

Treball final de grau

Estudi: Grau en Arquitectura Tècnica

Títol:

**ESTUDI PARAMÈTRIC DE CÚPULES CONSTRUÏDES AMB
ESTRUCTURA DE FUSTA**

Document: MEMÒRIA I ANNEXOS

Alumne: Marc Subirós Viñolas

Tutor: Miquel Llorens Sulivera

Departament: Enginyeria Mecànica i De la Construcció Industrial

Àrea: Mecànica de Medis Continus i Teoria de Les Estructures

Convocatòria (mes/any): Juny del 2016

ÍNDIX

1. ANTECEDENTS	4
2. INTRODUCCÓ.....	5
3. OBJECTIUS.....	6
4. ESTAT DE L'ART SOBRE LES CÚPULES GEODÈSIQUES.....	7
4.1. CONCEPTE	7
4.2. HISTÒRIA	8
4.3. DESCRIPCIÓ GEOMÈTRICA	11
4.3.1. Principis	11
4.3.2. La freqüència de la cúpula geodèsica	11
4.4. ESTABILITAT ESTRUCTURAL.....	14
4.5. GEOMETRIA SAGRADA.....	17
5. ANÀLISI I PARAMETRITZACIÓ DE LES ACCIONS.....	18
5.1 ANÀLISI	18
5.2 DEFINICIÓ DE LA CÚPULA.....	24
5.3. DISSENY	25
5.4. DESENVOLUPAMENT DEL MODEL	26
5.5. DESCRIPCIÓ DE BARRES.....	29
5.6. UNIONS I FIXACIONS	31
5.6.1. Unió entre Radis	32
5.6.3. Unió entre figures.....	35
6. CÀLCUL.....	36
6.1. GENERALITATS	36
6.2. PROCEDIMENT I PARÀMETRES DE CÀLCUL.....	37
6.3. ACCIONS.....	39
6.3.1. Classificació d'accions	39
6.3.2. Accions gravitatòries als nusos	39
6.3.3. Accions a les barres.....	40
6.4. JUSTIFICACIÓ DE NORMATIVA	42
6.5. PARAMETRITZACIÓ D'ACCIONS	45
6.6. INTRODUCCIÓ DE CÀRREGUES AL MODEL	54
7. ANÀLISI DE RESULTATS	56
7.1. RESULTATS	56

ESTUDI PARAMÈTRIC DE CÚPULES CONSTRUÏDES AMB ESTRUCTURA DE FUSTA

7.1.1. Anàlisi de resultats teòrics.....	56
7.1.2. Anàlisi resultat cas fictici	57
7.1.3. Anàlisi de resultats cas real.....	59
7.2. REPRODUCCIONS VISUALS.....	66
8. CONCLUSIONS FINALS I PROPOSTA DE FUTURS DESENVOLUPAMENTS.....	68
8.1. CONCLUSIONS FINALS.....	68
8.2. PROPOSTES DE FUTURS DESNVOLUPAMENTS	69
9. REFERÈNCIES DE RECERCA	70
ANNEXOS	71
Annex 1 Càlcul de forces parametritzades per quadrants.....	72
Annex 2 Comprovació de càlcul	73

1. ANTECEDENTS

Aquest treball sorgí de la voluntat d'aprofundir sobre la tècnica estructural de la cúpula geodèsica i evolucionar-la per agilitzar processos de construcció i muntatge de les mateixes.

Es vol tirar endavant el desig de dos amics, un el propi autor del projecte, de potenciar i professionalitzar el disseny integral, la construcció i el muntatge de cúpules sorgides de la geometria geodèsica.

Els dos, emprengueren un camí professional la primavera del 2015 al encomanar-los-hi la construcció de tres estructures d'aquest tipus per substituir carpes de PVC i acer galvanitzat. L'èxit d'aquest projecte i les bones crítiques de professionalitat de construcció, plantejaren a Raül i Marc, divulgar la pròpia estructura i, alhora, treure profit empresarial.

Així naixé "Esfèric", nom comercial d'una empresa que vol entrar al mercat amb l'ambició de potenciar la cúpula geodèsica com a estructura principal. Actualment, la dedicació és plenament al lloguer de les pròpies en esdeveniments de curta durada. Amb les ganances dels dos joves emprenedors, es vol desenvolupar la tècnica i evolució de diferents components, sistemes constructius i de muntatge, sempre preservant el material principal al qual es basen: la fusta per a donar secció a les barres.

