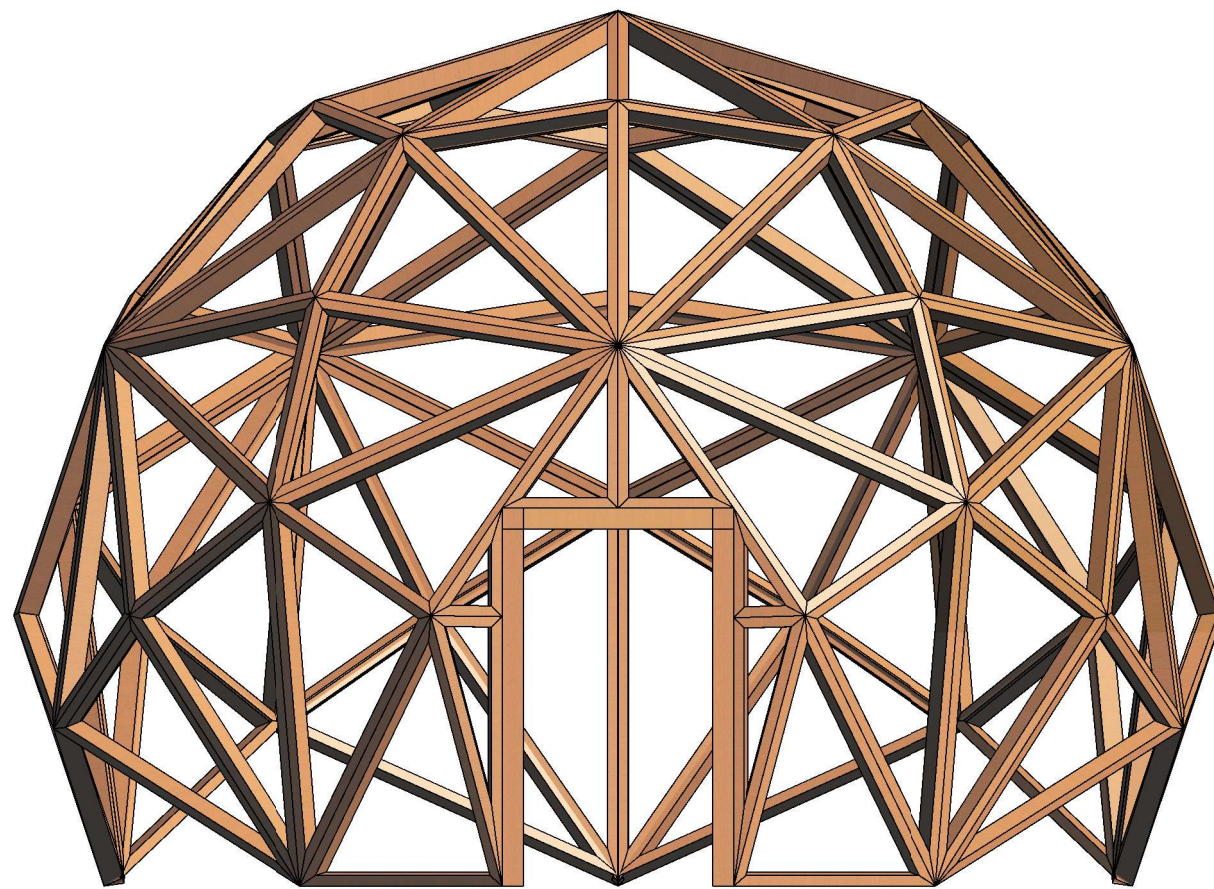
3
001.02.012



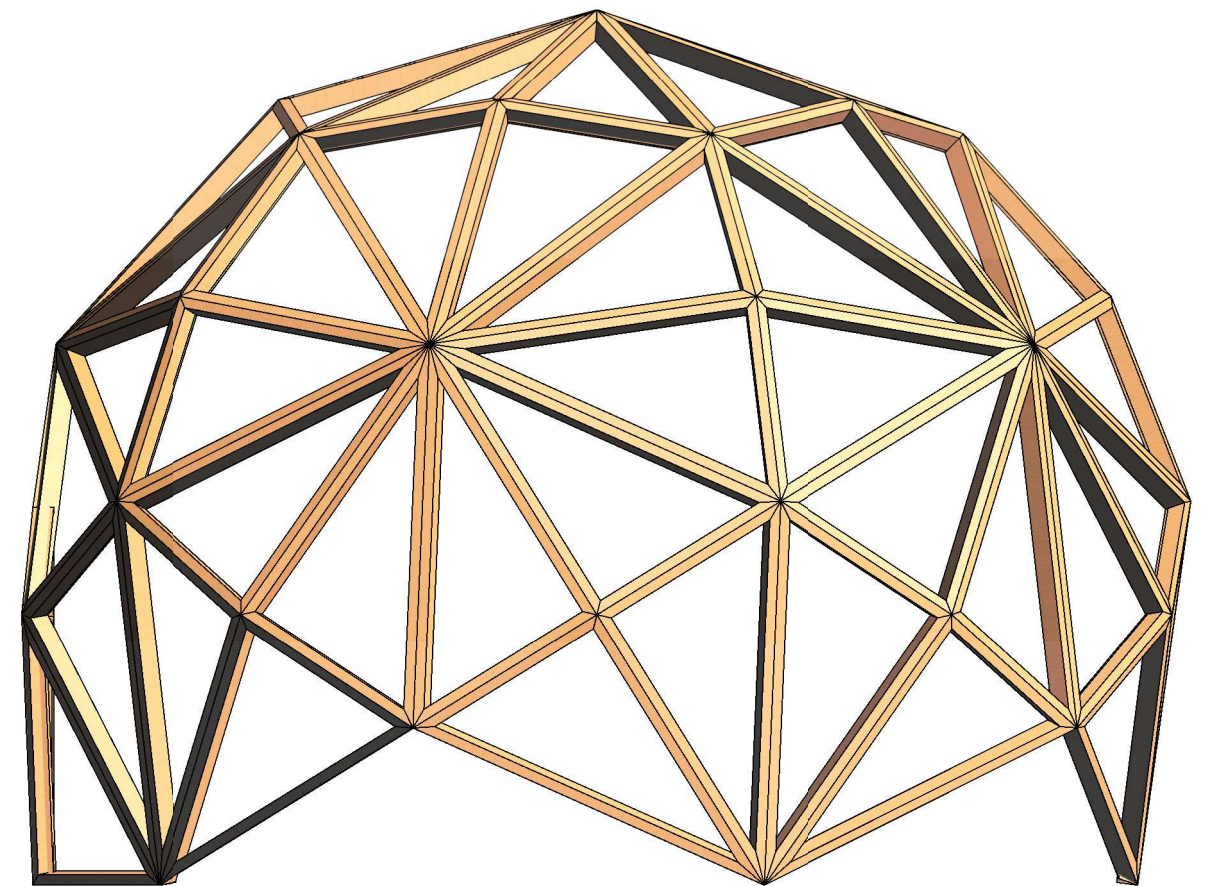
1 ALZADO DORSAL ESTRUCTURA
1 : 50



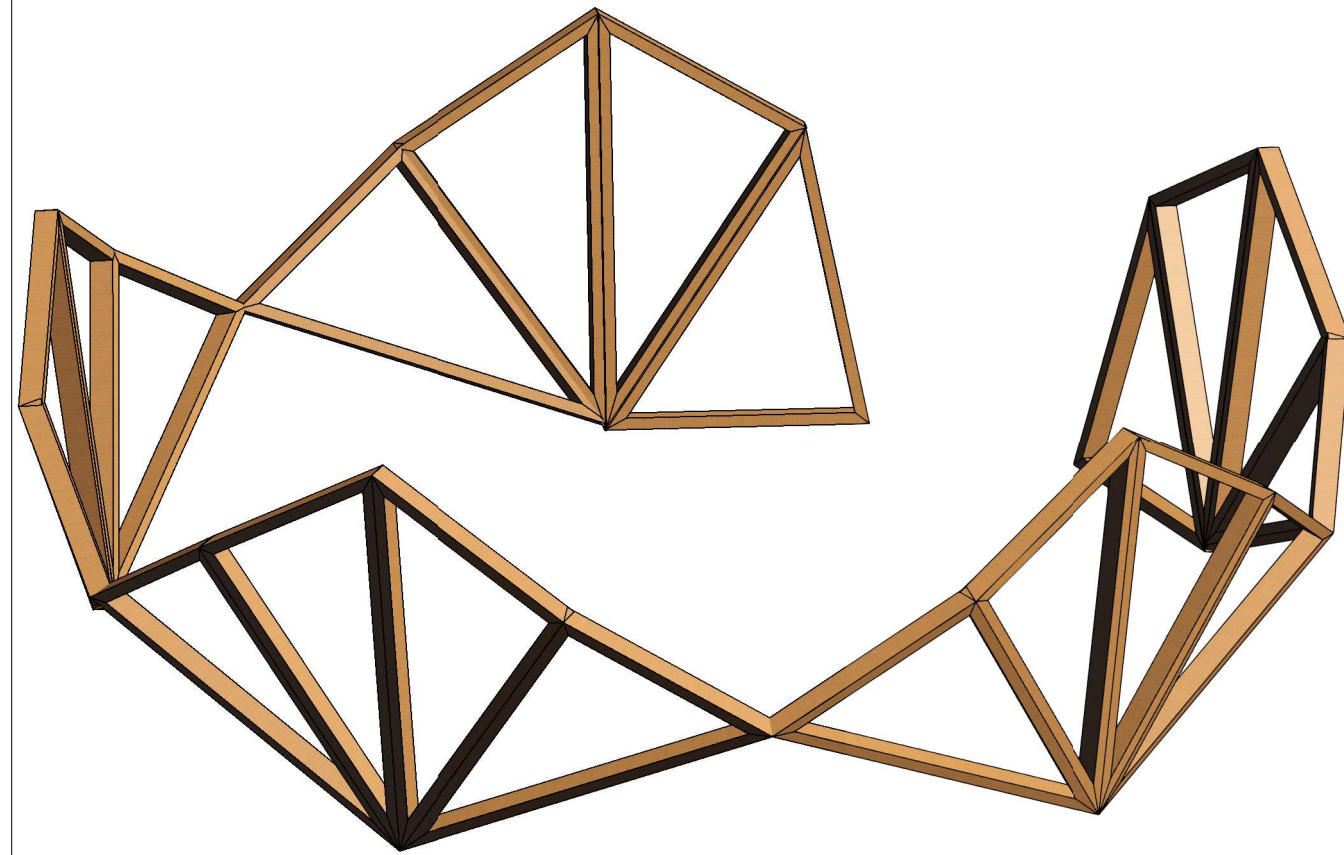
4 ALZADO LATERAL ESTE ESTRUCTURA
1 : 50



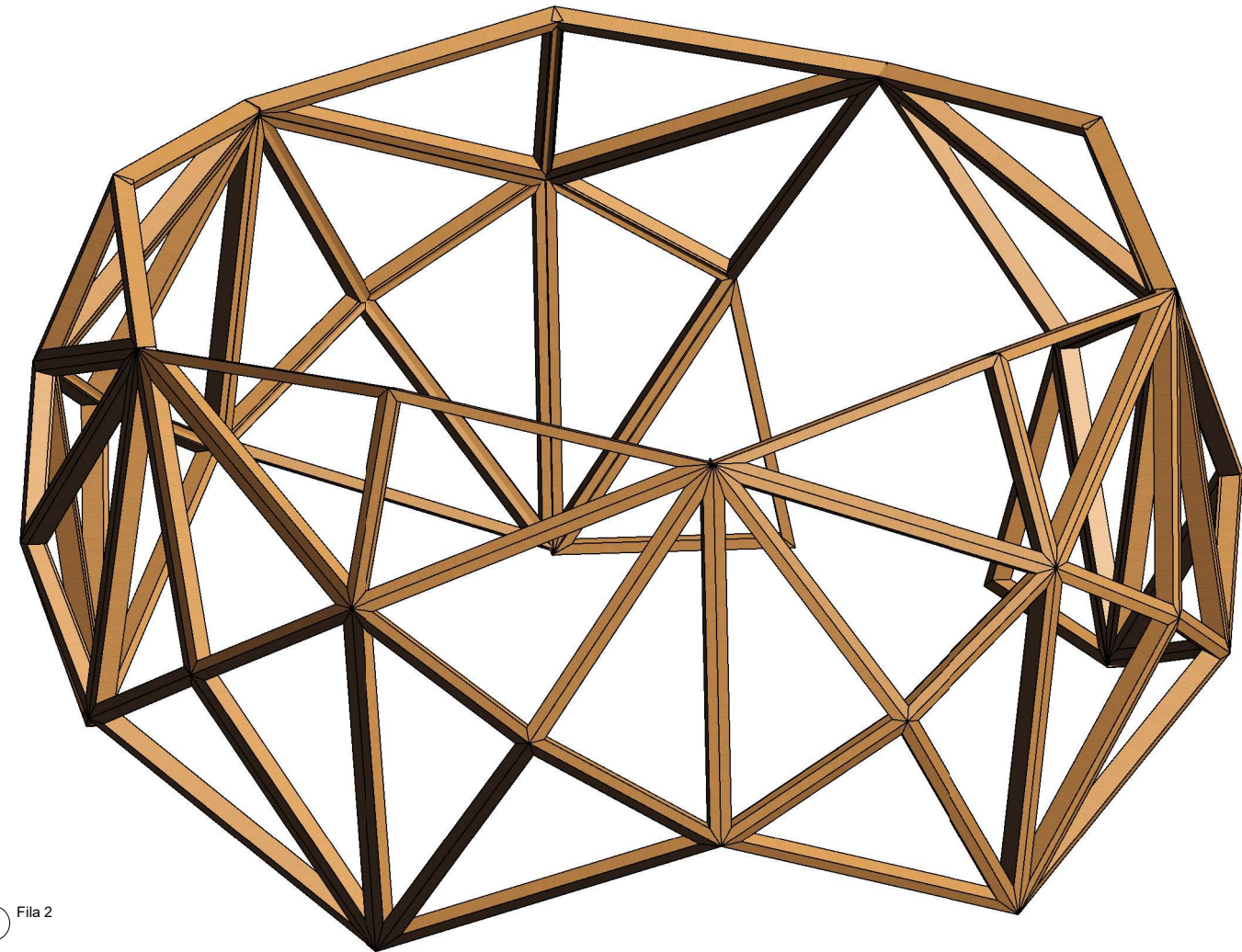
3 ALZADO FRONTAL ESTRUCTURA
1 : 50



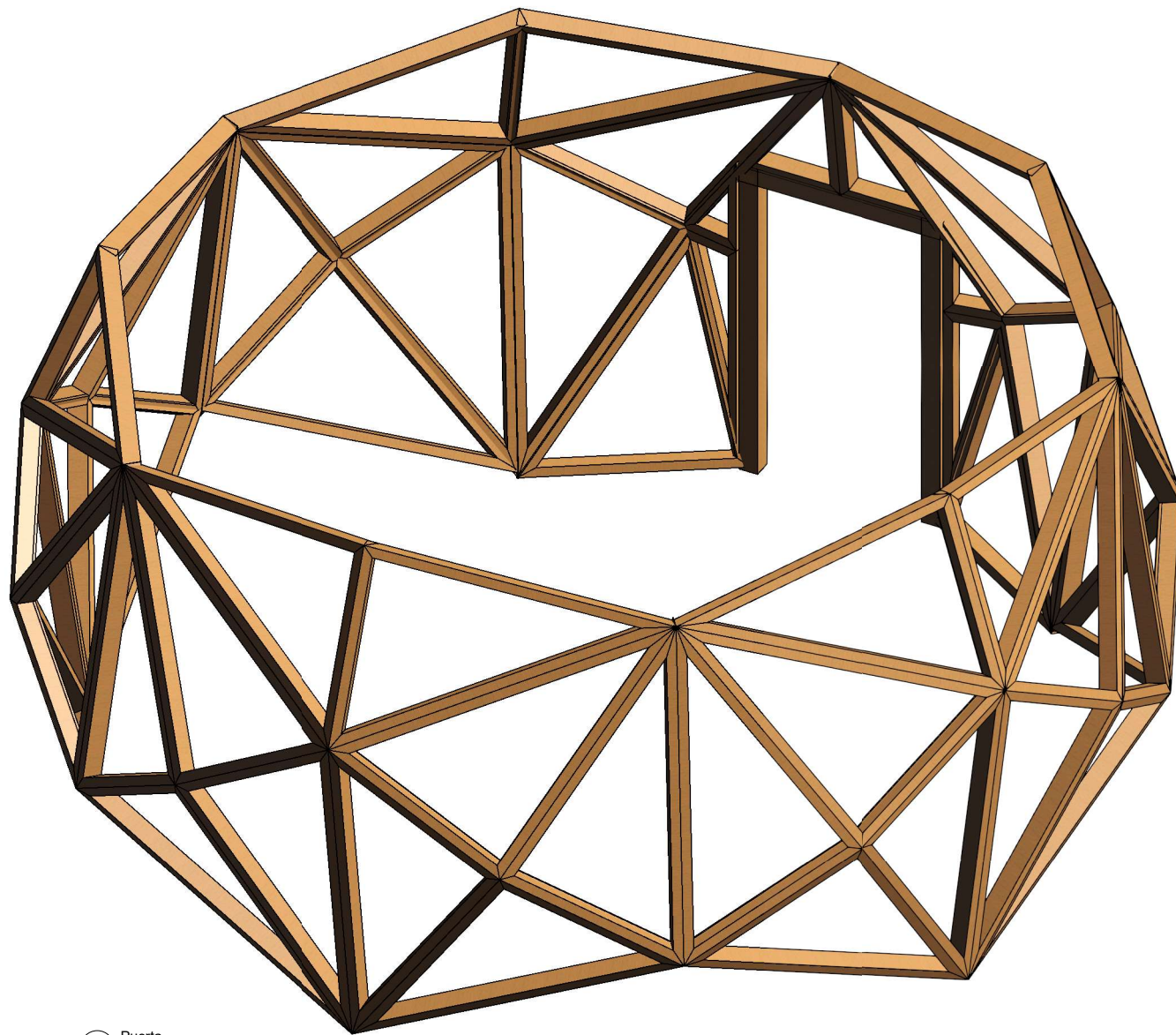
2 ALZADO LATERAL OESTE ESTRUCTURA
1 : 50