El projecte doncs, vol ser una eina més de desenvolupament sobre el qual l'empresa pugui basar-se per prendre decisions tècniques en els propers models a dissenyar. Alhora, per a l'autor d'aquest, permetre endinsar-se fins a la filosofia i recorregut d'aquesta tipologia d'estructura i al seu càlcul estructural. Adquirir també, un coneixement tècnic que li permeti estudiar en profunditat tots els elements, les problemàtiques que puguin sorgir i ser capaç de resoldre-les.



Foto: Pròpia (www.esferic.cat)

2. INTRODUCCÓ

La utilització de geometries no convencionals aplicades a la construcció, ha estat objecte de recerca al llarg del temps. Una de les solucions més atractives tant per la forma com per les possibilitats estructurals, ha estat la cúpula geodèsica.

Aquesta estructura respon a patrons concrets, que permeten un cert escalat – canvi de dimensió de l'objecte sense modificar el patró geomètric – la qual cosa permet sistematitzar el càlcul.

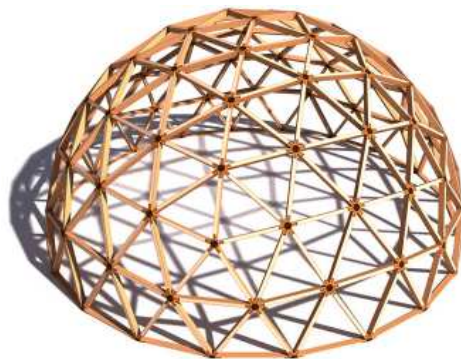
El sistema constructiu també ajuda a tenir característiques simples, ja que la coberta i façana són indivisibles i no es diferencia on comença una i l'altra. Aquest fet comporta l'estalvi de resoldre molts detalls constructius, en comparació en altres construccions, i no disposar de la divisió d'elements coberta/façanes, sinó que tots formen part d'un tot. L'inconvenient rau en què els seus elements treballen sempre en tres dimensions i la tècnica en poder treballar sobre els tres eixos alhora, és el que fa aparentment més difícil la seva lectura.

El sistema constructiu permet crear també, un espai interior agradable, sense elements estructurals intermitjos. Una vegada creats els càlculs estructurals i geomètrics, la construcció i muntatge són ràpids i relativament senzills.

La polivalència de l'estructura és infinita. Trobem exemples de cobertes senceres de pavellons a Rússia i Anglaterra o petits iglus refugis a l'Antàrtida, passant per carpes de mercat o casetes de gossos. Una estructura curiosa, és una cúpula invertida en forma de gota d'aigua, dissenyat per penjar-se des de forts arbres, des de Lituània.

La idea inicial sorgeix de la necessitat de realització d'un càlcul eficient i ràpid per a la producció de cúpules geodèsiques de fusta amb una finalitat final de certificació de solidesa.

L'estudi de l'estat de l'art sobre les cúpules geodèsiques pot proporcionar obtenir una visió global de les mateixes i aproximar les possibilitats constructives d'aquesta tècnica constructiva en futurs dissenys.



Font: <http://control-zeta.org>

3. OBJECTIUS

El projecte té com a finalitat, el càlcul de cúpules geodèsiques de fusta.

Donada la complexitat de la forma i aprofitant l'escalabilitat i la simetria de l'estructura, es proposa parametritzar l'obtenció de les accions a aplicar (càrregues permanents, neu, vent, etc), a fi de simplificar-ne el càlcul.

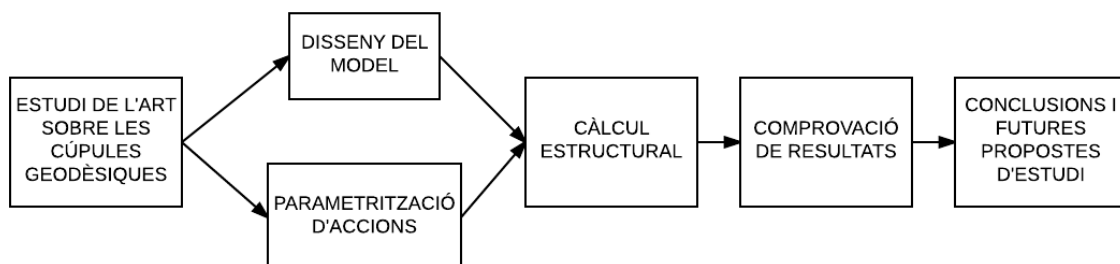
Es prestarà especial atenció a les unions entre barres, punt on recau el punt més dèbil de l'estructura.

A partir de la definició d'un cos, una geometria coneguda, s'estudiaran i analitzaran les accions que afecten una construcció d'aquestes característiques segons els efectes climatològics que la poden afectar. S'intentarà parametritzar les accions teòriques que li seran sotmeses per poder fer amb senzillesa i rapidesa els mateixos càlculs amb geometries més grans i més petites, i respondre en breuetat el càlcul estructural que li serà requerit.

Es materialitzarà el càlcul amb els paràmetres definits anteriorment. S'estudiarà a partir de softwares actuals, agilitzant el procés de càlcul, fent-lo més precís i encertat.

A partir del càlcul estructural s'analitzarà i comprovarà seccions de barres per poder definir geometries reals i ser construïdes.

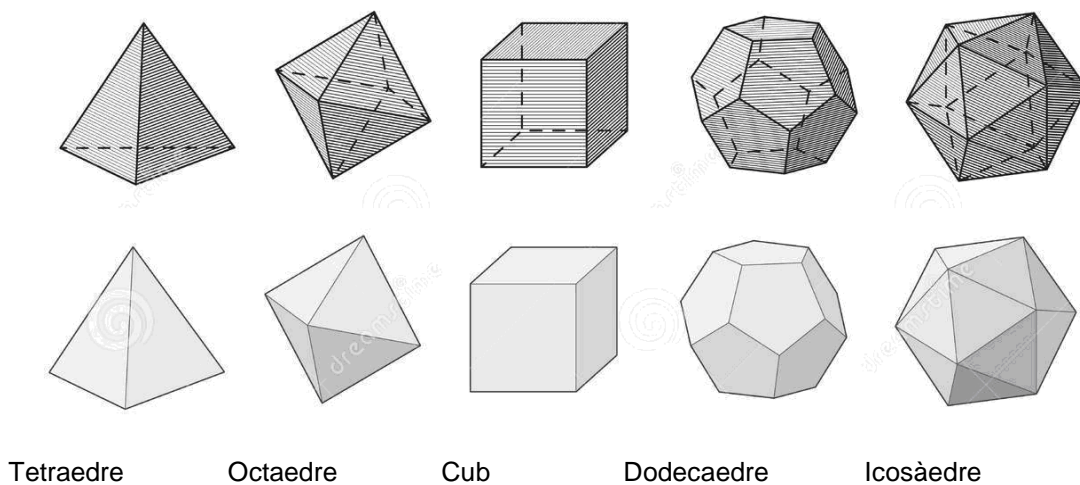
És de vital importància la realització d'unes conclusions finals que pugui sintetitzar l'estudi realitzat, posant èmfasi en els punts més importants que s'han anat descobrint a mesura que s'ha anat realitzant el projecte, tant els punts més destacables positivament a la potenciació d'aquestes construccions, com en detriment. Aquestes ens proporcionaran trobar fugues d'estudi per a projectes i investigacions que es podrien desenvolupar en un futur, creant un llistat de propostes per aquests.



4. ESTAT DE L'ART SOBRE LES CÚPULES GEODÈSIQUES

4.1. CONCEPTE

Una cúpula geodèsica és part d'una esfera, un poliedre generat a partir d'un icosaèdre (poliedre de 20 cares, iguals entre sí a partir de triangles equilàters) o d'un dodecaedre (poliedre de dotze cares), encara que pot ser generat per qualsevol sòlid platònic (poliedres convexos amb les cares regulars iguals entre sí). Els sòlids platònics són formes completament simètriques que tenen tots els costats iguals, tots els angles iguals, de les mateixes mides i que els 5 entren dins d'una mateixa matriu com és l'esfera.



Gràfic: <http://es.dreamstime.com/>

El terme geodèsia (del Grec terra i dividir) va ser utilitzat inicialment per Aristòtil (384-322 aC.) i pot significar, tant "divisions geogràfiques de la terra", com també el fet de "dividir la terra". En aquest cas, la geodèsia refereix el concepte de dividir cares de figures conegudes.

Una cúpula geodèsica és una estructura formada per triangles que componen una superfície inscrita en una semiesfera.