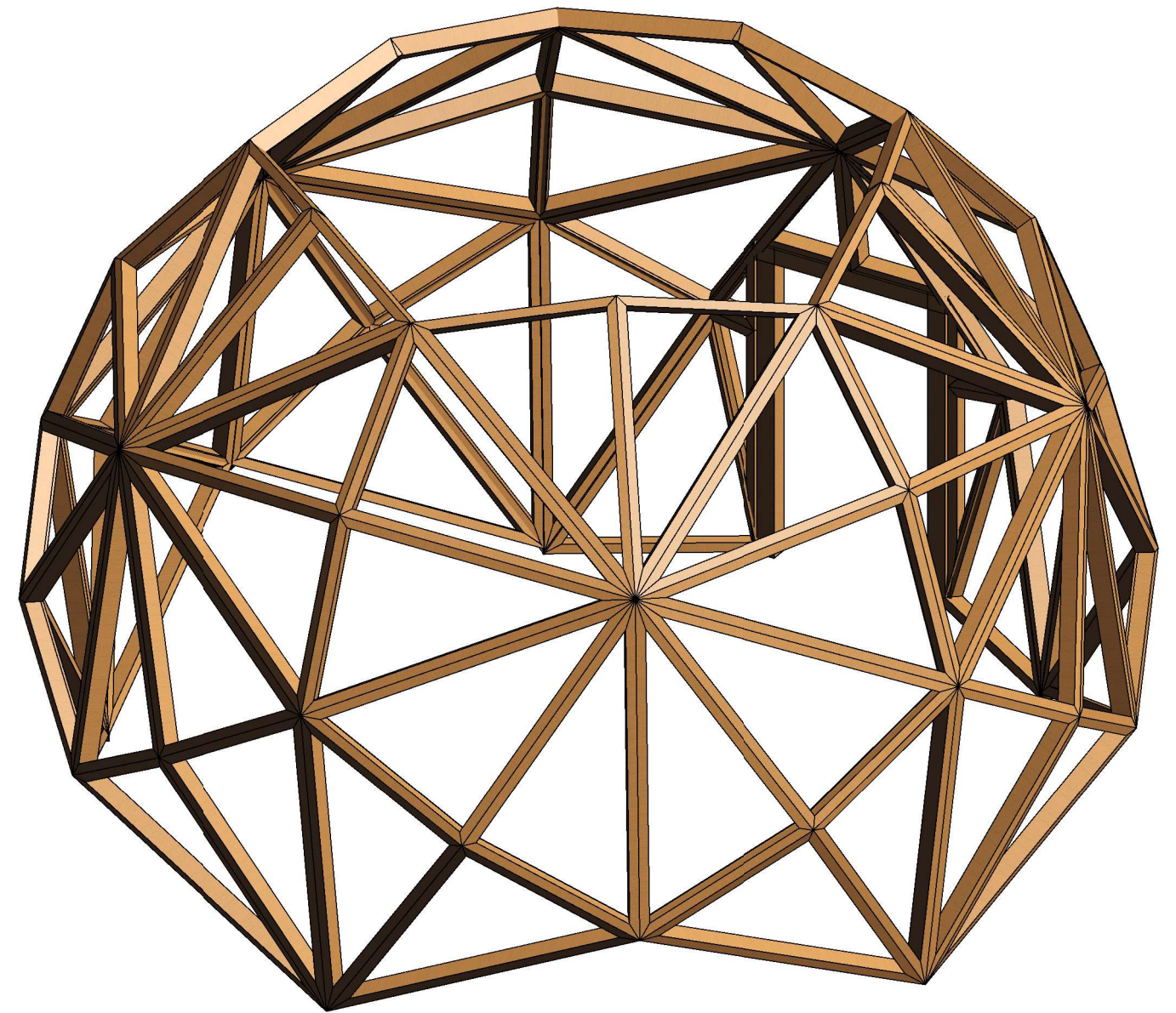
1 Fila 1



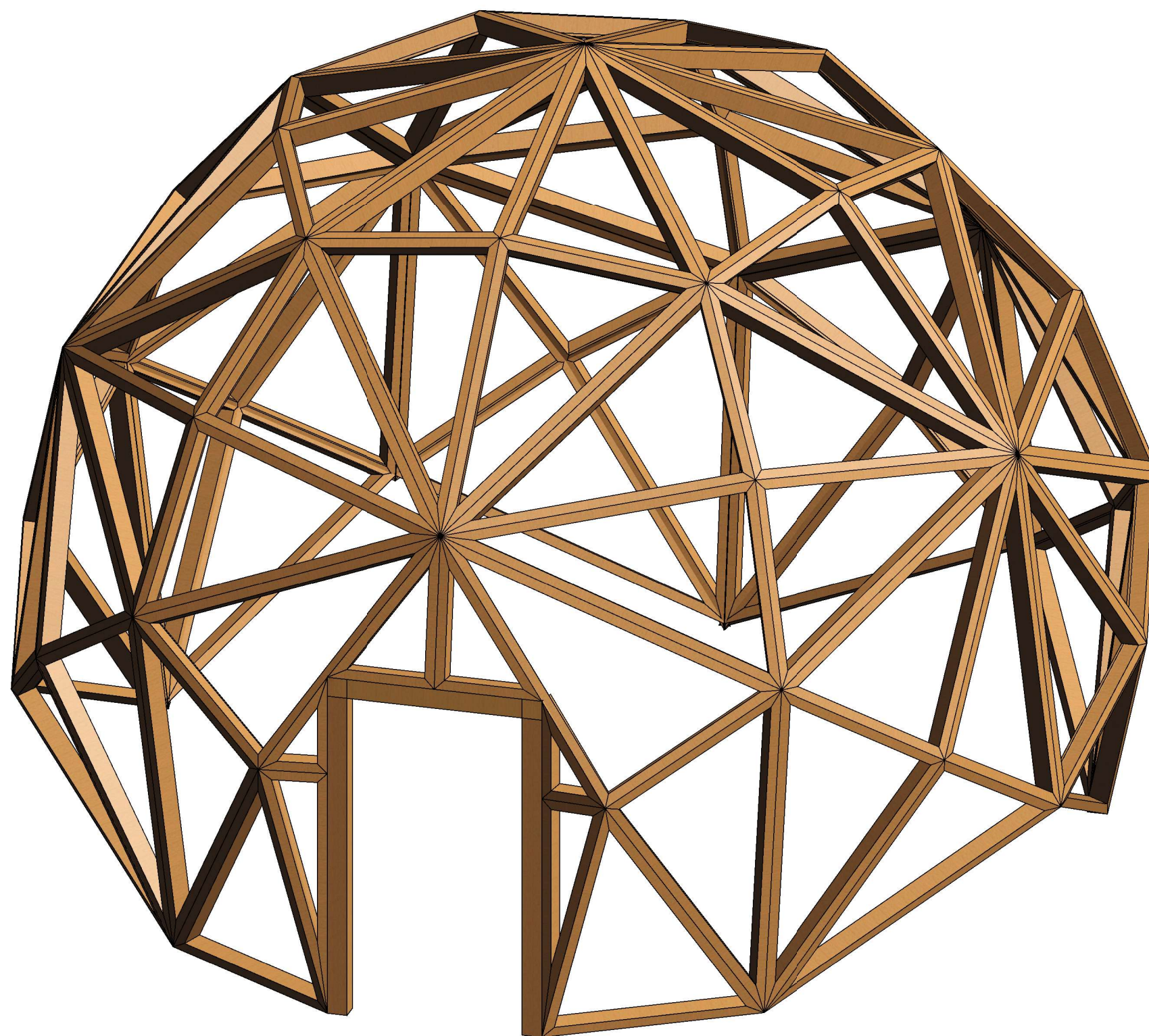
2 Fila 2



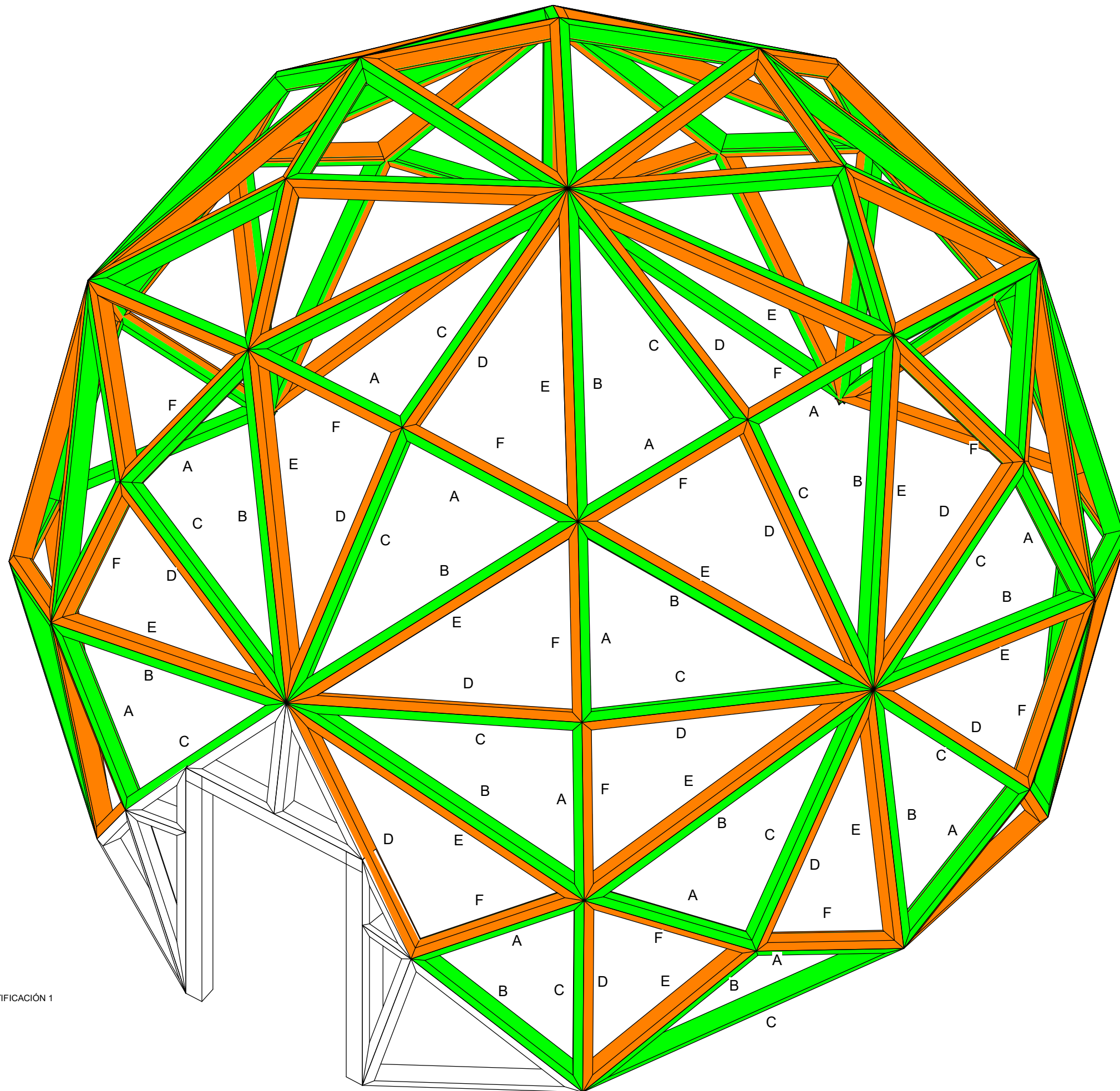
1 Puerta



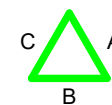
2 Fila 3



1 Fila 4



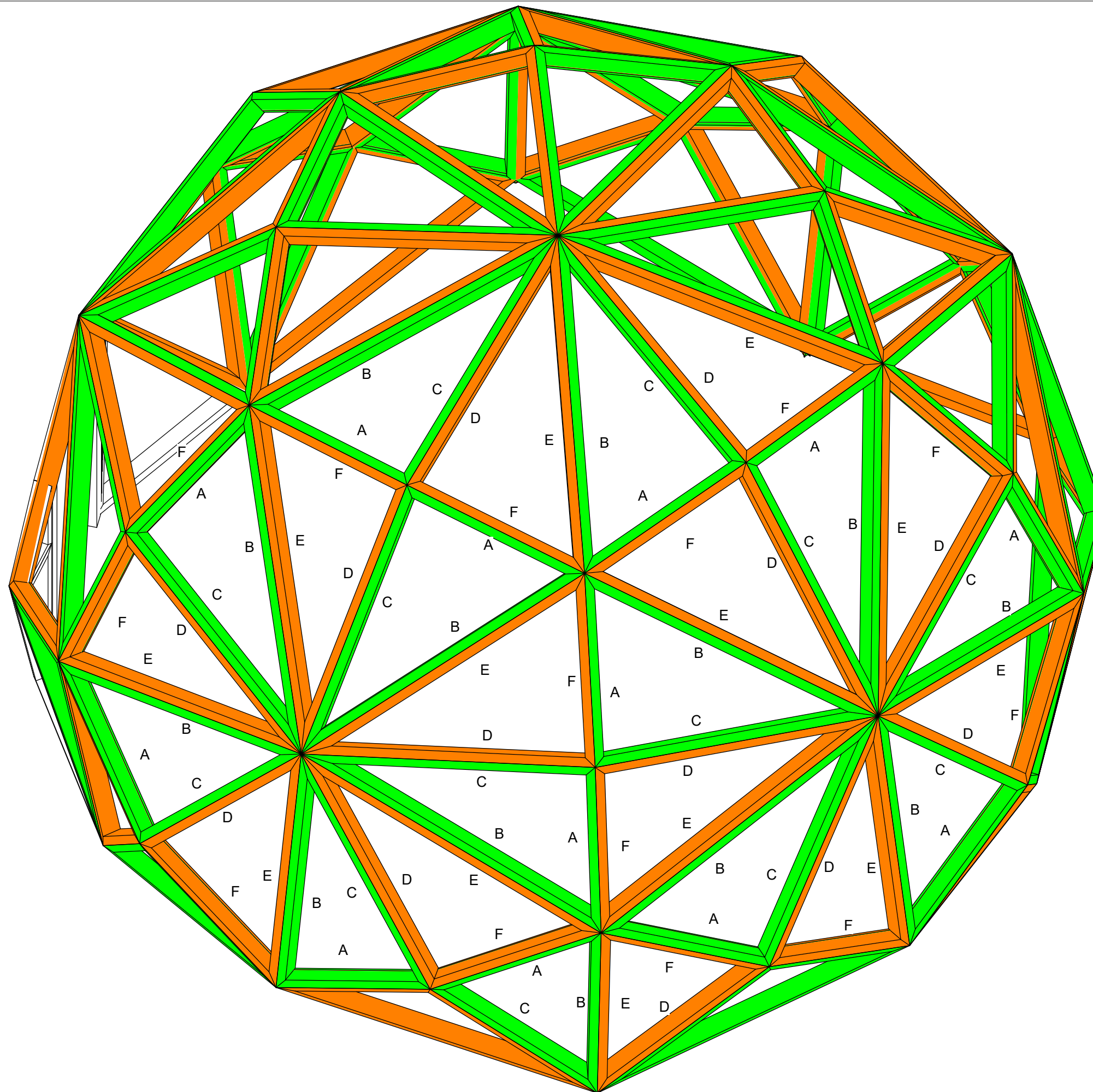
TRIÁNGULO Nº 1



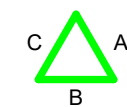
TRIÁNGULO Nº 2



1 IDENTIFICACIÓN 1

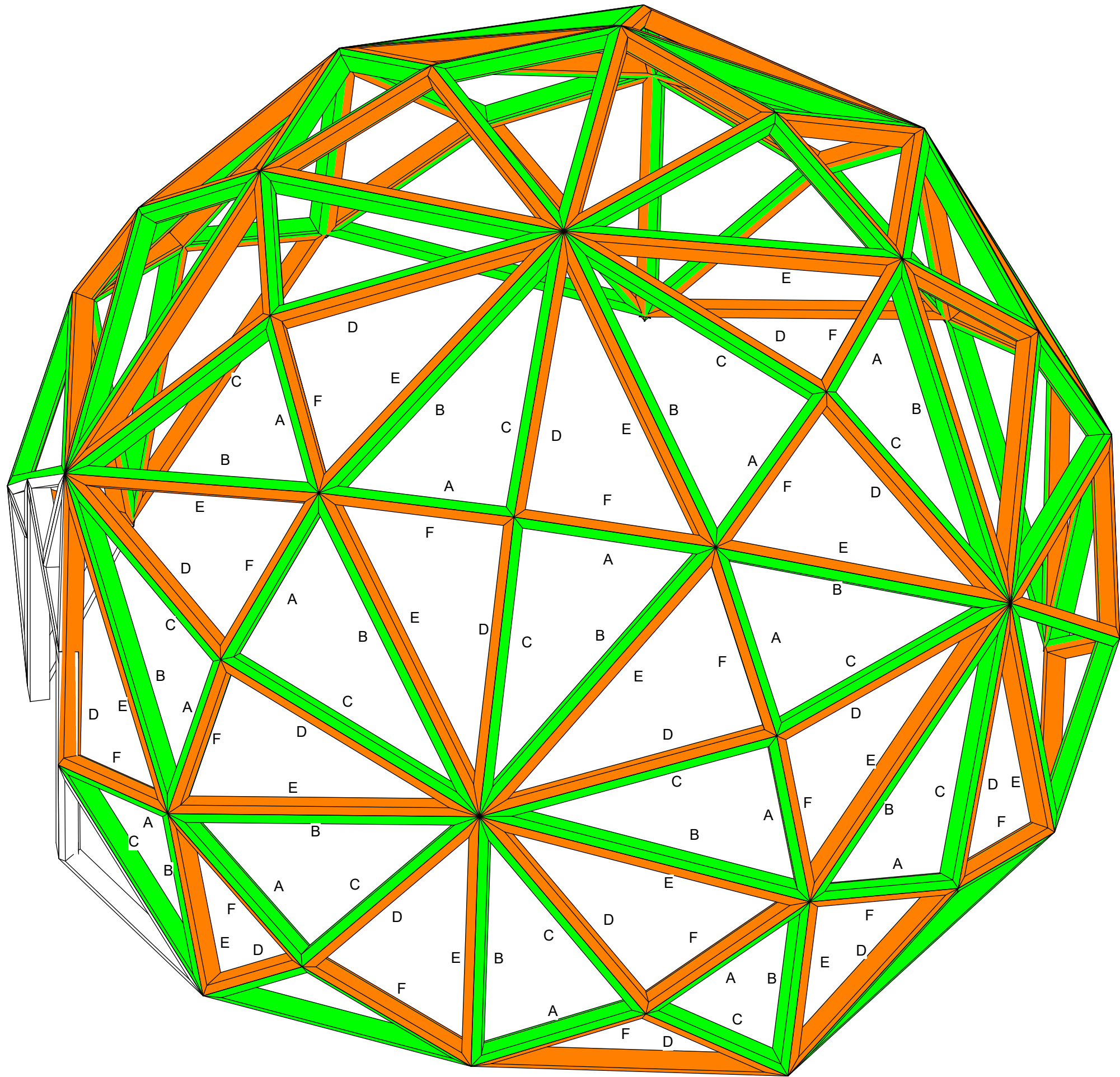


TRIÁNGULO Nº 1

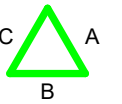


TRIÁNGULO Nº 2





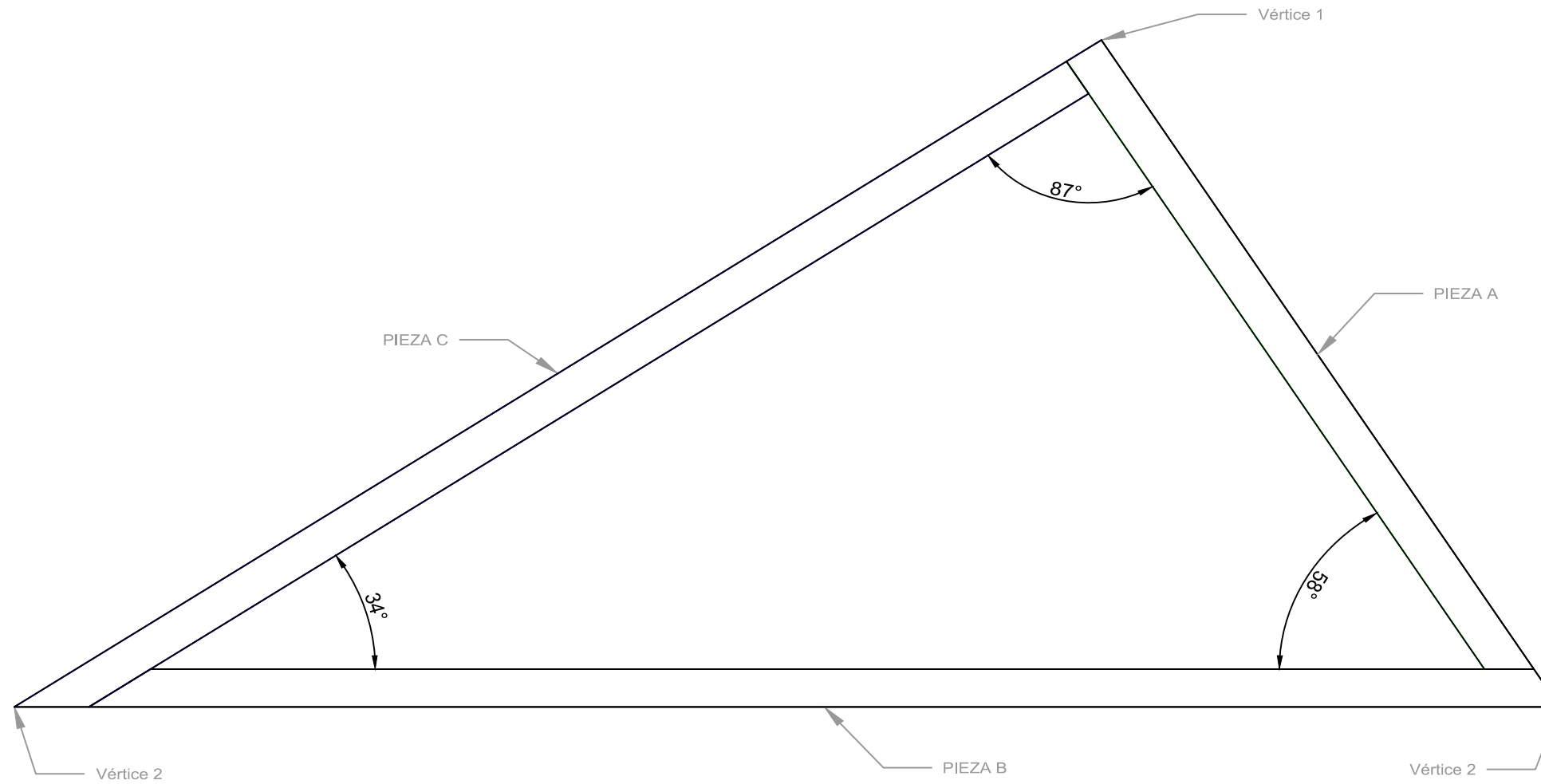
TRIÁNGULO Nº 1



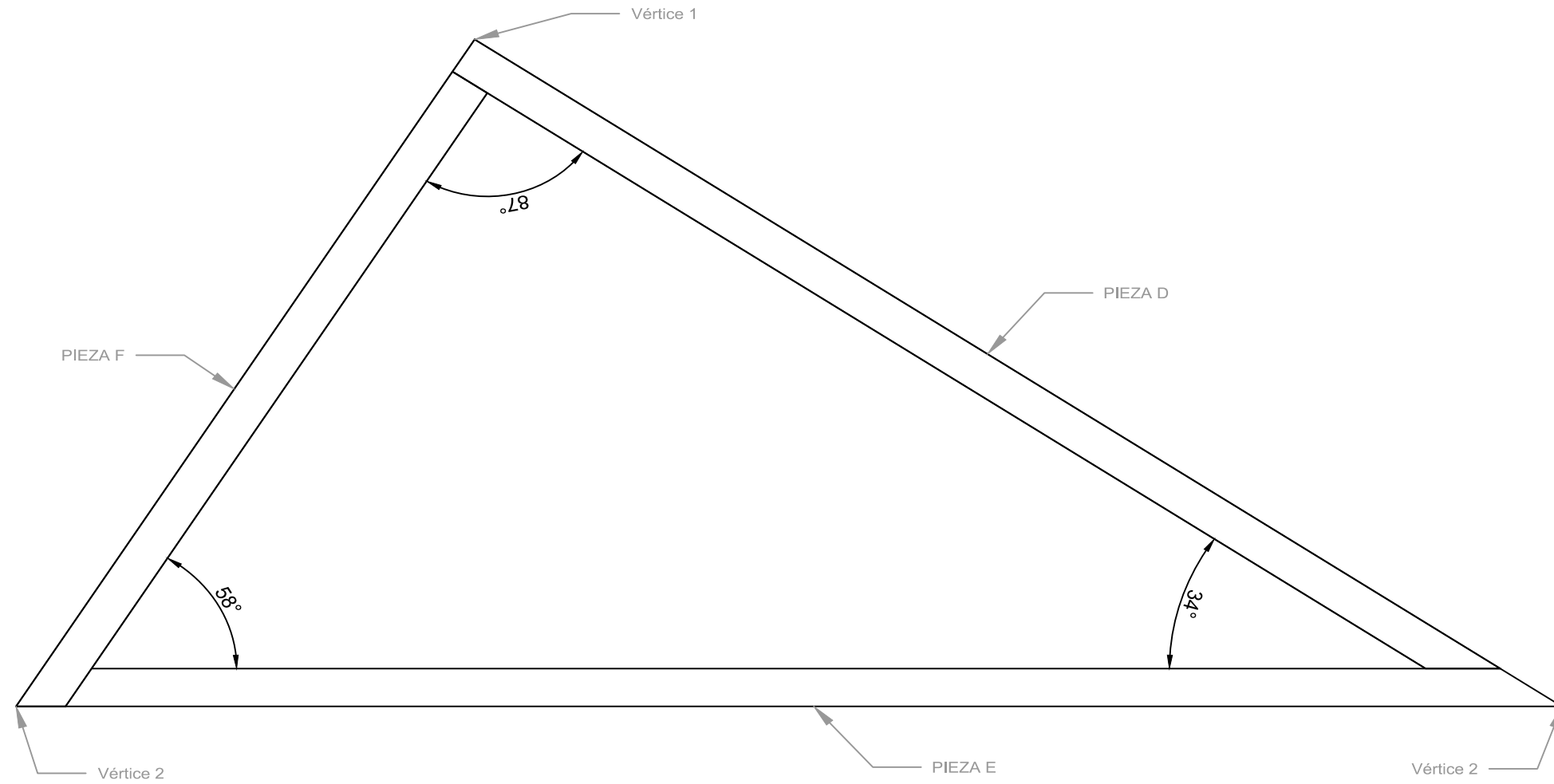
TRIÁNGULO Nº 2



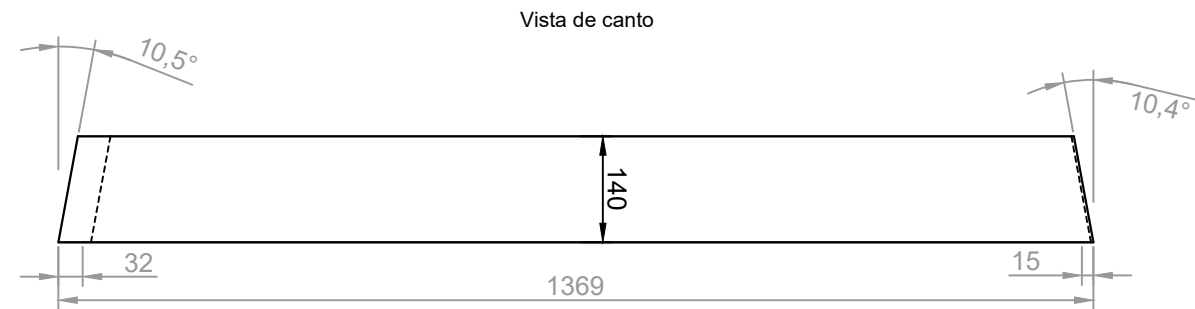
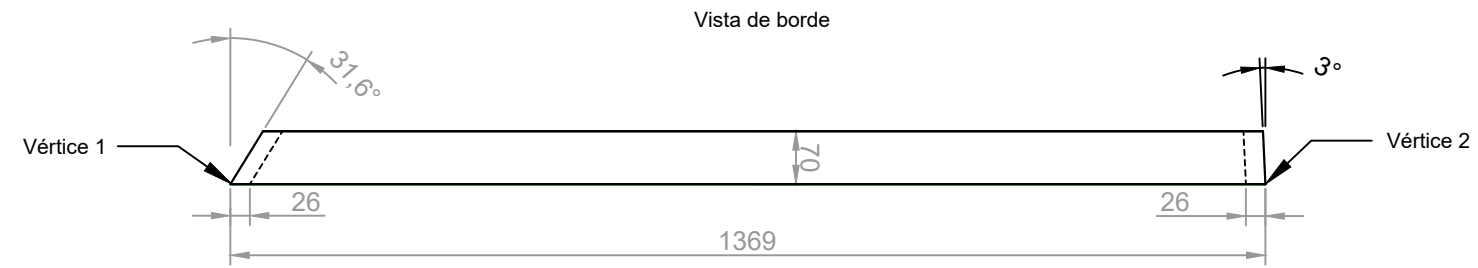
TRIÁNGULO Nº1
60 PIEZAS



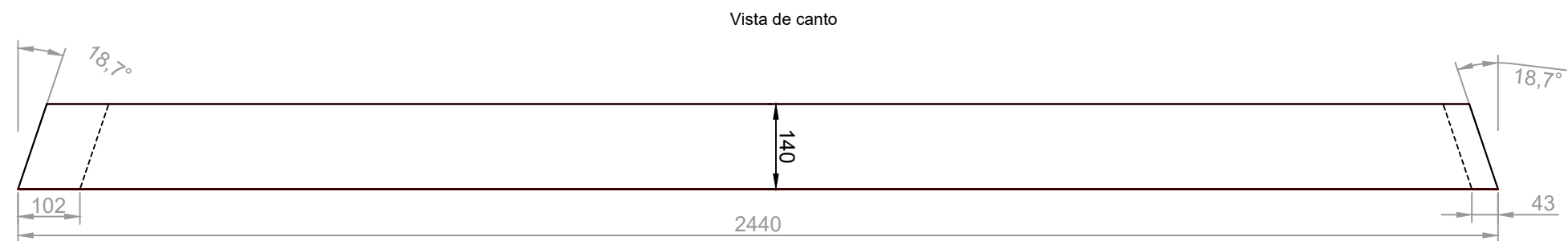
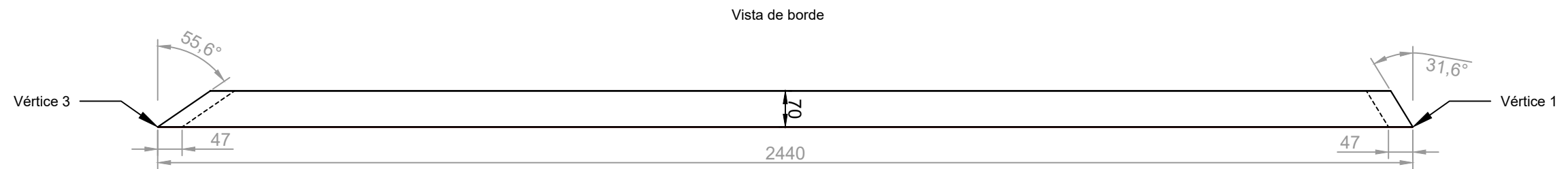
TRIÁNGULO Nº2
60 PIEZAS



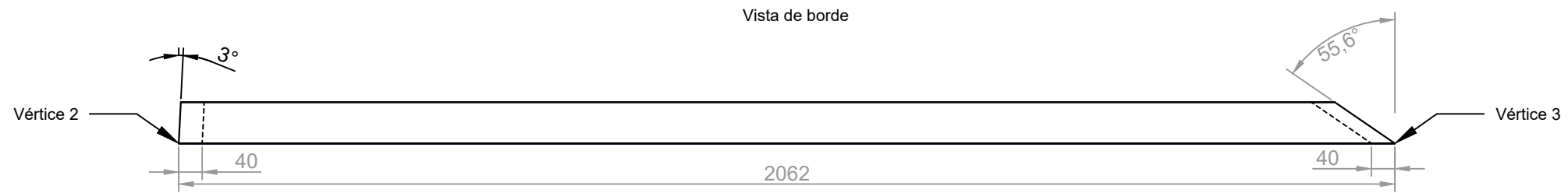
PIEZA A
60 Piezas



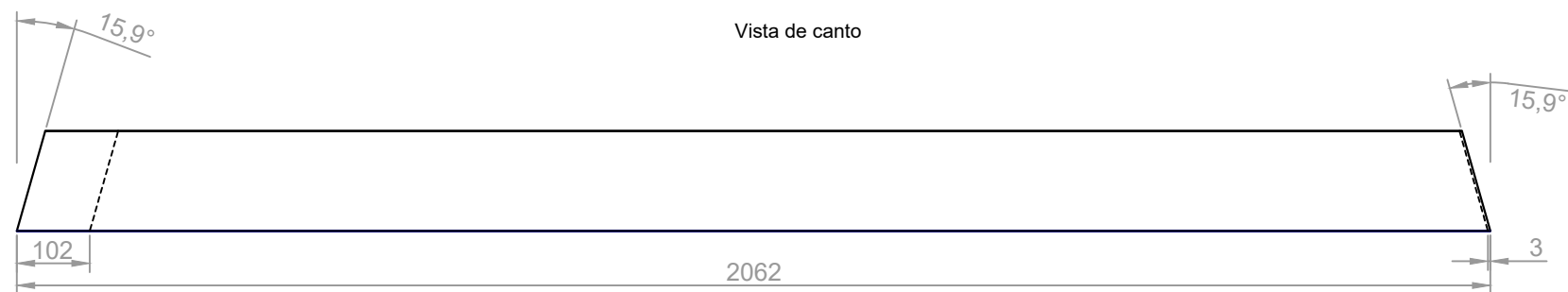
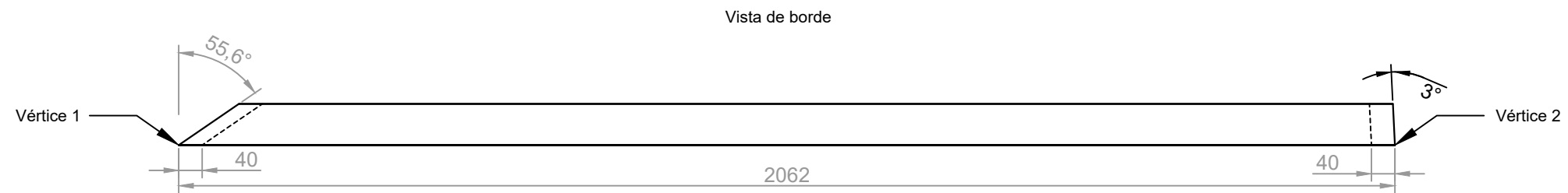
PIEZA B
60 Piezas



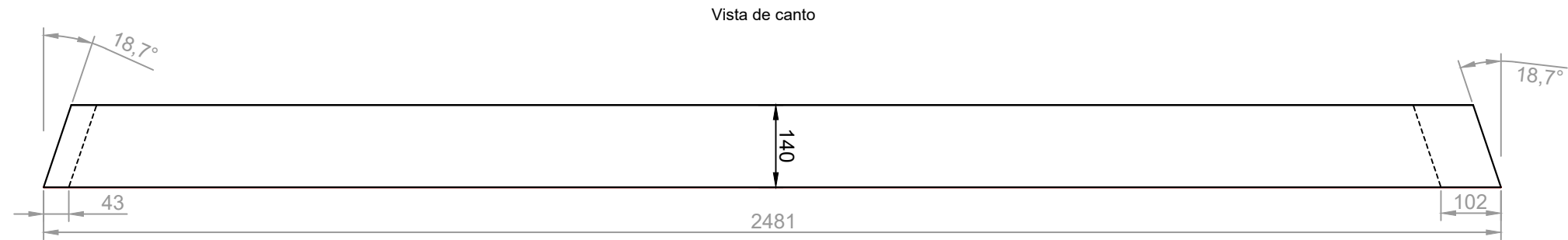
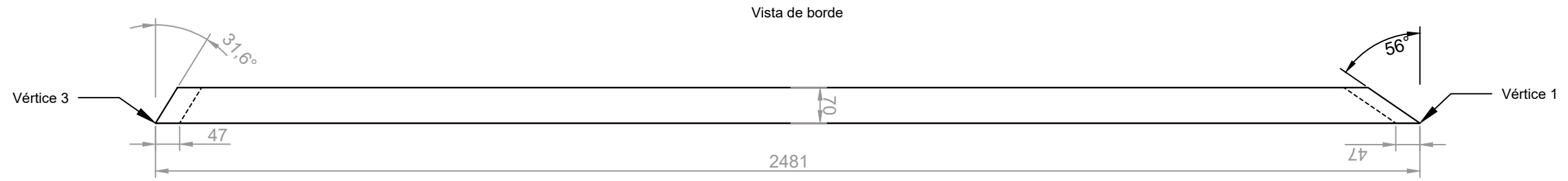
PIEZA C
60 Piezas



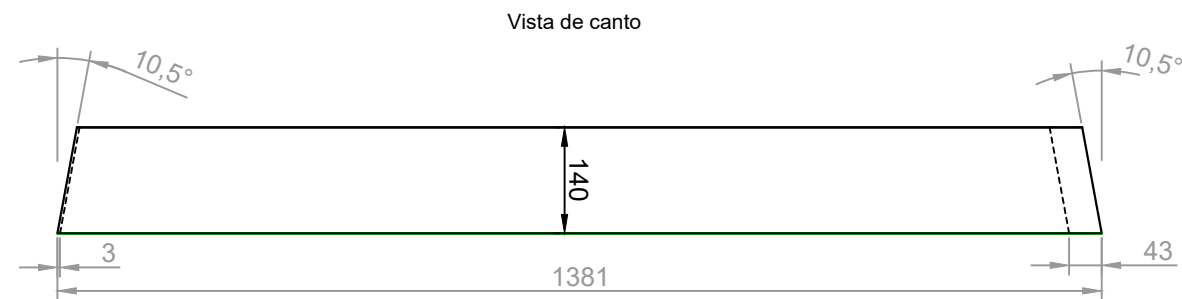
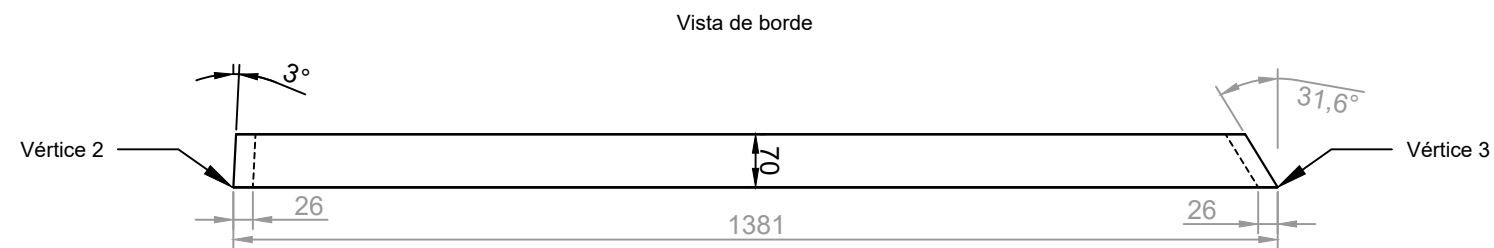
PIEZA D
60 Piezas