Aquestes estructures o cúpules recobreixen també, formes geomètriques com l'el·lipse. Es caracteritzen per la seva eficiència i facilitat d'adaptació a múltiples usos (casa, refugi, magatzem, hivernacles, assecador,.....).

De fet, aquest tipus de tecnologies, gràcies a la seva versatilitat, han estat per molts anys el referent de l'arquitectura alternativa i el símbol de la llibertat de l'autoconstruir-se cadascú la seva pròpia caseta. Petits nuclis van ser construïts amb aquest sistema durant els '60 i '70.

4.2. HISTÒRIA

“Al nostre planeta, La Nau Especial Terra, no tenim una provisió inesgotable de petroli, fusta, aigua, aire net i altres recursos naturals.”

“A mesura que la Nau Especial Terra es va poblant més i més, és molt important pensar de manera que la gent pugui viure millor amb els mateixos recursos.”

“Una manera és reduir la quantitat de materials que no aprofitem. Es pot també millorar la qualitat dels materials i trobar noves formes de fer servir cada gram de material, unitat d'energia i minut de temps.”

Aquestes son les bases de la filosofia de “Bucky” Fuller de “fer més amb menys”. La idea va inspirar a Fuller a inventar la cúpula geodèsica per a utilitzar-la com habitatge, en els anys '50. Des de la concepció de la cúpula geodèsica, per R.Buckminster Fuller, combinant dos estructures bàsiques: l'esfera, per la seva eficiència, i el tetraedre, per la seva força.

Primera Cúpula Geodèsica:

La primera cúpula geodèsica datada, es va construir l'any 1922 al Terrat dels tallers de Carl Zeiss (fabricant d'instruments òptics) a Jena, Alemanya. Walther Bauersfeld (23 Gener 1879 – 28 Octubre 1959), es va basar en l'icosaèdre per subdividir-lo amb una freqüència 16. L'estructura constava de 3.480 barres i es cobria amb ferro ciment. En el seu interior es desenvolupava un planetari (lloc dedicat a la presentació d'espectacles astronòmics i en el qual és possible observar recreacions del cel nocturn des de diversos llocs de la Terra i en diferents moments de l'any) conegut com “la meravella de Jena”. Ràpidament es van anar construint més planetaris, inaugurat al 1930 el primer d'ells en EEUU, a Chicago. A partir d'aquest moment l'evolució de les cúpules geodèsiques està molt relacionada al nord-americà R. Buckminster Fuller.

La primera realització industrial a gran escala va ser al 1953 quant la Ford Motor Co. va coronar el seu edifici Rotonda amb una geodèsica de 28,3 metres de diàmetre, feta d'alumini i coberta de plàstic, amb 8,5 Tones de pes, en contra de les 160 Tones que hagués pesat amb una cúpula convencional d'acer, com la que pronosticaven els propis enginyers de Ford.

Richard Buckminster Fuller (12 de juliol de 1895 - 1 de juliol de 1983).

Buckminster Fuller va dissenyar cúpules per EEUU per el govern, ja que les carpes convencionals eren lentes de muntar i no satisfien les necessitats de la l'exèrcit de la Marina Nord-americana. Van ser 47 tipus de refugis que anaven des d'una cúpula de 110 metres de diàmetre per avions, fins a un refugi de cartró de 4,26 metres de diàmetre, destruïble anomenat “kleenex”.

ESTUDI PARAMÈTRIC DE CÚPULES CONSTRUÏDES AMB ESTRUCTURA DE FUSTA

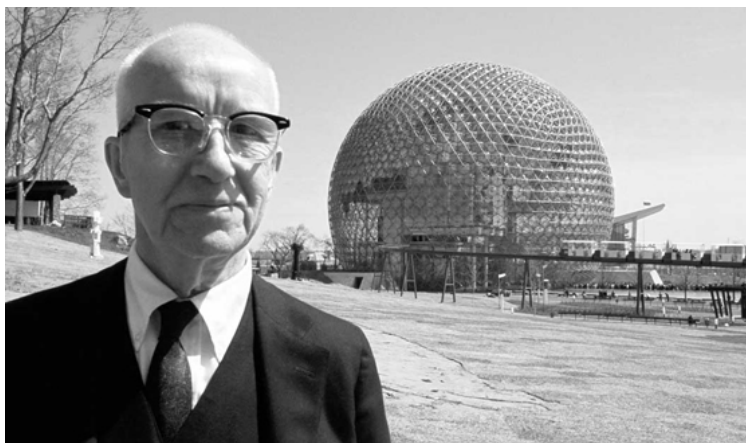
La cúpula geodèsica de 76 metres de diàmetre i 61 metres d'alçada per a la Exposició Universal de Montreal (1967), dissenyat per B.Fuller i S. Sadao, és una malla geodèsica de dos capes. Els nusos de les dues malles estan interconnectats per assegurar el funcionament del conjunt.

Examinant la construcció tradicional, havia descobert que la majoria de les construccions s'enfocaven en angles rectes i configuracions quadrades, fet que li va fer reflexionar i entendre que els primers humans desenvoluparen aquest model de construcció sense ciència, simplement apilant pedra sobre pedra. Tal sistema tan simple era acceptat només per a estructures petites.

Fuller va trobar que la força de compressió que causava la caiguda de parets pesades sempre estava relacionat per una proporcionalitat de quantitat igual a força de tensió de l'estructura. De fet, va descobrir que si la tensió i la compressió no estan perfectament igualades en una estructura, aquesta col·lapsarà. Sempre buscant el màxim eficiència, Fuller va tractar de fer servir les forces de tensió a la seva nova idea de construcció. El resultat va ser les estructures geodèsiques.

La *Building Construction, U.S. Patent 2,682,235 A*, concedida del 29 de juny de 1954:

Els primers models geodèsics realitzats per Fuller daten dels estius de 1948 i 1949 quan va ser professor convidat en el "Black Mountain College", una escola de Disseny i Arts Visuals. Fuller mai va fer menció en els seus escrits del treball anterior de Walther Bauersfeld. La patent sobre aquest tipus de construcció, que Fuller va denominar "Cúpula Geodèsica", va ser sol·licitada a finals de 1951 i concedida finalment a mitjans de 1954. L'objecte de la patent és descriure com " a *Framework for enclosing space*". El seu propòsit declarat és el de *cobrir la major quantitat de superfície de terreny en el menor pes*. Fuller afirmava haver-ho aconseguit amb menys de 4 kg/m² mitjançant estructures principals que interconnectaven amb un disseny geodèsic d'arcs de cercles màxims formant una retícula triangular i cobrint-la amb una làmina de plàstic.



Buckminster Fuller i la cúpula de la Exposició Universal (Montreal)

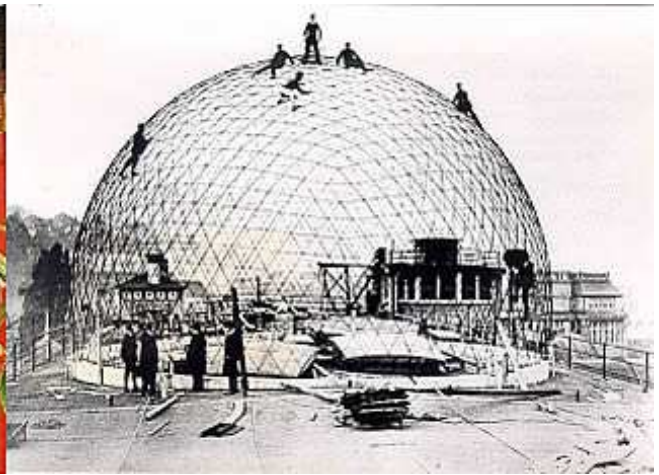
Foto: <http://www.magufos.com/2015/08/html>

Altres geodèsiques a l'antiguitat:

S'han citat en diferents documents, altres cúpules geodèsiques o símils com per exemple al Palau Imperial de Xina (Ciutat Prohibida, Pekín), del regnat de Ming i Qing on es pot observar una esfera amb una subdivisió geodèsica d'un icosaèdre. Es tracte d'una esfera sota les urpes d'un lleó guardià a la Nurturing Heart Gate, similar a un altre, de freqüència 5, al Palau d'Estiu de Xina (proper a Pekín), que data aproximadament de 1885.



Ciutat Prohibida (Pekín)



Cúpula de Walther Bauersfeld (Jena)

Fotos: <http://www.magufos.com/2015/08/html>

4.3. DESCRIPCIÓ GEOMÈTRICA

4.3.1. Principis

Les cares d'una cúpula geodèsica poden ser triangles, hexàgons o qualsevol polígon. Els vèrtex han de coincidir tots amb la superfície d'una esfera o un el·lipsoide (si els vèrtex no queden tangents a la superfície de la esfera projectada, la cúpula ja no és geodèsica).