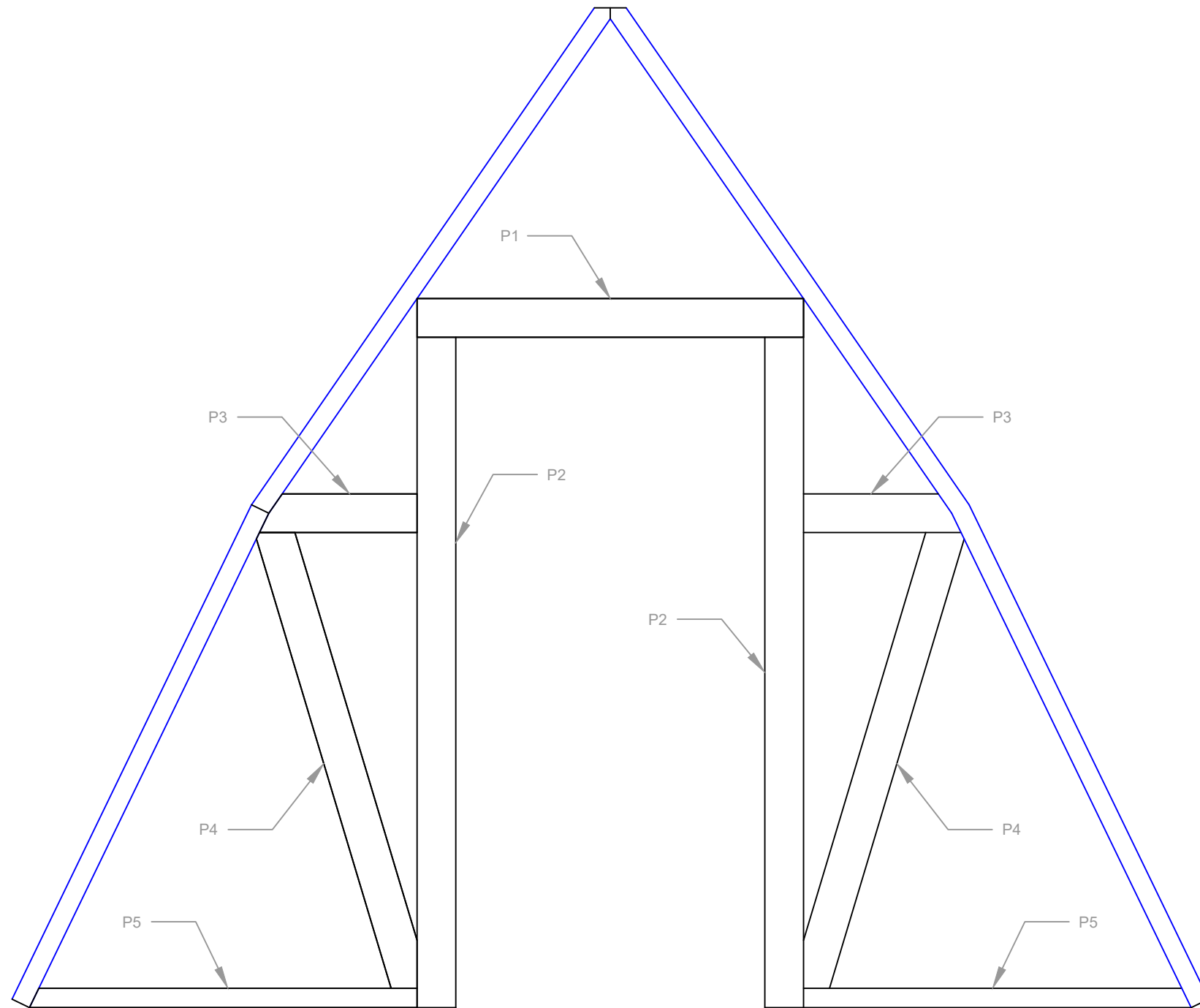


PIEZA E
60 Piezas

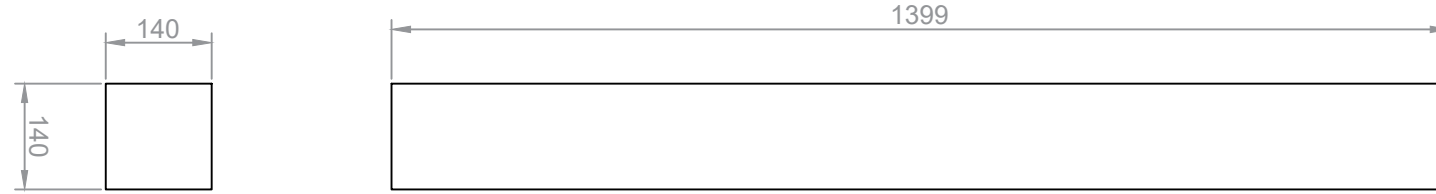


PIEZA F
60 Piezas

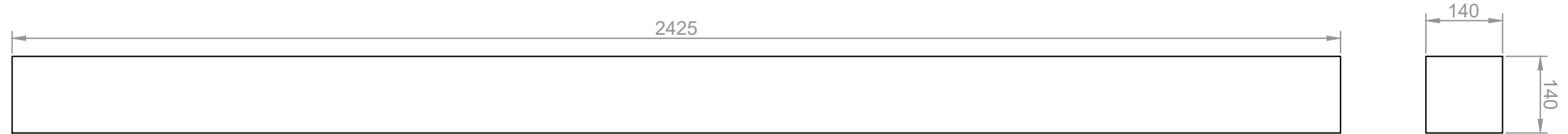




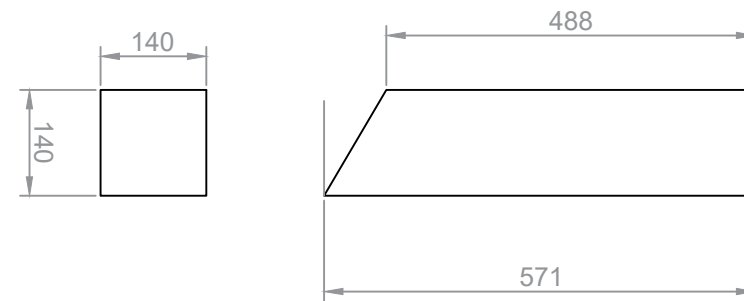
PIEZA P1



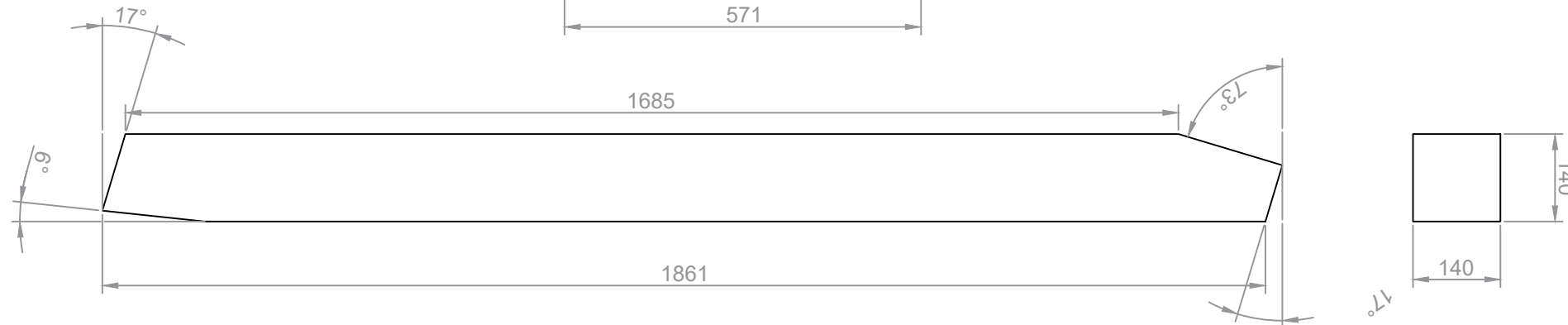
PIEZA P2 (x2)



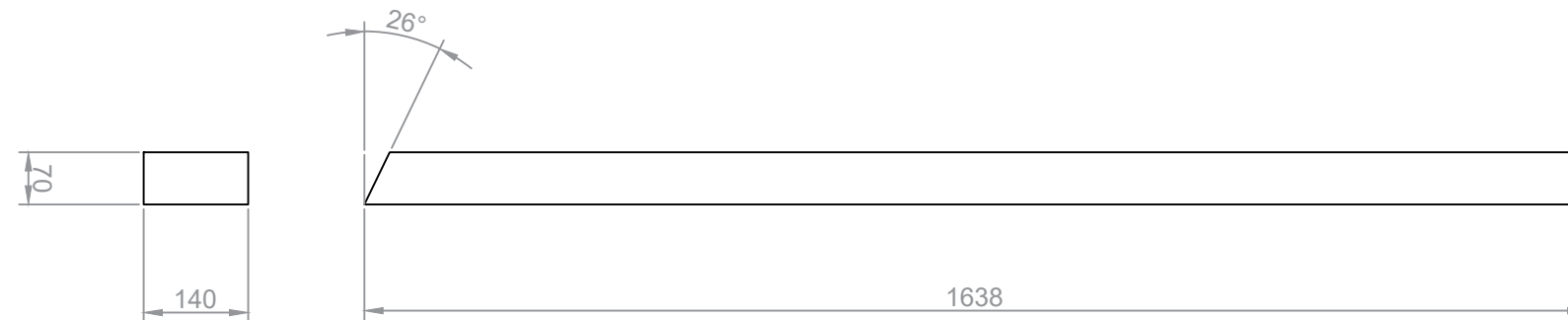
PIEZA P3 (x2)



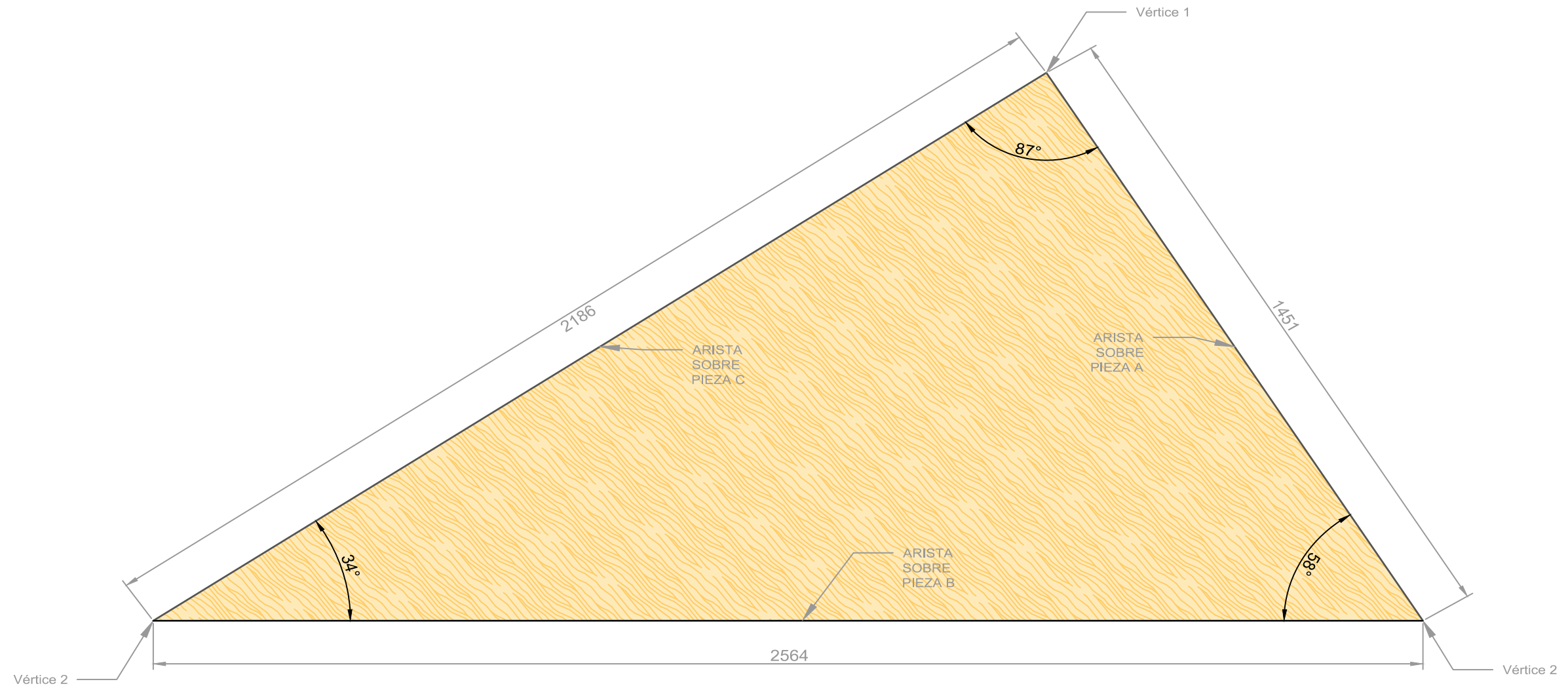
PIEZA P4 (x2)



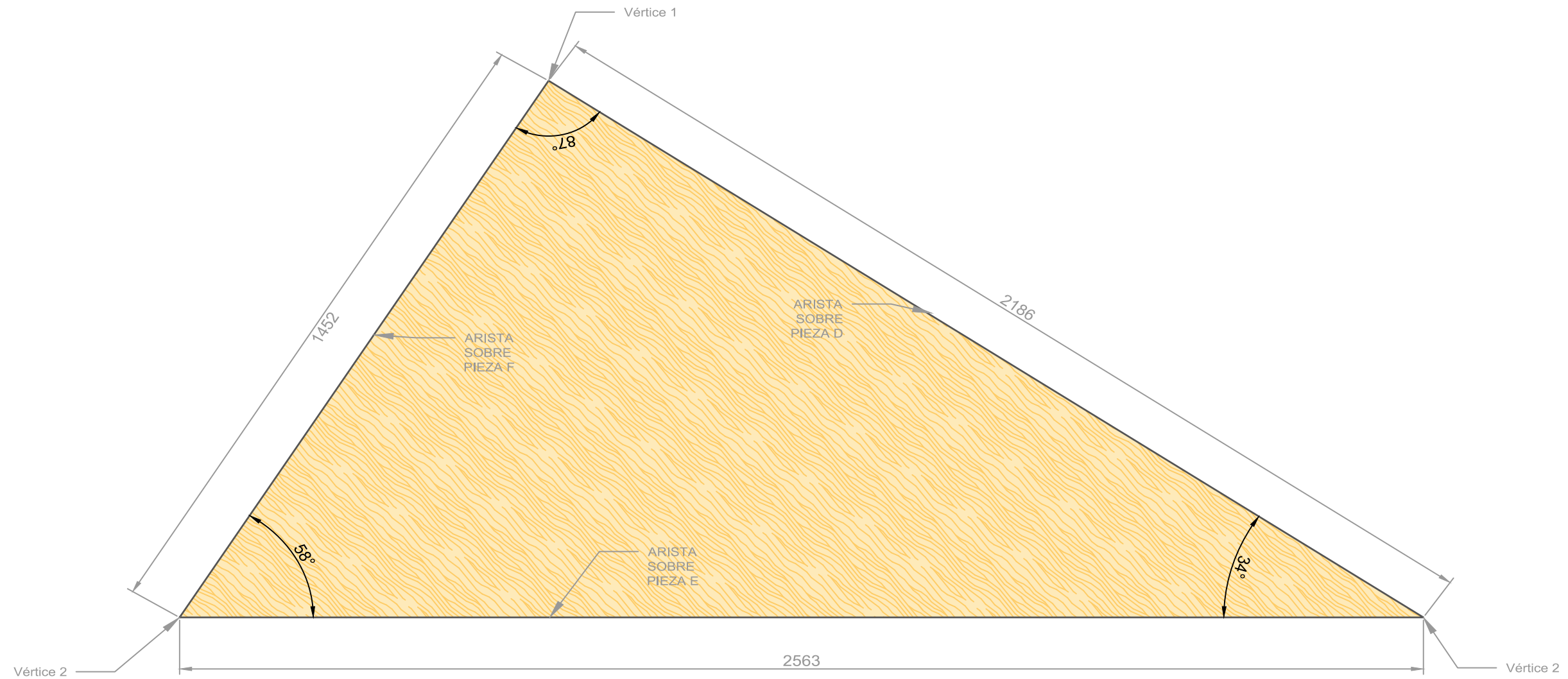
PIEZA P5 (x2)



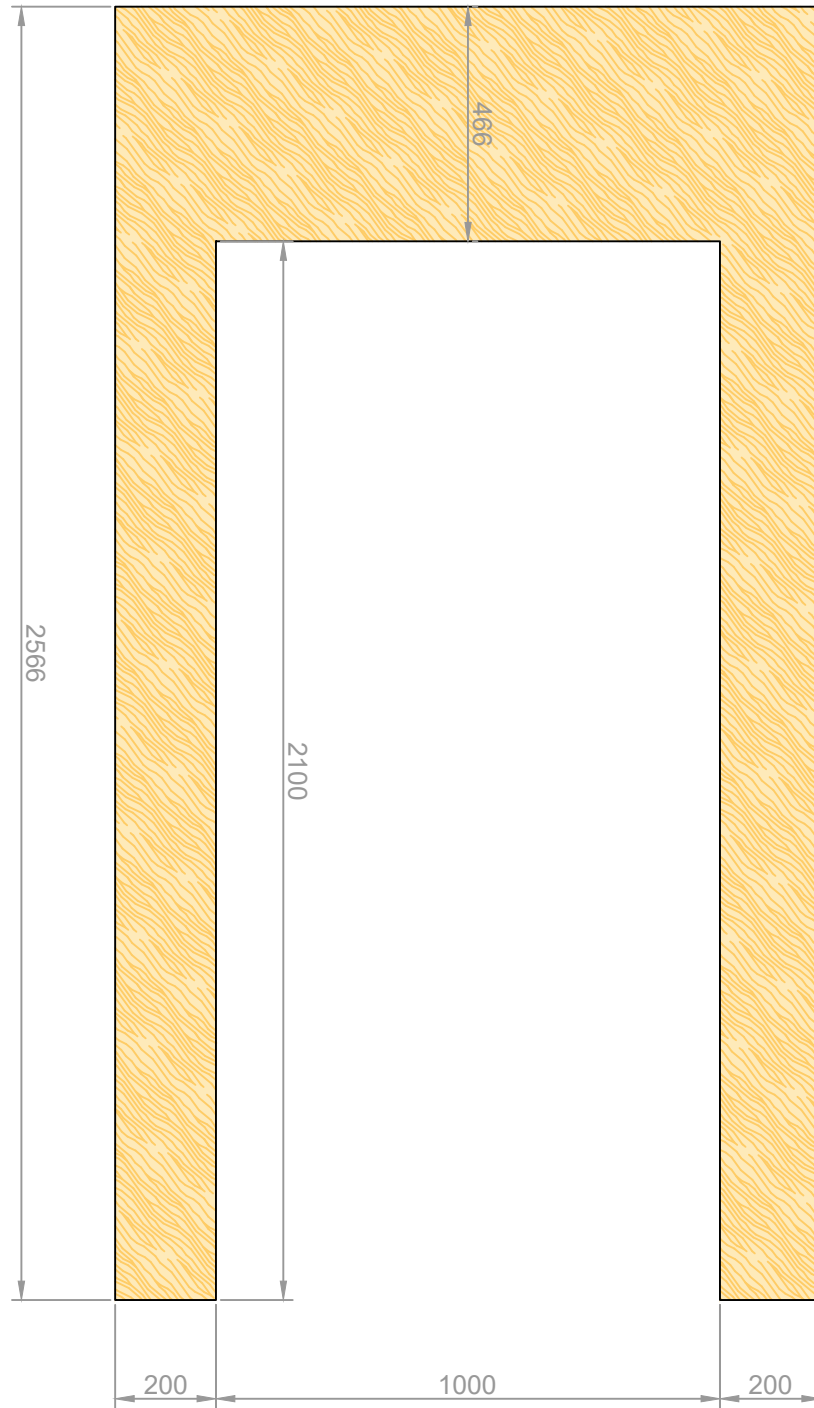
TRIÁNGULO Nº1
58 PIEZAS



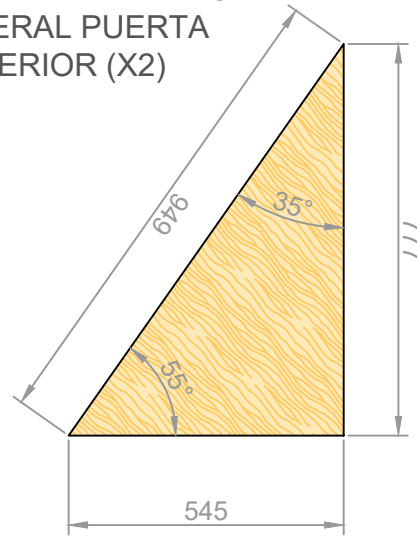
TRIÁNGULO Nº2
58 PIEZAS



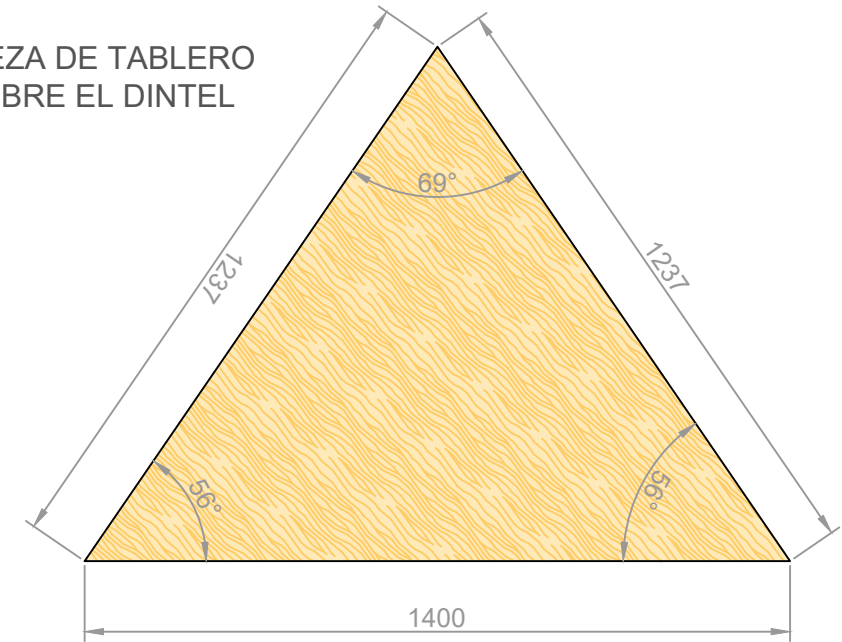
PIEZA DE TABLERO
FRONTAL PUERTA



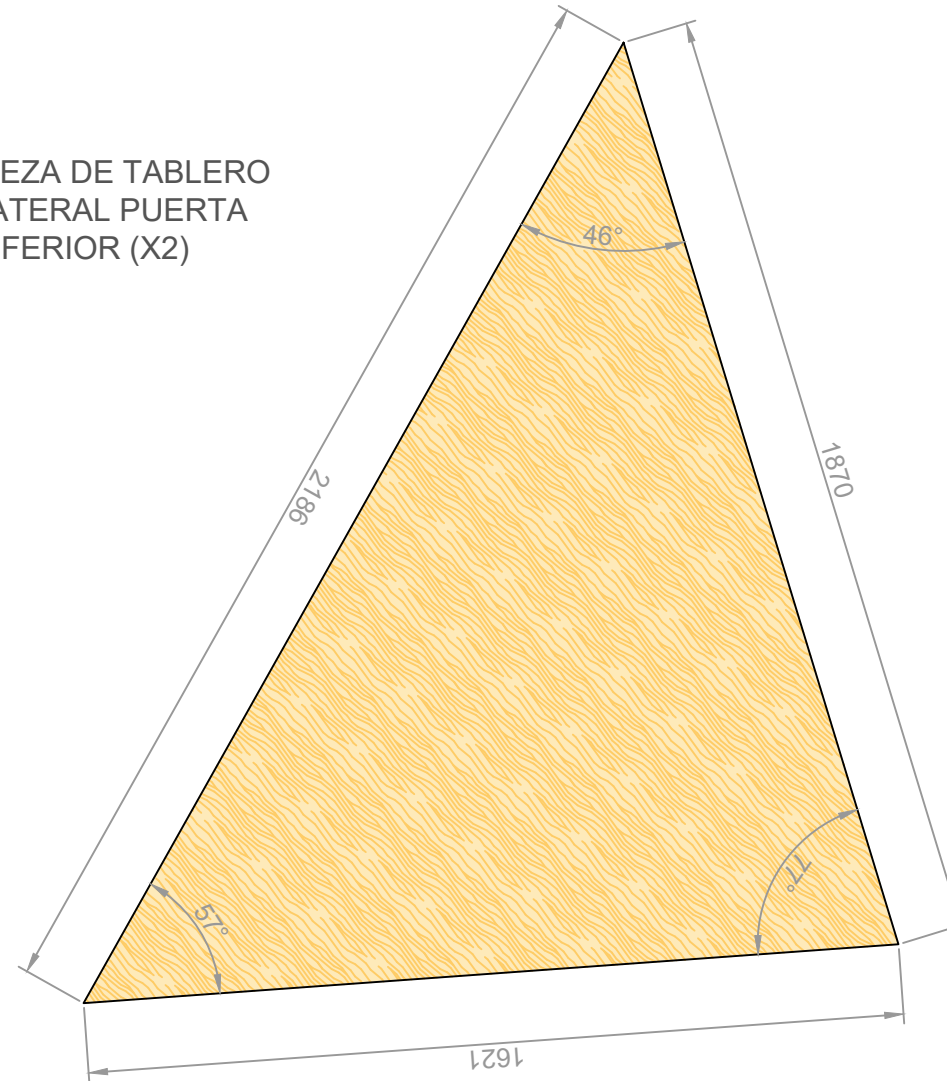
PIEZA DE TABLERO
LATERAL PUERTA
SUPERIOR (X2)



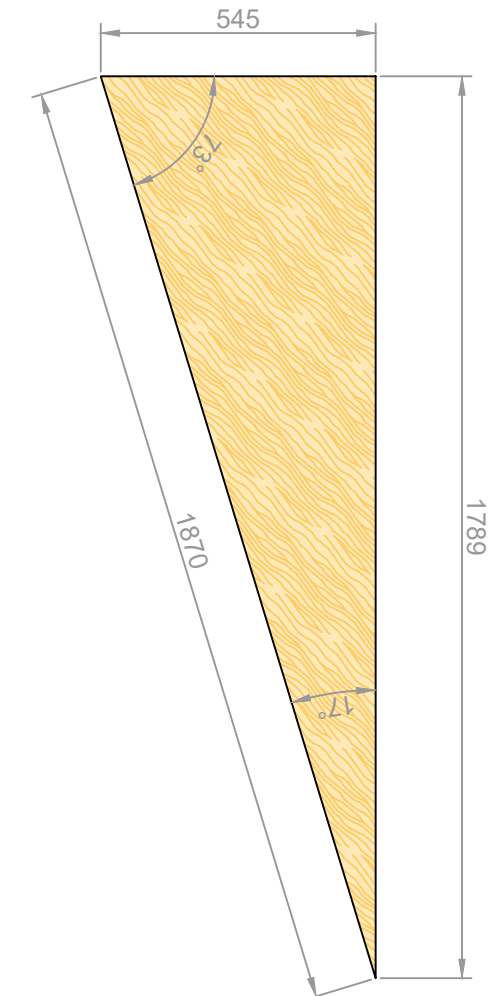
PIEZA DE TABLERO
SOBRE EL DINTEL



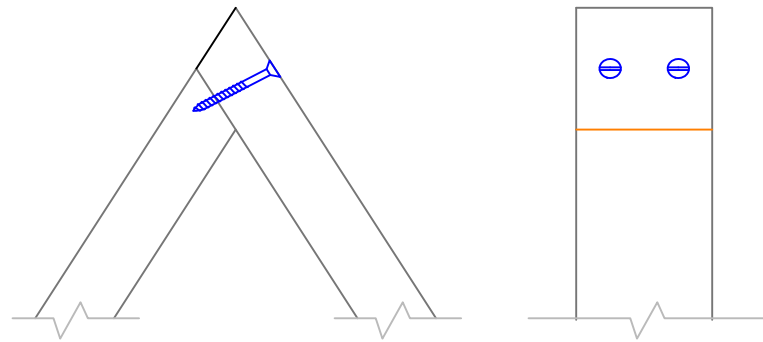
PIEZA DE TABLERO
LATERAL PUERTA
INFERIOR (X2)



PIEZA DE TABLERO
LATERAL PUERTA
INTERMEDIO (X2)

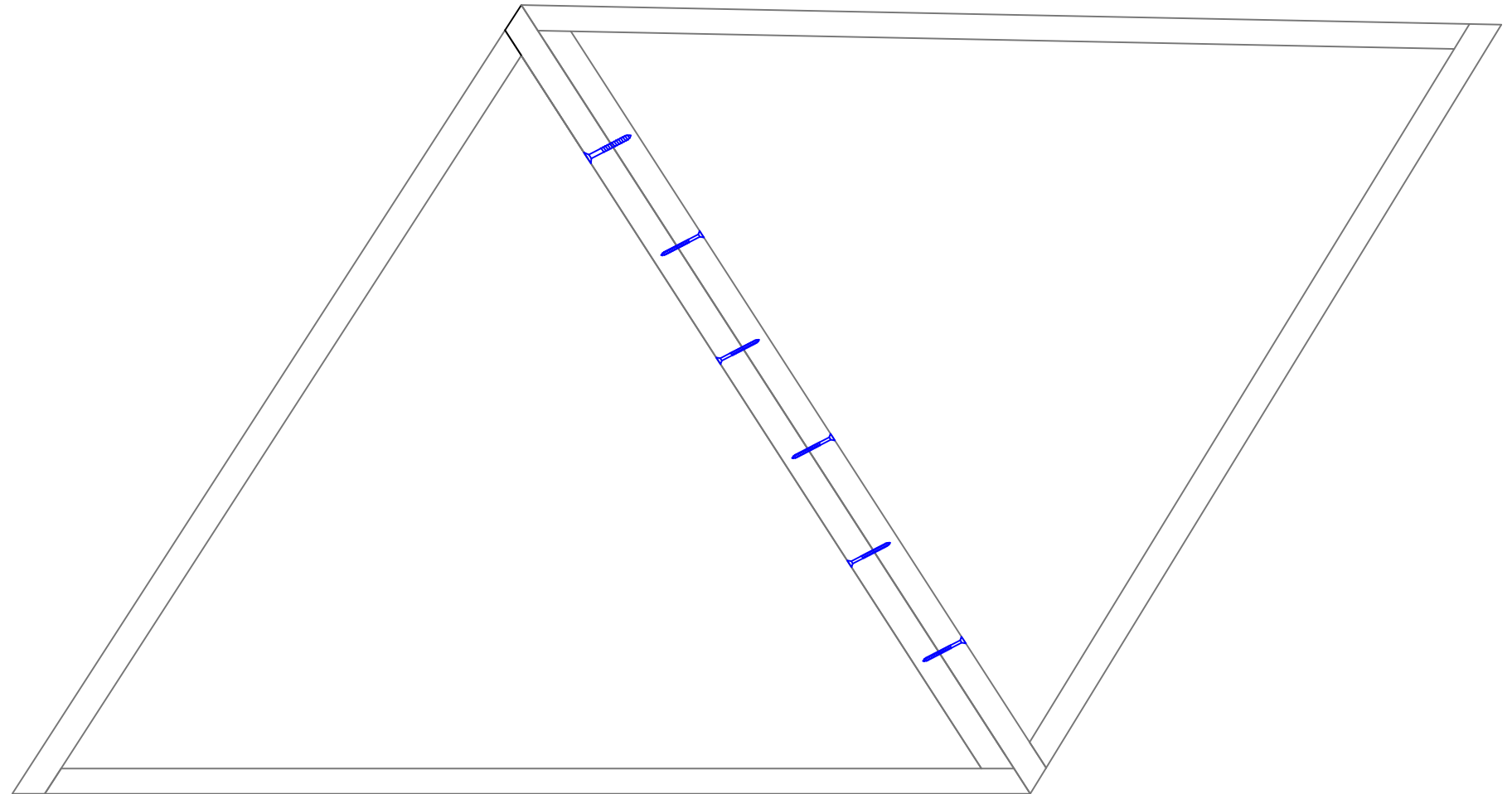


VISTA UNIONES MONTAJE DE TRIÁNGULOS
Escala: 1:5

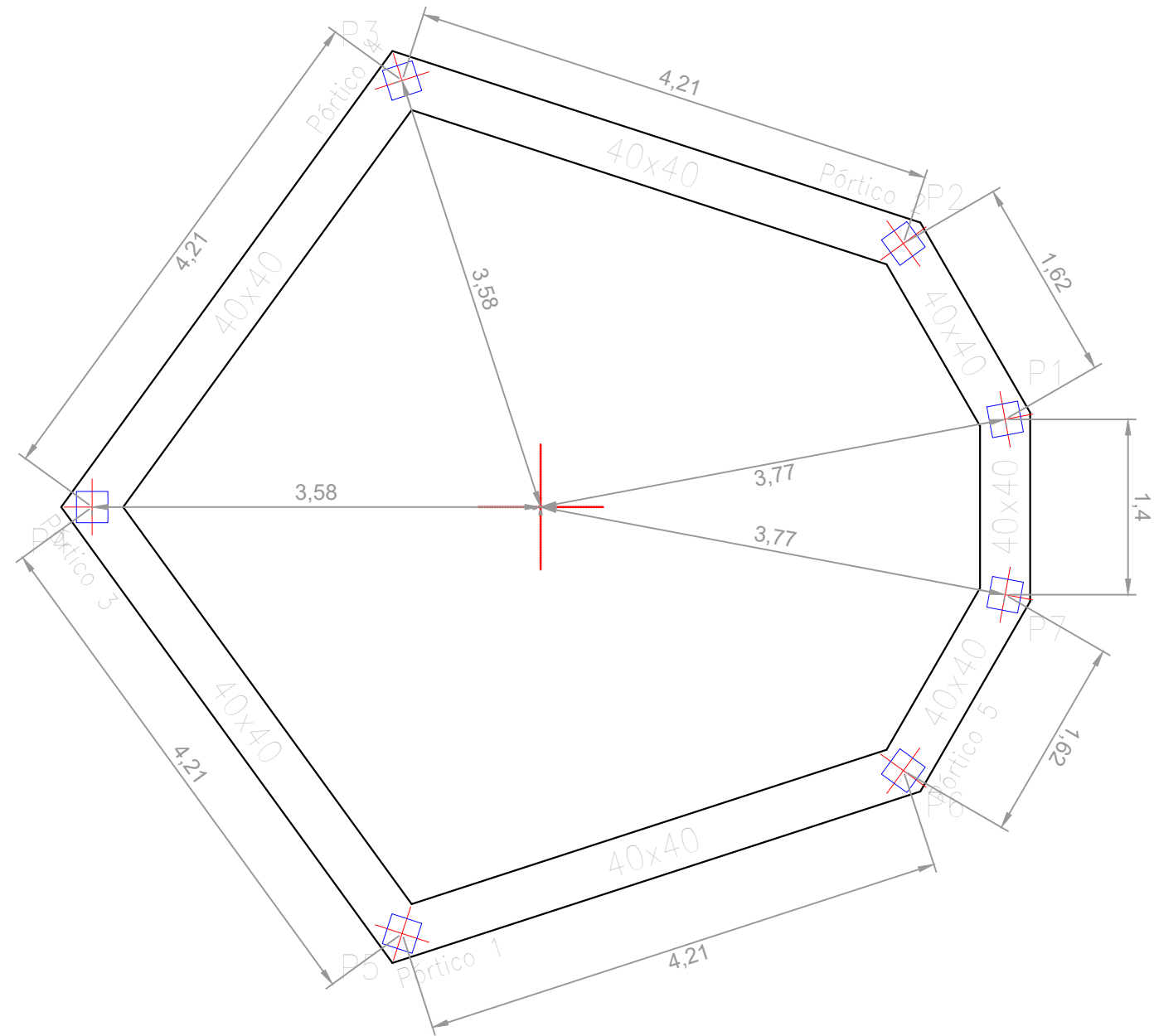


DATOS TORNILLERÍA		
MONTAJE DE TRIÁNGULOS		
Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro	8	mm
Ancho de la cabeza	16	mm
Longitud	7	cm
Nº tirafondos por unión	2	-

VISTA UNIONES ENTRE TRIÁNGULOS
Escala: 1:10



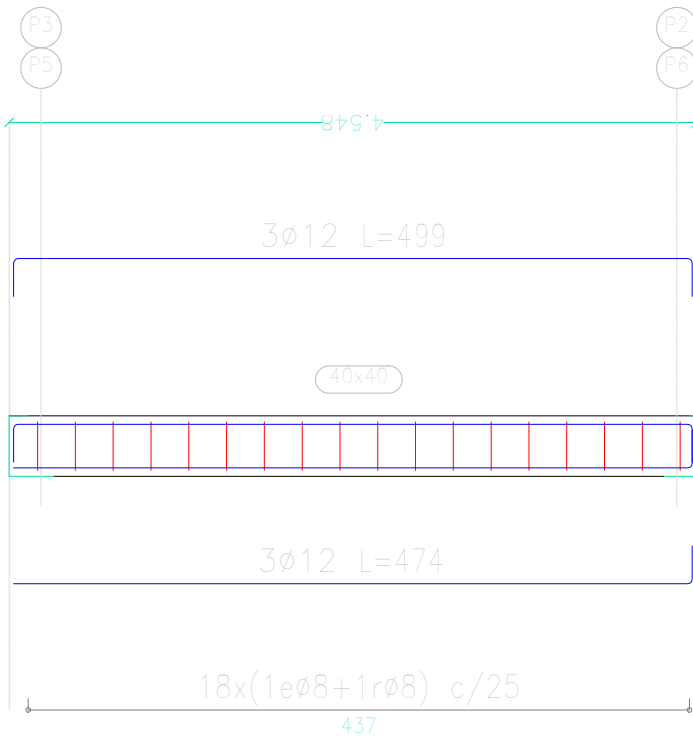
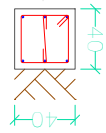
DATOS TORNILLERÍA		
UNIÓN ENTRE TRIÁNGULOS		
Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro	8	mm
Ancho de la cabeza	16	mm
Longitud	8	cm
Nº tirafondos por unión	6	-



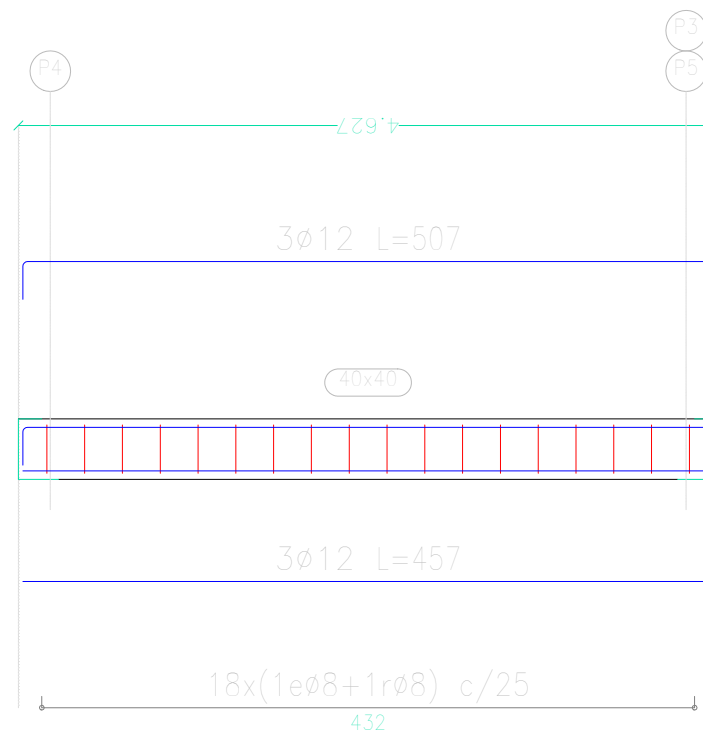
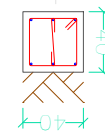
CUADRO DE CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

HORMIGON (Código Estructural)						ACERO EN BARRAS CORRUGADAS (Código Estructural)		
Elemento estructural	Tipo de hormigón	Nivel de control	Coefficiente minoración	Relación máx. agua / cemento	Contenido mínimo cemento	Elemento estructural	Tipo de acero	Coefficiente de minoración
Cimentación	HA-25/F/20/XC2	Estadístico	$\gamma_c = 1.50$	0.60	275 kg	Toda la obra	B 500 S	$\gamma_s = 1.15$

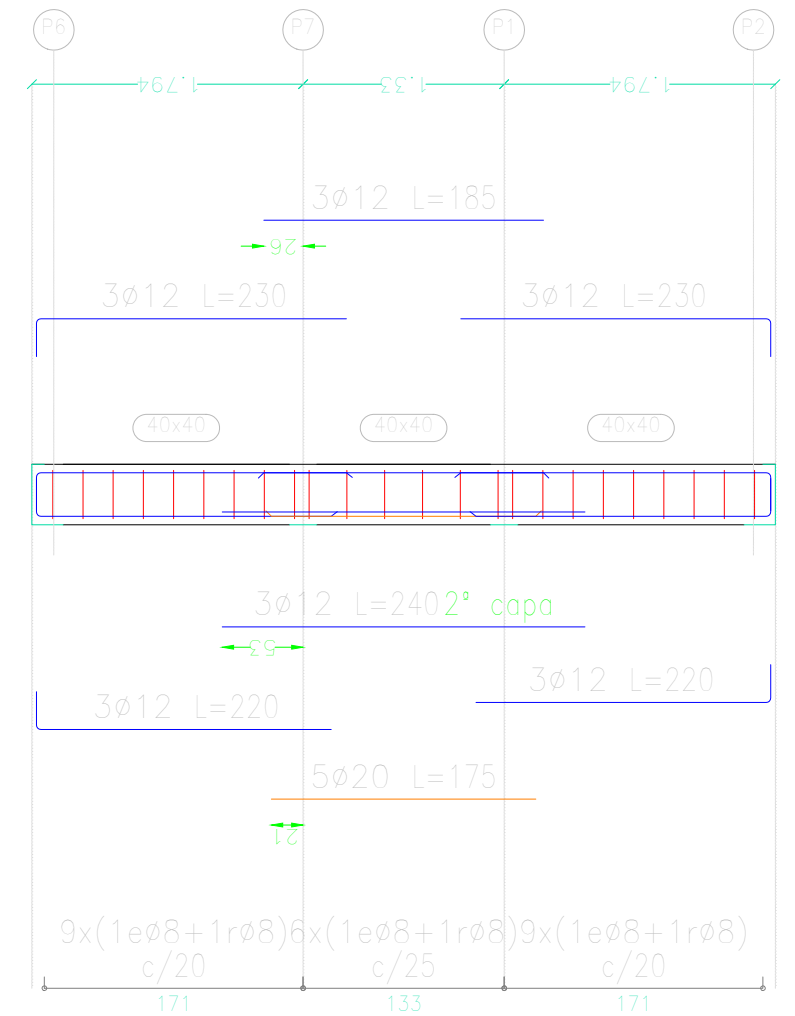
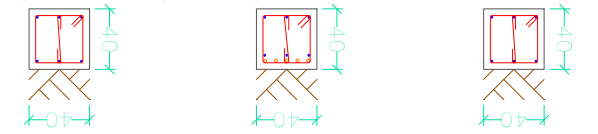
Pórtico 1
Pórtico 2
Ver arranques en el despiece de pilares o alzado de muros



Pórtico 3
Pórtico 4
Ver arranques en el despiece de pilares o alzado de muros



Pórtico 5
Ver arranques en el despiece de pilares o alzado de muros



CUADRO DE CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES

HORMIGON (Código Estructural)						ACERO EN BARRAS CORRUGADAS (Código Estructural)		
Elemento estructural	Tipo de hormigón	Nivel de control	Coefficiente minoración	Relación máx. agua / cemento	Contenido mínimo cemento	Elemento estructural	Tipo de acero	Coefficiente de minoración
Cimentación	HA-25/F/20/XC2	Estadístico	$\gamma_c = 1.50$	0.60	275 kg	Toda la obra	B 500 S	$\gamma_s = 1.15$



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER:
MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS



Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos - Universitat Politècnica de València

AUTOR DEL PROYECTO:
IVÁN FRANCISCO ESQUER ROCH
Iván Esquer

ESCALA A3:
1:50
UNIDADES:
Metros

PROYECTO:
PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).

FECHA:
SEPT- 2022

TÍTULO DEL PLANO:
DOMO 3 C2/V2 Ø8m
CIMENTACIÓN
ALZADOS

Nº DE PLANO:
03.09.02

HOJA 1 DE 1

DOCUMENTO Nº3: PRESUPUESTO

DENOMINACIÓN	TITULACIÓN	MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS
	PROYECTO DE DEFINICIÓN Y DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA ESTANDARIZACIÓN E INDUSTRIALIZACIÓN DE DOMOS GEODÉSICOS PARA EDIFICACIONES. APLICACIÓN PRÁCTICA EN LA LOCALIDAD DE PICASSENT (VALENCIA).	
	CENTRO EDUCATIVO	ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.

1. Mediciones

2. Cuadro de precios Nº1

3. Presupuestos parciales

4. Presupuesto general

MEDICIONES

DESCRIPCION	Uds.	LARGO	ANCHO	ALTO	SUBTOTAL	TOTAL
-------------	------	-------	-------	------	----------	-------

CAPITULO Nº 1 DOMO 1 - C1/V4/10M**1.1 ESTRUCTURA GEODÉSICA - C1/V4/10M****1.1.1 M FABRICACIÓN ESTRUCTURA - C1/V4/10M**

D1-01.01 Fabricación de domo geodésico, formado por los diferentes tipos de piezas definidos según planos del proyecto. Incluye suministro de madera aserrada de pino (Pinus sylvestris), de 90x45 mm de sección, clase resistente C24 según UNE-EN 338 y UNE-EN 1912, para clase de servicio 2, con protección frente a agentes bióticos, con acabado cepillado; cortado y enumerado en taller. Transporte y acopio en obra.

TIPO A	30	1,400			42,000	
TIPO B	30	1,600			48,000	
TIPO C	30	1,400			42,000	
TIPO D	30	1,400			42,000	
TIPO E	30	1,600			48,000	
TIPO F	30	1,400			42,000	
TIPO G	29	1,400			40,600	
TIPO H	29	1,600			46,400	
TIPO I	29	1,400			40,600	
TIPO J	29	1,400			40,600	
TIPO K	29	1,600			46,400	
TIPO L	29	1,400			40,600	
TIPO M	27	1,600			43,200	
TIPO N	27	1,600			43,200	
TIPO O	27	1,600			43,200	
TIPO P	27	1,600			43,200	
LARGUEROS	2	2,500			5,000	
DINTEL	1	1,700			1,700	
DIAGONAL SUPERIOR	2	1,400			2,800	
DIAGONAL INFERIOR	2	1,400			2,800	
SUPERIOR LATERAL	2	0,900			1,800	
SUPERIOR CENTRAL	2	0,800			1,600	
INTERMEDIO LATERAL	2	0,300			0,600	
INFERIOR LATERAL	2	0,200			0,400	
P1	1	1,500			1,500	
P2	1	1,500			1,500	
P3	1	1,600			1,600	
P4	1	1,600			1,600	
P5	1	0,800			0,800	
P6	1	0,800			0,800	
					0,000	
					716,500	

TOTAL m DE MEDICION: 716,500

1.1.2 M FABRICACIÓN ESTRUCTURA 100X90 MM - C1/V4/10M

D1-01.01b Fabricación de domo geodésico, formado por los diferentes tipos de piezas definidos según planos del proyecto. Incluye suministro de madera aserrada de pino (Pinus sylvestris), de 100x90 mm de sección, clase resistente C24 según UNE-EN 338 y UNE-EN 1912, para clase de servicio 2, con protección frente a agentes bióticos, con acabado cepillado; cortado y enumerado en taller. Transporte y acopio en obra.

TOTAL m DE MEDICION: 1,000

1.1.3 UD MONTAJE ESTRUCTURA - C1/V4/10M

D1-01.02 Montaje de estructura geodésica, que incluye el ensamblaje de las piezas para montar triángulos y posteriormente el montaje de la estructura con tipo de unión Good Kharma. Incluso elementos de fijación mecánicos definidos en proyecto.

TOTAL ud DE MEDICION: 1,000

DESCRIPCION	Uds.	LARGO	ANCHO	ALTO	SUBTOTAL	TOTAL
-------------	------	-------	-------	------	----------	-------

1.2 CIMENTACIÓN**1.2.1 M2 DESPEJE, DESBROCE TERRENO Y EXCAVACIÓN**

AMMD.1a Despeje, desbroce, refino y excavación de terrenos hasta 25cm de profundidad, con vegetación de hasta 2m de altura, incluida la retirada de material sin incluir la carga y transporte.

TOTAL m2 DE MEDICION: 90,000

1.2.2 M3 SUMINISTRO Y VERTIDO DE HL-150/F/20

ECHH.1... Suministro y vertido de hormigón de limpieza de HL-150/F/20, para formación de solera de asiento, con una dosificación mínima de cemento de 150 kg/m3, de consistencia fluida, tamaño máximo de árido 20mm, vertido directamente desde camión, en la base de la cimentación, transportado y puesto en obra, según Código Estructural, DB SE-C del CTE y NTE-CS.

TOTAL m3 DE MEDICION: 13,500

1.2.3 M ENCOFRADO DE VIGA DE CIMENTACIÓN DE HASTA 0,90 M DE ANCHO

EEHF.4a Encofrado de viga de cimentación de hasta 0,90 m de ancho, incluso desencofrado, limpieza y almacenamiento

TOTAL m DE MEDICION: 63,800

1.2.4 KG ACERO P/HORMIGÓN B500 S

EEHA.1c Suministro y colocación en obra de acero corrugado B 500 S en jaulas para estructuras de hormigón

TOTAL kg DE MEDICION: 419,000

1.2.5 M3 SUMINISTRO Y VERTIDO HA-25/F/20/XC2 P/ELEM HRZ

EEHH.2... Suministro y vertido de hormigón armado de resistencia característica 25 N/mm2, consistencia fluida, tamaño máximo de árido 20mm, clase general de exposición normal con humedad media, vertido mediante cubilote, en elemento viga, elaborado, transportado y puesto en obra según Código Estructural.

TOTAL m3 DE MEDICION: 5,000

DESCRIPCION	Uds.	LARGO	ANCHO	ALTO	SUBTOTAL	TOTAL
-------------	------	-------	-------	------	----------	-------

1.3 CERRAMIENTO**1.3.1 M2 DOBLE CAPA DE TABLERO OSB-3 E15 MM MACHIEBRADO EN CERRAMIENTO SUMINISTRO E INSTALACIÓN EN EXTERIOR E INTERIOR DE LA ESTRUCTURA, CON 10 CM INTERIORES DE LANA DE ROCA**

FAB-OS... Doble capa de tablero de virutas orientadas (OSB) clase 3 de uso estructural en ambiente húmedo de 2500x1250 mm y espesor 15 mm con bordes machihembrados, clasificación E1 (bajo contenido en formaldehído) y Euroclase D-s2, d0 de reacción al fuego según EN 13501, cortado en triángulos a medida, atornillado a estructura para formación de cerramiento y con cintas de sellado de estanqueidad entre tableros, incluidos lámina hidrófuga transpirable, anclajes y uniones de montaje en la cara exterior de la estructura y en su cara interior con 10 cm interiores de lana de roca para aislamiento térmico.

PIEZA 1	30	0,900	2,000	54,000
PIEZA 2	30	0,950	2,000	57,000
PIEZA 3	29	0,910	2,000	52,780
PIEZA 4	29	0,910	2,000	52,780
PIEZA 5	27	1,090	2,000	58,860
PIEZA 6	9	1,140	2,000	20,520
PIEZA FRONTAL PUERTA	1	1,690		1,690
PIEZA LATERAL SUPERIOR	2	0,810	2,000	3,240
PIEZA LATERAL INFERIOR	2	0,400	2,000	1,600
PIEZA SOBRE DINTEL	2	0,760	2,000	3,040
PIEZA TRIÁNGULO SUPERIOR	2	0,360	2,000	1,440
PIEZA TRIÁNGULO INFERIOR	2	0,520	2,000	2,080

309,030

TOTAL m2 DE MEDICION: 309,030**1.3.2 M2 REVESTIMIENTO DE CORCHO PROYECTADO**

REVEST Revestimiento de corcho de granulometría comprendida entre 0,1 y 0,4 mm, Corcho Natural Proyectado Fino, color blanco, aplicado en dos manos, de 2,3 mm de espesor total, aplicado mecánicamente, previa aplicación de imprimación acrílica, reguladora de la absorción, para uso en interiores o en exteriores, sobre paramento exterior de paneles de madera de OSB. El precio incluye la protección de los elementos del entorno que puedan verse afectados durante los trabajos y la resolución de puntos singulares.

TOTAL M2 DE MEDICION: 155,360

DESCRIPCION	Uds.	LARGO	ANCHO	ALTO	SUBTOTAL	TOTAL
-------------	------	-------	-------	------	----------	-------

1.4 ARQUITECTURA**1.4.1 U PUERTA ABATIBLE 1 HOJA**

EFTL13... Ejecución de apertura en domo para la colocación de una puerta abatible de una hoja con dos paños laterales fijos, realizada con perfiles de aluminio anodizado de 15 micras con sello de calidad, junta de estanqueidad interior, sellante en esquinas del cerco y accesorios que garanticen su correcto funcionamiento, acabada en color teca. Incluyendo la apertura del hueco en la estructura geodésica, incluso replanteo, colocación, aclomado y nivelado, montaje y regulación, sellado perimetral mediante silicona y limpieza, según NTE-FCL, con clasificación a la permeabilidad al aire según UNE-EN 12207, clasificación a la estanqueidad al agua según UNE-EN 12208 y clasificación a la resistencia a la carga del viento según UNE-EN 12210.

TOTAL u DE MEDICION: 1,000**1.4.2 U VENTANA TRIANGULAR ABATIBLE CARPINTERÍA DE MADERA**

VENT-A... Ventana triangular abatible carpintería de madera

TOTAL U DE MEDICION: 5,000**1.4.3 U VENTANA FIJA DE CRISTAL TRIANGULAR**

VENT-F... Ventana fija para cerramiento de cristal

TOTAL U DE MEDICION: 26,000**1.4.4 M2 PAV TARIMA MACIZA TEKA E/22 MM P/EXT**

ERSM2... Pavimentos para exteriores realizados con tarima maciza de Teka de 22 mm de espesor, dispuesta sobre rastreles apoyados en soportes regulables en altura cada 40 cm, separados una distancia de 40 cm. Elementos de tarima fijados mediante clip atornillado a rastrel

TOTAL m2 DE MEDICION: 75,000**1.4.5 M2 TABIQUERÍA INTERIOR DE PLADUR**

EFPR.1... Suministro y colocación de tabiquería interior de pladur con todos sus accesorios de autoportantes.

TOTAL m2 DE MEDICION: 10,000

DESCRIPCION	Uds.	LARGO	ANCHO	ALTO	SUBTOTAL	TOTAL
-------------	------	-------	-------	------	----------	-------

CAPITULO Nº 2 DOMO 2 - C1/V2/6M**2.1 ESTRUCTURA GEODÉSICA - C1/V2/6M****2.1.1 M FABRICACIÓN ESTRUCTURA - C1/V2/6M**

D2-01.01 Fabricación de domo geodésico, formado por los diferentes tipos de piezas definidos según planos del proyecto. Incluye suministro de madera aserrada de pino (*Pinus sylvestris*), de 100x50 mm de sección, clase resistente C24 según UNE-EN 338 y UNE-EN 1912, para clase de servicio 2, con protección frente a agentes bióticos, con acabado cepillado; cortado y enumerado en taller. Transporte y acopio en obra.

A	60	1,800			108,000	
B	30	1,600			48,000	
C	30	1,800			54,000	
D	30	1,600			48,000	
P1	4	1,200			4,800	
P2	4	1,200			4,800	
P3	4	0,700			2,800	
P4	4	0,700			2,800	
P5	4	1,000			4,000	
P6	4	1,100			4,400	
P7	4	1,600			6,400	
P8	4	1,600			6,400	
P9	4	2,200			8,800	
P10	4	0,400			1,600	
P11	4	0,450			1,800	

306,600

TOTAL m DE MEDICION: 306,600

2.1.2 UD MONTAJE ESTRUCTURA - C1/V2/6M

D2-01.02 Montaje de estructura geodésica, que incluye el ensamblaje de las piezas para montar triángulos y posteriormente el montaje de la estructura con tipo de unión Good Kharma. Incluso elementos de fijación mecánicos definidos en proyecto.

TOTAL ud DE MEDICION: 1,000

DESCRIPCION	Uds.	LARGO	ANCHO	ALTO	SUBTOTAL	TOTAL
-------------	------	-------	-------	------	----------	-------

2.2 CIMENTACIÓN**2.2.1 M2 DESPEJE, DESBROCE TERRENO Y EXCAVACIÓN**

AMMD.1a Despeje, desbroce, refino y excavación de terrenos hasta 25cm de profundidad, con vegetación de hasta 2m de altura, incluida la retirada de material sin incluir la carga y transporte.

TOTAL m2 DE MEDICION: 20,000

2.2.2 M3 SUMINISTRO Y VERTIDO DE HL-150/F/20

ECHH.1... Suministro y vertido de hormigón de limpieza de HL-150/F/20, para formación de solera de asiento, con una dosificación mínima de cemento de 150 kg/m3, de consistencia fluida, tamaño máximo de árido 20mm, vertido directamente desde camión, en la base de la cimentación, transportado y puesto en obra, según Código Estructural, DB SE-C del CTE y NTE-CS.

TOTAL m3 DE MEDICION: 3,000

2.2.3 M ENCOFRADO DE VIGA DE CIMENTACIÓN DE HASTA 0,90 M DE ANCHO

EEHF.4a Encofrado de viga de cimentación de hasta 0,90 m de ancho, incluso desencofrado, limpieza y almacenamiento

TOTAL m DE MEDICION: 39,000

2.2.4 KG ACERO P/HORMIGÓN B500 S

EEHA.1c Suministro y colocación en obra de acero corrugado B 500 S en jaulas para estructuras de hormigón

TOTAL kg DE MEDICION: 234,000

2.2.5 M3 SUMINISTRO Y VERTIDO HA-25/F/20/XC2 P/ELEM HRZ

EEHH.2... Suministro y vertido de hormigón armado de resistencia característica 25 N/mm2, consistencia fluida, tamaño máximo de árido 20mm, clase general de exposición normal con humedad media, vertido mediante cubilote, en elemento viga, elaborado, transportado y puesto en obra según Código Estructural.

TOTAL m3 DE MEDICION: 3,150

DESCRIPCION	Uds.	LARGO	ANCHO	ALTO	SUBTOTAL	TOTAL
-------------	------	-------	-------	------	----------	-------

2.3 CERRAMIENTO

2.3.1 M2 DOBLE CAPA DE TABLERO OSB-3 E15 MM MACHIEMBRADO EN CERRAMIENTO SUMINISTRO E INSTALACIÓN EN EXTERIOR E INTERIOR DE LA ESTRUCTURA, CON 10 CM INTERIORES DE LANA DE ROCA

FAB-OS... Doble capa de tablero de virutas orientadas (OSB) clase 3 de uso estructural en ambiente húmedo de 2500x1250 mm y espesor 15 mm con bordes machihembrados, clasificación E1 (bajo contenido en formaldehído) y Euroclase D-s2, d0 de reacción al fuego según EN 13501, cortado en triángulos a medida, atornillado a estructura para formación de cerramiento y con cintas de sellado de estanqueidad entre tableros, incluidos lámina hidrófuga transpirable, anclajes y uniones de montaje en la cara exterior de la estructura y en su cara interior con 10 cm interiores de lana de roca para aislamiento térmico.

Triángulo 1	16	1,500			24,000	
Triángulo 2	52	1,250			65,000	
Pieza sobre dintel	2	0,830			1,660	
Pieza lateral sup izq	2	0,880			1,760	
Pieza lateral sup dcha	2	0,780			1,560	
Pieza lateral inf izq	2	0,780			1,560	
Pieza lateral inf dcha	2	0,780			1,560	
Pieza frontal inferior	4	0,250			1,000	
Interior puerta sup	4	0,320			1,280	
Interior puerta inf	4	0,250			1,000	
					0,000	
					0,000	
					100,380	

TOTAL m2 DE MEDICION: 100,380

2.3.2 M2 REVESTIMIENTO DE CORCHO PROYECTADO

REVEST Revestimiento de corcho de granulometría comprendida entre 0,1 y 0,4 mm, Corcho Natural Proyectado Fino, color blanco, aplicado en dos manos, de 2,3 mm de espesor total, aplicado mecánicamente, previa aplicación de imprimación acrílica, reguladora de la absorción, para uso en interiores o en exteriores, sobre paramento exterior de paneles de madera de OSB. El precio incluye la protección de los elementos del entorno que puedan verse afectados durante los trabajos y la resolución de puntos singulares.

TOTAL M2 DE MEDICION: 50,200

DESCRIPCION	Uds.	LARGO	ANCHO	ALTO	SUBTOTAL	TOTAL
-------------	------	-------	-------	------	----------	-------

2.4 ARQUITECTURA

2.4.1 U PUERTA ABATIBLE 1 HOJA

EFTL13... Ejecución de apertura en domo para la colocación de una puerta abatible de una hoja con dos paños laterales fijos, realizada con perfiles de aluminio anodizado de 15 micras con sello de calidad, junta de estanqueidad interior, sellante en esquinas del cerco y accesorios que garanticen su correcto funcionamiento, acabada en color teca. Incluyendo la apertura del hueco en la estructura geodésica, incluso replanteo, colocación, aclomado y nivelado, montaje y regulación, sellado perimetral mediante silicona y limpieza, según NTE-FCL, con clasificación a la permeabilidad al aire según UNE-EN 12207, clasificación a la estanqueidad al agua según UNE-EN 12208 y clasificación a la resistencia a la carga del viento según UNE-EN 12210.

TOTAL u DE MEDICION: 1,000

2.4.2 U VENTANA TRIANGULAR ABATIBLE CARPINTERÍA DE MADERA

VENT-A... Ventana triangular abatible carpintería de madera

TOTAL U DE MEDICION: 3,000

2.4.3 U VENTANA FIJA DE CRISTAL TRIANGULAR

VENT-F... Ventana fija para cerramiento de cristal

TOTAL U DE MEDICION: 6,000

2.4.4 M2 PAV TARIMA MACIZA TEKA E/22 MM P/EXT

ERSM2... Pavimentos para exteriores realizados con tarima maciza de Teka de 22 mm de espesor, dispuesta sobre rastreles apoyados en soportes regulables en altura cada 40 cm, separados una distancia de 40 cm. Elementos de tarima fijados mediante clip atornillado a rastrel

TOTAL m2 DE MEDICION: 19,000

2.4.5 M2 TABIQUERÍA INTERIOR DE PLADUR

EFPR.1... Suministro y colocación de tabiquería interior de pladur con todos sus accesorios de autoportantes.

TOTAL m2 DE MEDICION: 5,000

DESCRIPCION	Uds.	LARGO	ANCHO	ALTO	SUBTOTAL	TOTAL
-------------	------	-------	-------	------	----------	-------

CAPITULO Nº 3 DOMO 3 - C2/V2/8M**3.1 ESTRUCTURA GEODÉSICA - C2/V2/8M****3.1.1 M FABRICACIÓN ESTRUCTURA - C2/V2/8M**

D3-01.01 Fabricación de domo geodésico, formado por los diferentes tipos de piezas definidos según planos del proyecto. Incluye suministro de madera aserrada de pino (Pinus sylvestris), de 140x70 mm de sección, clase resistente C24 según UNE-EN 338 y UNE-EN 1912, para clase de servicio 2, con protección frente a agentes bióticos, con acabado cepillado; cortado y enumerado en taller. Transporte y acopio en obra.

A	60	1,400			84,000	
B	60	2,500			150,000	
C	60	2,200			132,000	
D	60	2,200			132,000	
E	60	2,500			150,000	
F	60	1,400			84,000	
P1	2	1,400			2,800	
P2	4	2,600			10,400	
P3	4	0,550			2,200	
P4	4	1,900			7,600	
P5	4	1,650			6,600	
					0,000	
					0,000	
					0,000	
					761,600	
TOTAL m DE MEDICION					761,600	

3.1.2 UD MONTAJE ESTRUCTURA - C2/V2/8M

D3-01.02 Montaje de estructura geodésica, que incluye el ensamblaje de las piezas para montar triángulos y posteriormente el montaje de la estructura con tipo de unión Good Kharma. Incluso elementos de fijación mecánicos definidos en proyecto.

TOTAL ud DE MEDICION **1,000**

DESCRIPCION	Uds.	LARGO	ANCHO	ALTO	SUBTOTAL	TOTAL
-------------	------	-------	-------	------	----------	-------

3.2 CIMENTACIÓN**3.2.1 M2 DESPEJE, DESBROCE TERRENO Y EXCAVACIÓN**

AMMD.1a Despeje, desbroce, refino y excavación de terrenos hasta 25cm de profundidad, con vegetación de hasta 2m de altura, incluida la retirada de material sin incluir la carga y transporte.

TOTAL m2 DE MEDICION **37,200**

3.2.2 M3 SUMINISTRO Y VERTIDO DE HL-150/F/20

ECHH.1... Suministro y vertido de hormigón de limpieza de HL-150/F/20, para formación de solera de asiento, con una dosificación mínima de cemento de 150 kg/m3, de consistencia fluida, tamaño máximo de árido 20mm, vertido directamente desde camión, en la base de la cimentación, transportado y puesto en obra, según Código Estructural, DB SE-C del CTE y NTE-CS.

TOTAL m3 DE MEDICION **5,600**

3.2.3 M ENCOFRADO DE VIGA DE CIMENTACIÓN DE HASTA 0,90 M DE ANCHO

EEHF.4a Encofrado de viga de cimentación de hasta 0,90 m de ancho, incluso desencofrado, limpieza y almacenamiento

TOTAL m DE MEDICION **21,500**

3.2.4 KG ACERO P/HORMIGÓN B500 S

EEHA.1c Suministro y colocación en obra de acero corrugado B 500 S en jaulas para estructuras de hormigón

TOTAL kg DE MEDICION **254,000**

3.2.5 M3 SUMINISTRO Y VERTIDO HA-25/F/20/XC2 P/ELEM HRZ

EEHH.2... Suministro y vertido de hormigón armado de resistencia característica 25 N/mm2, consistencia fluida, tamaño máximo de árido 20mm, clase general de exposición normal con humedad media, vertido mediante cubilote, en elemento viga, elaborado, transportado y puesto en obra según Código Estructural.

TOTAL m3 DE MEDICION **3,500**

CUADRO DE PRECIOS Nº1

Nº Ud	DESCRIPCION	IMPORTE	
		EN CIFRA €	EN LETRA €
1 M2	DESPEJE, DESBROCE TERRENO Y EXCAVACIÓN (AMMD.1a) Despeje, desbroce, refino y excavación de terrenos hasta 25cm de profundidad, con vegetación de hasta 2m de altura, incluida la retirada de material sin incluir la carga y transporte.	1,08 €	Un euro con ocho céntimos
2 M	FABRICACIÓN ESTRUCTURA - C1/V4/10M (D1-01.01) Fabricación de domo geodésico, formado por los diferentes tipos de piezas definidos según planos del proyecto. Incluye suministro de madera aserrada de pino (Pinus sylvestris), de 90x45 mm de sección, clase resistente C24 según UNE-EN 338 y UNE-EN 1912, para clase de servicio 2, con protección frente a agentes bióticos, con acabado cepillado; cortado y enumerado en taller. Transporte y acopio en obra.	10,99 €	Diez euros con noventa y nueve céntimos
3 M	FABRICACIÓN ESTRUCTURA 100X90 MM - C1/V4/10M (D1-01.01b) Fabricación de domo geodésico, formado por los diferentes tipos de piezas definidos según planos del proyecto. Incluye suministro de madera aserrada de pino (Pinus sylvestris), de 100x90 mm de sección, clase resistente C24 según UNE-EN 338 y UNE-EN 1912, para clase de servicio 2, con protección frente a agentes bióticos, con acabado cepillado; cortado y enumerado en taller. Transporte y acopio en obra.	21,10 €	Veintiun euros con diez céntimos
4 UD	MONTAJE ESTRUCTURA - C1/V4/10M (D1-01.02) Montaje de estructura geodésica, que incluye el ensamblaje de las piezas para montar triángulos y posteriormente el montaje de la estructura con tipo de unión Good Kharma. Incluso elementos de fijación mecánicos definidos en proyecto.	2.378,64 €	Dos mil trescientos setenta y ocho euros con sesenta y cuatro céntimos
5 M	FABRICACIÓN ESTRUCTURA - C1/V2/6M (D2-01.01) Fabricación de domo geodésico, formado por los diferentes tipos de piezas definidos según planos del proyecto. Incluye suministro de madera aserrada de pino (Pinus sylvestris), de 100x50 mm de sección, clase resistente C24 según UNE-EN 338 y UNE-EN 1912, para clase de servicio 2, con protección frente a agentes bióticos, con acabado cepillado; cortado y enumerado en taller. Transporte y acopio en obra.	12,06 €	Doce euros con seis céntimos
6 UD	MONTAJE ESTRUCTURA - C1/V2/6M (D2-01.02) Montaje de estructura geodésica, que incluye el ensamblaje de las piezas para montar triángulos y posteriormente el montaje de la estructura con tipo de unión Good Kharma. Incluso elementos de fijación mecánicos definidos en proyecto.	1.630,45 €	Mil seiscientos treinta euros con cuarenta y cinco céntimos
7 M	FABRICACIÓN ESTRUCTURA - C2/V2/8M (D3-01.01) Fabricación de domo geodésico, formado por los diferentes tipos de piezas definidos según planos del proyecto. Incluye suministro de madera aserrada de pino (Pinus sylvestris), de 140x70 mm de sección, clase resistente C24 según UNE-EN 338 y UNE-EN 1912, para clase de servicio 2, con protección frente a agentes bióticos, con acabado cepillado; cortado y enumerado en taller. Transporte y acopio en obra.	20,11 €	Veinte euros con once céntimos

Nº Ud	DESCRIPCION	IMPORTE	
		EN CIFRA €	EN LETRA €
8 UD	MONTAJE ESTRUCTURA - C2/V2/8M (D3-01.02) Montaje de estructura geodésica, que incluye el ensamblaje de las piezas para montar triángulos y posteriormente el montaje de la estructura con tipo de unión Good Kharma. Incluso elementos de fijación mecánicos definidos en proyecto.	1.829,83 €	Mil ochocientos veintinueve euros con ochenta y tres céntimos
9 M3	SUMINISTRO Y VERTIDO DE HL-150/F/20 (ECHH.1cba) Suministro y vertido de hormigón de limpieza de HL-150/F/20, para formación de solera de asiento, con una dosificación mínima de cemento de 150 kg/m3, de consistencia fluida, tamaño máximo de árido 20mm, vertido directamente desde camión, en la base de la cimentación, transportado y puesto en obra, según Código Estructural, DB SE-C del CTE y NTE-CS.	123,35 €	Ciento veintitres euros con treinta y cinco céntimos
10 KG	ACERO P/HORMIGÓN B500 S (EEHA.1c) Suministro y colocación en obra de acero corrugado B 500 S en jaulas para estructuras de hormigón	1,92 €	Un euro con noventa y dos céntimos
11 M	ENCOFRADO DE VIGA DE CIMENTACIÓN DE HASTA ... (EEHF.4a) Encofrado de viga de cimentación de hasta 0,90 m de ancho, incluso desencofrado, limpieza y almacenamiento	18,81 €	Dieciocho euros con ochenta y un céntimos
12 M3	SUMINISTRO Y VERTIDO HA-25/F/20/XC2 P/ELEM HRZ (EEHH.2cbbbccaa) Suministro y vertido de hormigón armado de resistencia característica 25 N/mm2, consistencia fluida, tamaño máximo de árido 20mm, clase general de exposición normal con humedad media, vertido mediante cubilote, en elemento viga, elaborado, transportado y puesto en obra según Código Estructural.	153,39 €	Ciento cincuenta y tres euros con treinta y nueve céntimos
13 M2	TABIQUERÍA INTERIOR DE PLADUR (EFPR.1baaba) Suministro y colocación de tabiquería interior de pladur con todos sus accesorios de autoportantes.	18,74 €	Dieciocho euros con setenta y cuatro céntimos
14 U	PUERTA ABATIBLE 1 HOJA (EFTL13aolxb) Ejecución de apertura en domo para la colocación de una puerta abatible de una hoja con dos paños laterales fijos, realizada con perfiles de aluminio anodizado de 15 micras con sello de calidad, junta de estanqueidad interior, sellante en esquinas del cerco y accesorios que garanticen su correcto funcionamiento, acabada en color teca. Incluyendo la apertura del hueco en la estructura geodésica, incluso replanteo, colocación, acoplado y nivelado, montaje y regulación, sellado perimetral mediante silicona y limpieza, según NTE-FCL, con clasificación a la permeabilidad al aire según UNE-EN 12207, clasificación a la estanqueidad al agua según UNE-EN 12208 y clasificación a la resistencia a la carga del viento según UNE-EN 12210.	828,24 €	Ochocientos veintiocho euros con veinticuatro céntimos

Nº Ud	DESCRIPCION	IMPORTE	
		EN CIFRA €	EN LETRA €
15 M2	PAV TARIMA MACIZA TEKA E/22 MM P/EXT (ERSM22ceb) Pavimentos para exteriores realizados con tarima maciza de Teka de 22 mm de espesor, dispuesta sobre rastreles apoyados en soportes regulables en altura cada 40 cm, separados una distancia de 40 cm. Elementos de tarima fijados mediante clip atornillado a rastrel	175,55 €	Ciento setenta y cinco euros con cincuenta y cinco céntimos
16 M2	DOBLE CAPA DE TABLERO OSB-3 E15 MM MACHIE... (FAB-OSB01) Doble capa de tablero de virutas orientadas (OSB) clase 3 de uso estructural en ambiente húmedo de 2500x1250 mm y espesor 15 mm con bordes machihembrados, clasificación E1 (bajo contenido en formaldehído) y Euroclase D-s2, d0 de reacción al fuego según EN 13501, cortado en triángulos a medida, atornillado a estructura para formación de cerramiento y con cintas de sellado de estanqueidad entre tableros, incluidos lámina hidrófuga transpirable, anclajes y uniones de montaje en la cara exterior de la estructura y en su cara interior con 10 cm interiores de lana de roca para aislamiento térmico.	48,87 €	Cuarenta y ocho euros con ochenta y siete céntimos
17 M2	REVESTIMIENTO DE CORCHO PROYECTADO (REVEST) Revestimiento de corcho de granulometría comprendida entre 0,1 y 0,4 mm, Corcho Natural Proyectado Fino, color blanco, aplicado en dos manos, de 2,3 mm de espesor total, aplicado mecánicamente, previa aplicación de imprimación acrílica, reguladora de la absorción, para uso en interiores o en exteriores, sobre paramento exterior de paneles de madera de OSB. El precio incluye la protección de los elementos del entorno que puedan verse afectados durante los trabajos y la resolución de puntos singulares.	30,21 €	Treinta euros con veintiu céntimos
18 U	VENTANA TRIANGULAR ABATIBLE CARPINTERÍA DE... (VENT-ABT) Ventana triangular abatible carpintería de madera	658,00 €	Seiscientos cincuenta y ocho euros
19 U	VENTANA FIJA DE CRISTAL TRIANGULAR (VENT-FIJA) Ventana fija para cerramiento de cristal	427,00 €	Cuatrocientos veintisiete euros
ADVERTENCIA			
Los precios designados en letra en el cuadro anterior, con la rebaja que resulte en la adjudicación en su caso, son los que sirven de base al contrato, y se utilizarán para valorar la obra ejecutada, siguiendo lo prevenido en la ley vigente, considerando incluidos en ellos los trabajos, medios auxiliares y materiales necesarios para la ejecución de la unidad de obra que definan, por lo que el Contratista no podrá reclamar que se introduzca modificación alguna en ello, bajo ningún pretexto de error u omisión.			

PRESUPUESTOS PARCIALES

PRESUPUESTOS PARCIALES

Num.	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
1 DOMO 1 - C1/V4/10M					
1.1.- ESTRUCTURA GEODÉSICA - C1/V4/10M					
1.1.1		FABRICACIÓN ESTRUCTURA - C1/V4/10M	716,500	10,99	7.874,340
D1-01.01	m	Fabricación de domo geodésico, formado por los diferentes tipos de piezas definidos según planos del proyecto. Incluye suministro de madera aserrada de pino (Pinus sylvestris), de 90x45 mm de sección, clase resistente C24 según UNE-EN 338 y UNE-EN 1912, para clase de servicio 2, con protección frente a agentes bióticos, con acabado cepillado; cortado y enumerado en taller. Transporte y acopio en obra.			
1.1.2		FABRICACIÓN ESTRUCTURA 100X90 MM - C1/V4/10M	1,000	21,10	21,100
D1-01.01b	m	Fabricación de domo geodésico, formado por los diferentes tipos de piezas definidos según planos del proyecto. Incluye suministro de madera aserrada de pino (Pinus sylvestris), de 100x90 mm de sección, clase resistente C24 según UNE-EN 338 y UNE-EN 1912, para clase de servicio 2, con protección frente a agentes bióticos, con acabado cepillado; cortado y enumerado en taller. Transporte y acopio en obra.			
1.1.3		MONTAJE ESTRUCTURA - C1/V4/10M	1,000	2.378,64	2.378,640
D1-01.02	ud	Montaje de estructura geodésica, que incluye el ensamblaje de las piezas para montar triángulos y posteriormente el montaje de la estructura con tipo de unión Good Karma. Incluso elementos de fijación mecánicos definidos en proyecto.			
Total 1.1.- ESTRUCTURA GEODÉSICA - C1/V4/10M:					10.274,080
1.2.- CIMENTACIÓN					
1.2.1		DESPEJE, DESBROCE TERRENO Y EXCAVACIÓN	90,000	1,08	97,200
AMMD.1a	m2	Despeje, desbroce, refino y excavación de terrenos hasta 25cm de profundidad, con vegetación de hasta 2m de altura, incluida la retirada de material sin incluir la carga y transporte.			
1.2.2		SUMINISTRO Y VERTIDO DE HL-150/F/20	13,500	123,35	1.665,230
ECHH.1cba	m3	Suministro y vertido de hormigón de limpieza de HL-150/F/20, para formación de solera de asiento, con una dosificación mínima de cemento de 150 kg/m3, de consistencia fluida, tamaño máximo de árido 20mm, vertido directamente desde camión, en la base de la cimentación, transportado y puesto en obra, según Código Estructural, DB SE-C del CTE y NTE-CS.			
1.2.3		ENCOFRADO DE VIGA DE CIMENTACIÓN DE HASTA 0,90 M DE ANCHO	63,800	18,81	1.200,080
EEHF.4a	m	Encofrado de viga de cimentación de hasta 0,90 m de ancho, incluso desencofrado, limpieza y almacenamiento			
1.2.4		ACERO P/HORMIGÓN B500 S	419,000	1,92	804,480
EEHA.1c	kg	Suministro y colocación en obra de acero corrugado B 500 S en jaulas para estructuras de hormigón			
1.2.5		SUMINISTRO Y VERTIDO HA-25/F/20/XC2 P/ELEM HRZ	5,090	153,39	780,760
EEHH.2cbbcc...	m3	Suministro y vertido de hormigón armado de resistencia característica 25 N/mm2, consistencia fluida, tamaño máximo de árido 20mm, clase general de exposición normal con humedad media, vertido mediante cubilote, en elemento viga, elaborado, transportado y puesto en obra según Código Estructural.			
Total 1.2.- CIMENTACIÓN:					4.547,750
1.3.- CERRAMIENTO					

PRESUPUESTOS PARCIALES

Num.	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
1.3.1		DOBLE CAPA DE TABLERO OSB-3 E15 MM MACHIEMBRADO EN CERRAMIENTO SUMINISTRO E INSTALACIÓN EN EXTERIOR E INTERIOR DE LA ESTRUCTURA, CON 10 CM INTERIORES DE LANA DE ROCA	309,030	48,87	15.102,300
FAB-OSB01	m2	Doble capa de tablero de virutas orientadas (OSB) clase 3 de uso estructural en ambiente húmedo de 2500x1250 mm y espesor 15 mm con bordes machihembrados, clasificación E1 (bajo contenido en formaldehído) y Euroclase D-s2, d0 de reacción al fuego según EN 13501, cortado en triángulos a medida, atornillado a estructura para formación de cerramiento y con cintas de sellado de estanqueidad entre tableros, incluidos lámina hidrófuga transpirable, anclajes y uniones de montaje en la cara exterior de la estructura y en su cara interior con 10 cm interiores de lana de roca para aislamiento térmico.			
1.3.2		REVESTIMIENTO DE CORCHO PROYECTADO	155,360	30,21	4.693,430
REVEST	M2	Revestimiento de corcho de granulometría comprendida entre 0,1 y 0,4 mm, Corcho Natural Proyectado Fino, color blanco, aplicado en dos manos, de 2,3 mm de espesor total, aplicado mecánicamente, previa aplicación de imprimación acrílica, reguladora de la absorción, para uso en interiores o en exteriores, sobre paramento exterior de paneles de madera de OSB. El precio incluye la protección de los elementos del entorno que puedan verse afectados durante los trabajos y la resolución de puntos singulares.			
Total 1.3.- CERRAMIENTO:					19.795,730
1.4.- ARQUITECTURA					
1.4.1		PUERTA ABATIBLE 1 HOJA	1,000	828,24	828,240
EFTL13aolxb	u	Ejecución de apertura en domo para la colocación de una puerta abatible de una hoja con dos paños laterales fijos, realizada con perfiles de aluminio anodizado de 15 micras con sello de calidad, junta de estanqueidad interior, sellante en esquinas del cerco y accesorios que garanticen su correcto funcionamiento, acabada en color teca. Incluyendo la apertura del hueco en la estructura geodésica, incluso replanteo, colocación, aclomado y nivelado, montaje y regulación, sellado perimetral mediante silicona y limpieza, según NTE-FCL, con clasificación a la permeabilidad al aire según UNE-EN 12207, clasificación a la estanqueidad al agua según UNE-EN 12208 y clasificación a la resistencia a la carga del viento según UNE-EN 12210.			
1.4.2		VENTANA TRIANGULAR ABATIBLE CARPINTERÍA DE MADERA	5,000	658,00	3.290,000
VENT-ABT	U	Ventana triangular abatible carpintería de madera			
1.4.3		VENTANA FIJA DE CRISTAL TRIANGULAR	26,000	427,00	11.102,000
VENT-FIJA	U	Ventana fija para cerramiento de cristal			
1.4.4		PAV TARIMA MACIZA TEKA E/22 MM P/EXT	75,000	175,55	13.166,250
ERSM22ceb	m2	Pavimentos para exteriores realizados con tarima maciza de Teka de 22 mm de espesor, dispuesta sobre rastreles apoyados en soportes regulables en altura cada 40 cm, separados una distancia de 40 cm. Elementos de tarima fijados mediante clip atornillado a rastrel			
1.4.5		TABIQUERÍA INTERIOR DE PLADUR	10,000	18,74	187,400
EFPR.1baaba	m2	Suministro y colocación de tabiquería interior de pladur con todos sus accesorios de autoportantes.			
Total 1.4.- ARQUITECTURA:					28.573,890
TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL Nº 1 DOMO 1 - C1/V4/10M:					63.191,450

PRESUPUESTOS PARCIALES

Num.	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
2 DOMO 2 - C1/V2/6M					
2.1.- ESTRUCTURA GEODÉSICA - C1/V2/6M					
2.1.1		FABRICACIÓN ESTRUCTURA - C1/V2/6M	306,600	12,06	3.697,600
D2-01.01	m	Fabricación de domo geodésico, formado por los diferentes tipos de piezas definidos según planos del proyecto. Incluye suministro de madera aserrada de pino (<i>Pinus sylvestris</i>), de 100x50 mm de sección, clase resistente C24 según UNE-EN 338 y UNE-EN 1912, para clase de servicio 2, con protección frente a agentes bióticos, con acabado cepillado; cortado y enumerado en taller. Transporte y acopio en obra.			
2.1.2		MONTAJE ESTRUCTURA - C1/V2/6M	1,000	1.630,45	1.630,450
D2-01.02	ud	Montaje de estructura geodésica, que incluye el ensamblaje de las piezas para montar triángulos y posteriormente el montaje de la estructura con tipo de unión Good Khama. Incluso elementos de fijación mecánicos definidos en proyecto.			
Total 2.1.- ESTRUCTURA GEODÉSICA - C1/V2/6M:					5.328,050
2.2.- CIMENTACIÓN					
2.2.1		DESPEJE, DESBROCE TERRENO Y EXCAVACIÓN	20,000	1,08	21,600
AMMD.1a	m2	Despeje, desbroce, refino y excavación de terrenos hasta 25cm de profundidad, con vegetación de hasta 2m de altura, incluida la retirada de material sin incluir la carga y transporte.			
2.2.2		SUMINISTRO Y VERTIDO DE HL-150/F/20	3,000	123,35	370,050
ECHH.1cba	m3	Suministro y vertido de hormigón de limpieza de HL-150/F/20, para formación de solera de asiento, con una dosificación mínima de cemento de 150 kg/m3, de consistencia fluida, tamaño máximo de árido 20mm, vertido directamente desde camión, en la base de la cimentación, transportado y puesto en obra, según Código Estructural, DB SE-C del CTE y NTE-CS.			
2.2.3		ENCOFRADO DE VIGA DE CIMENTACIÓN DE HASTA 0,90 M DE ANCHO	39,000	18,81	733,590
EEHF.4a	m	Encofrado de viga de cimentación de hasta 0,90 m de ancho, incluso desencofrado, limpieza y almacenamiento			
2.2.4		ACERO P/HORMIGÓN B500 S	234,000	1,92	449,280
EEHA.1c	kg	Suministro y colocación en obra de acero corrugado B 500 S en jaulas para estructuras de hormigón			
2.2.5		SUMINISTRO Y VERTIDO HA-25/F/20/XC2 P/ELEM HRZ	3,150	153,39	483,180
EEHH.2cbbcc...	m3	Suministro y vertido de hormigón armado de resistencia característica 25 N/mm2, consistencia fluida, tamaño máximo de árido 20mm, clase general de exposición normal con humedad media, vertido mediante cubilote, en elemento viga, elaborado, transportado y puesto en obra según Código Estructural.			
Total 2.2.- CIMENTACIÓN:					2.057,700
2.3.- CERRAMIENTO					
2.3.1		DOBLE CAPA DE TABLERO OSB-3 E15 MM MACHIEBRADO EN CERRAMIENTO SUMINISTRO E INSTALACIÓN EN EXTERIOR E INTERIOR DE LA ESTRUCTURA, CON 10 CM INTERIORES DE LANA DE ROCA	100,380	48,87	4.905,570
FAB-OSB01	m2	Doble capa de tablero de virutas orientadas (OSB) clase 3 de uso estructural en ambiente húmedo de 2500x1250 mm y espesor 15 mm con bordes machihembrados, clasificación E1 (bajo contenido en formaldehído) y Euroclase D-s2, d0 de reacción al fuego según EN 13501, cortado en triángulos a medida, atornillado a estructura para formación de cerramiento y con cintas de sellado de estanqueidad entre tableros, incluidos lámina hidrófuga transpirable, anclajes y uniones de montaje en la cara exterior de la estructura y en su cara interior con 10 cm interiores de lana de roca para aislamiento térmico.			

PRESUPUESTOS PARCIALES

Num.	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
2.3.2		REVESTIMIENTO DE CORCHO PROYECTADO	50,200	30,21	1.516,540
REVEST	M2	Revestimiento de corcho de granulometría comprendida entre 0,1 y 0,4 mm, Corcho Natural Proyectado Fino, color blanco, aplicado en dos manos, de 2,3 mm de espesor total, aplicado mecánicamente, previa aplicación de imprimación acrílica, reguladora de la absorción, para uso en interiores o en exteriores, sobre paramento exterior de paneles de madera de OSB. El precio incluye la protección de los elementos del entorno que puedan verse afectados durante los trabajos y la resolución de puntos singulares.			
Total 2.3.- CERRAMIENTO:					6.422,110
2.4.- ARQUITECTURA					
2.4.1		PUERTA ABATIBLE 1 HOJA	1,000	828,24	828,240
EFTL13aolxb	u	Ejecución de apertura en domo para la colocación de una puerta abatible de una hoja con dos paños laterales fijos, realizada con perfiles de aluminio anodizado de 15 micras con sello de calidad, junta de estanqueidad interior, sellante en esquinas del cerco y accesorios que garanticen su correcto funcionamiento, acabada en color teca. Incluyendo la apertura del hueco en la estructura geodésica, incluso replanteo, colocación, aclomado y nivelado, montaje y regulación, sellado perimetral mediante silicona y limpieza, según NTE-FCL, con clasificación a la permeabilidad al aire según UNE-EN 12207, clasificación a la estanqueidad al agua según UNE-EN 12208 y clasificación a la resistencia a la carga del viento según UNE-EN 12210.			
2.4.2		VENTANA TRIANGULAR ABATIBLE CARPINTERÍA DE MADERA	3,000	658,00	1.974,000
VENT-ABT	U	Ventana triangular abatible carpintería de madera			
2.4.3		VENTANA FIJA DE CRISTAL TRIANGULAR	6,000	427,00	2.562,000
VENT-FIJA	U	Ventana fija para cerramiento de cristal			
2.4.4		PAV TARIMA MACIZA TEKA E/22 MM P/EXT	19,000	175,55	3.335,450
ERSM22ceb	m2	Pavimentos para exteriores realizados con tarima maciza de Teka de 22 mm de espesor, dispuesta sobre rastreles apoyados en soportes regulables en altura cada 40 cm, separados una distancia de 40 cm. Elementos de tarima fijados mediante clip atornillado a rastrel			
2.4.5		TABIQUERÍA INTERIOR DE PLADUR	5,000	18,74	93,700
EFPR.1baaba	m2	Suministro y colocación de tabiquería interior de pladur con todos sus accesorios de autoportantes.			
Total 2.4.- ARQUITECTURA:					8.793,390
TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL Nº 2 DOMO 2 - C1/V2/6M:					22.601,250

PRESUPUESTOS PARCIALES

Num.	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
3 DOMO 3 - C2/V2/8M					
3.1.- ESTRUCTURA GEODÉSICA - C2/V2/8M					
3.1.1		FABRICACIÓN ESTRUCTURA - C2/V2/8M	761,600	20,11	15.315,780
D3-01.01	m	Fabricación de domo geodésico, formado por los diferentes tipos de piezas definidos según planos del proyecto. Incluye suministro de madera aserrada de pino (<i>Pinus sylvestris</i>), de 140x70 mm de sección, clase resistente C24 según UNE-EN 338 y UNE-EN 1912, para clase de servicio 2, con protección frente a agentes bióticos, con acabado cepillado; cortado y enumerado en taller. Transporte y acopio en obra.			
3.1.2		MONTAJE ESTRUCTURA - C2/V2/8M	1,000	1.829,83	1.829,830
D3-01.02	ud	Montaje de estructura geodésica, que incluye el ensamblaje de las piezas para montar triángulos y posteriormente el montaje de la estructura con tipo de unión Good Kharma. Incluso elementos de fijación mecánicos definidos en proyecto.			
Total 3.1.- ESTRUCTURA GEODÉSICA - C2/V2/8M:					17.145,610
3.2.- CIMENTACIÓN					
3.2.1		DESPEJE, DESBROCE TERRENO Y EXCAVACIÓN	37,200	1,08	40,180
AMMD.1a	m2	Despeje, desbroce, refino y excavación de terrenos hasta 25cm de profundidad, con vegetación de hasta 2m de altura, incluida la retirada de material sin incluir la carga y transporte.			
3.2.2		SUMINISTRO Y VERTIDO DE HL-150/F/20	5,600	123,35	690,760
ECHH.1cba	m3	Suministro y vertido de hormigón de limpieza de HL-150/F/20, para formación de solera de asiento, con una dosificación mínima de cemento de 150 kg/m3, de consistencia fluida, tamaño máximo de árido 20mm, vertido directamente desde camión, en la base de la cimentación, transportado y puesto en obra, según Código Estructural, DB SE-C del CTE y NTE-CS.			
3.2.3		ENCOFRADO DE VIGA DE CIMENTACIÓN DE HASTA 0,90 M DE ANCHO	21,500	18,81	404,420
EEHF.4a	m	Encofrado de viga de cimentación de hasta 0,90 m de ancho, incluso desencofrado, limpieza y almacenamiento			
3.2.4		ACERO P/HORMIGÓN B500 S	254,000	1,92	487,680
EEHA.1c	kg	Suministro y colocación en obra de acero corrugado B 500 S en jaulas para estructuras de hormigón			
3.2.5		SUMINISTRO Y VERTIDO HA-25/F/20/XC2 P/ELEM HRZ	3,500	153,39	536,870
EEHH.2cbbcc...	m3	Suministro y vertido de hormigón armado de resistencia característica 25 N/mm2, consistencia fluida, tamaño máximo de árido 20mm, clase general de exposición normal con humedad media, vertido mediante cubilote, en elemento viga, elaborado, transportado y puesto en obra según Código Estructural.			
Total 3.2.- CIMENTACIÓN:					2.159,910
3.3.- CERRAMIENTO					
3.3.1		DOBLE CAPA DE TABLERO OSB-3 E15 MM MACHIEMBRADO EN CERRAMIENTO SUMINISTRO E INSTALACIÓN EN EXTERIOR E INTERIOR DE LA ESTRUCTURA, CON 10 CM INTERIORES DE LANA DE ROCA	377,080	48,87	18.427,900
FAB-OSB01	m2	Doble capa de tablero de virutas orientadas (OSB) clase 3 de uso estructural en ambiente húmedo de 2500x1250 mm y espesor 15 mm con bordes machihembrados, clasificación E1 (bajo contenido en formaldehído) y Euroclase D-s2, d0 de reacción al fuego según EN 13501, cortado en triángulos a medida, atornillado a estructura para formación de cerramiento y con cintas de sellado de estanqueidad entre tableros, incluidos lámina hidrófuga transpirable, anclajes y uniones de montaje en la cara exterior de la estructura y en su cara interior con 10 cm interiores de lana de roca para aislamiento térmico.			

PRESUPUESTOS PARCIALES

Num.	Ud	Descripción	Medición	Precio	Importe
3.3.2		REVESTIMIENTO DE CORCHO PROYECTADO	188,540	30,21	5.695,790
REVEST	M2	Revestimiento de corcho de granulometría comprendida entre 0,1 y 0,4 mm, Corcho Natural Proyectado Fino, color blanco, aplicado en dos manos, de 2,3 mm de espesor total, aplicado mecánicamente, previa aplicación de imprimación acrílica, reguladora de la absorción, para uso en interiores o en exteriores, sobre paramento exterior de paneles de madera de OSB. El precio incluye la protección de los elementos del entorno que puedan verse afectados durante los trabajos y la resolución de puntos singulares.			
Total 3.3.- CERRAMIENTO:					24.123,690
3.4.- ARQUITECTURA					
3.4.1		PUERTA ABATIBLE 1 HOJA	1,000	828,24	828,240
EFTL13aolxb	u	Ejecución de apertura en domo para la colocación de una puerta abatible de una hoja con dos paños laterales fijos, realizada con perfiles de aluminio anodizado de 15 micras con sello de calidad, junta de estanqueidad interior, sellante en esquinas del cerco y accesorios que garanticen su correcto funcionamiento, acabada en color teca. Incluyendo la apertura del hueco en la estructura geodésica, incluso replanteo, colocación, aclomado y nivelado, montaje y regulación, sellado perimetral mediante silicona y limpieza, según NTE-FCL, con clasificación a la permeabilidad al aire según UNE-EN 12207, clasificación a la estanqueidad al agua según UNE-EN 12208 y clasificación a la resistencia a la carga del viento según UNE-EN 12210.			
3.4.2		VENTANA TRIANGULAR ABATIBLE CARPINTERÍA DE MADERA	4,000	658,00	2.632,000
VENT-ABT	U	Ventana triangular abatible carpintería de madera			
3.4.3		VENTANA FIJA DE CRISTAL TRIANGULAR	12,000	427,00	5.124,000
VENT-FIJA	U	Ventana fija para cerramiento de cristal			
3.4.4		PAV TARIMA MACIZA TEKA E/22 MM P/EXT	29,000	175,55	5.090,950
ERSM22ceb	m2	Pavimentos para exteriores realizados con tarima maciza de Teka de 22 mm de espesor, dispuesta sobre rastreles apoyados en soportes regulables en altura cada 40 cm, separados una distancia de 40 cm. Elementos de tarima fijados mediante clip atornillado a rastrel			
3.4.5		TABIQUERÍA INTERIOR DE PLADUR	7,000	18,74	131,180
EFPR.1baaba	m2	Suministro y colocación de tabiquería interior de pladur con todos sus accesorios de autoportantes.			
Total 3.4.- ARQUITECTURA:					13.806,370
TOTAL PRESUPUESTO PARCIAL Nº 3 DOMO 3 - C2/V2/8M:					57.235,580

RESUMEN DEL PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL DESGLOSADO

1 DOMO 1 - C1/V4/10M	63.191,45
1.1.- ESTRUCTURA GEODÉSICA - C1/V4/10M	10.274,08
1.2.- CIMENTACIÓN	4.547,75
1.3.- CERRAMIENTO	19.795,73
1.4.- ARQUITECTURA	28.573,89
2 DOMO 2 - C1/V2/6M	22.601,25
2.1.- ESTRUCTURA GEODÉSICA - C1/V2/6M	5.328,05
2.2.- CIMENTACIÓN	2.057,70
2.3.- CERRAMIENTO	6.422,11
2.4.- ARQUITECTURA	8.793,39
3 DOMO 3 - C2/V2/8M	57.235,58
3.1.- ESTRUCTURA GEODÉSICA - C2/V2/8M	17.145,61
3.2.- CIMENTACIÓN	2.159,91
3.3.- CERRAMIENTO	24.123,69
3.4.- ARQUITECTURA	13.806,37
Total	143.028,28

Asciende el Presupuesto de Ejecución Material a la expresada cantidad de CIENTO CUARENTA Y TRES MIL VEINTIOCHO EUROS CON VEINTIOCHO CÉNTIMOS.

PRESUPUESTO GENERAL

PRESUPUESTO BASE DE LICITACION

Presupuesto de Ejecución Material	143.028,28
13% de Gastos Generales	18.593,68
6% de Beneficio Industrial	8.581,70
Valor Estimado del Contrato	170.203,66
21% de I.V.A.	35.742,77
Presupuesto Base de Licitación	205.946,43 €

Asciende el presente Presupuesto Base de Licitación a la expresada cantidad de DOSCIENTOS CINCO MIL NOVECIENTOS CUARENTA Y SEIS EUROS CON CUARENTA Y TRES CÉNTIMOS.

PRESUPUESTO GENERAL