Euler:

Les cúpules geodèsiques compleixen el teorema de poliedres de Euler, que indica que:

$$C+V-A = 2$$

C= número de cares (o número de triangles)

V= número de vèrtexs (o unions múltiples)

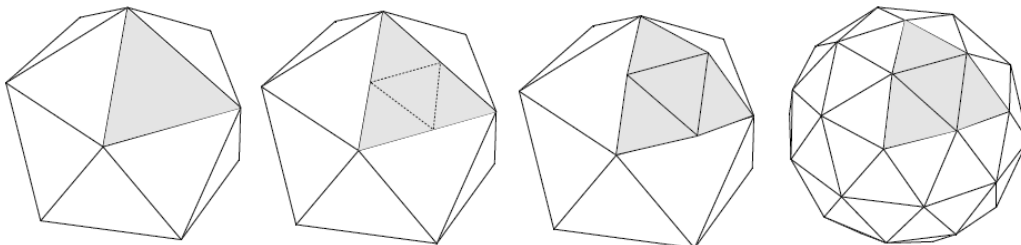
A= número d'arestes (o barres usades).

Per una cúpula que no sigui una esfera completa es compleix: $C+V-A = 1$

4.3.2. La freqüència de la cúpula geodèsica

És el número de vegades que les arestes de l'icosàedre o dodecaedre són subdividibles donant lloc a triangles més petits. A una freqüència major, major serà el número de barres amb llargades diferents i per tant, més complex el càlcul, disseny i desenvolupament. Per altre banda, aquestes barres seran de longitud més curtes que en una freqüència menor i per tant es desenvoluparà un cos més sòlid amb més punts de descarrega de forces i de visibilitat més esfèrica.

Per generar una cúpula geodèsica d'ordre o freqüència n és necessari dividir les arestes de cada cara en n parts iguals. En el següent gràfic $n=2$.



Icosàedre

Icosàedre freqüència 2

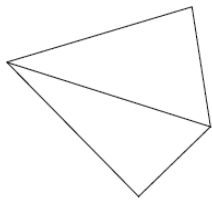
Es projecta $n-1$ punts, obtinguts en cada aresta dividida de la cara, a l'esfera. Aquest punt es projectarà com a nou vèrtex dirigit per l'eix generat a partir del punt esmentat i el centre de

gravetat origen de l'esfera. L'esfera, estarà prèviament definida ja que coincidirà tangencialment amb els vèrtex del poliedre regular inicial que s'ha agafat com cos arrel.

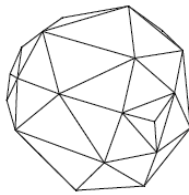
Aquest projecte, basa la seva freqüència sobre el poliedre icosaèdre. S'ha escollit aquest per la seva fàcil subdivisió d'elements i en conseqüència de figures i triangles.

L'icosaèdre és un políedre regular convex, format per 20 cares triangulars, que es troben en grups de cinc en cadascun dels dotze vèrtexs. Té 30 arestes i el seu políedre dual és el dodecaèdre.

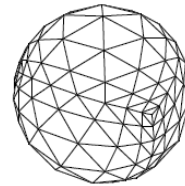
Altres exemples:



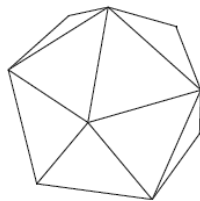
Tetraedre



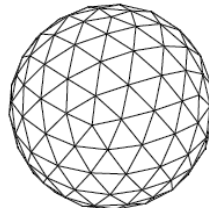
Tetraedre de freqüència 4



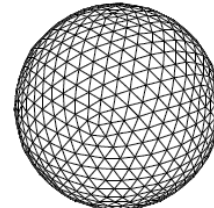
Tetraedre de freqüència 9



Icosaèdre



Icosaèdre freqüència 4

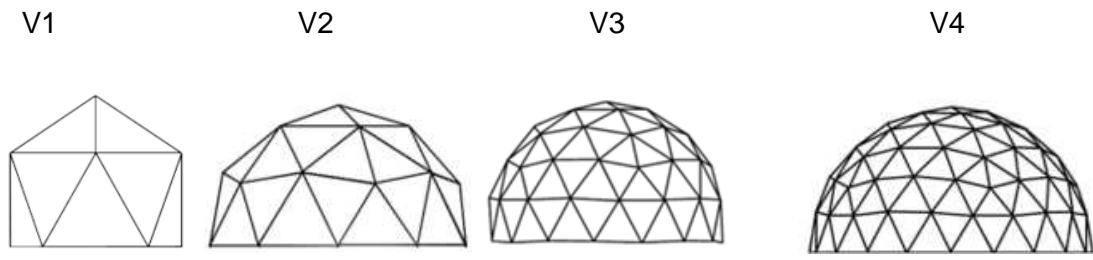


Icosaèdre freqüència 9

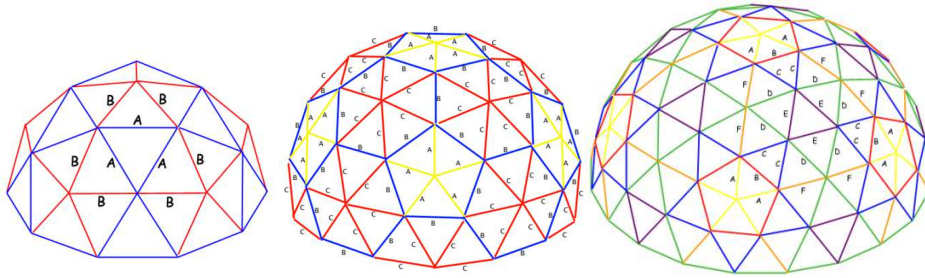
A partir dels 5 poliedres citats al punt 4.1, es pot generar una cúpula geodèsica de freqüència "n" al dividir cada cara en "n" parts iguals, unint els n-1 punts obtinguts de cada aresta en subdividir la cara en varies cares de menor superfície, projectant els vèrtexs resultants cap a l'esfera i amb la direcció del vector: centre esfera (origen) amb vèrtex.

ESTUDI PARAMÈTRIC DE CÚPULES CONSTRUÏDES AMB ESTRUCTURA DE FUSTA

Relació de freqüències:



Gràfics: www.domosgeodesicos.es



Gràfics: www.desertdomes.com

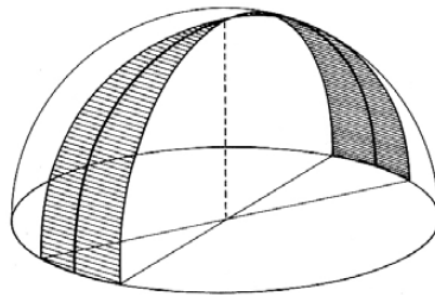
4.4. ESTABILITAT ESTRUCTURAL

La capacitat i estabilitat estructural d'una cúpula geodèsica tancada es basa en els mateixos principis que qualsevol altre tipus de cúpula.

El mecanisme resistent de les cúpules tenen una particularitat que fa superar àmpliament la capacitat estructural d'altres estructures com arcs i bovades per exemple.

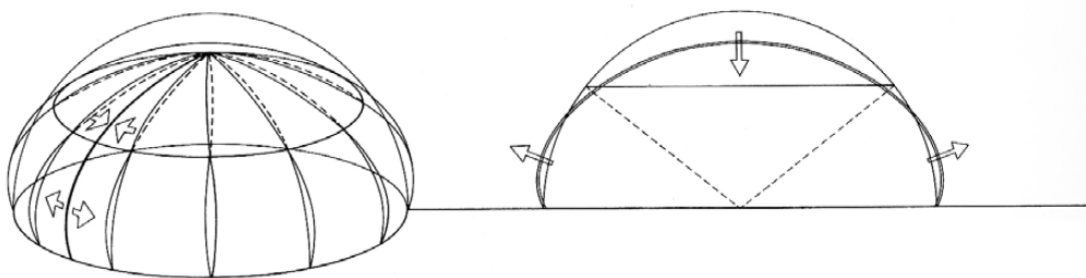
La cúpula es pot dividir a nivell teòric per meridians i paral·lels. Cada meridià es comporta com si fos un arc funicular de les càrregues aplicades (una via de descàrrega). Aquesta resisteix les càrregues sense desenvolupar tensions de flexió per qualsevol sistema de càrregues.

Aquests meridians parteixen de la base de línies iso estàtiques al ser totes d'iguals característiques amb deformacions iguals.



Divisió en segments a partir de línies iso estàtiques.

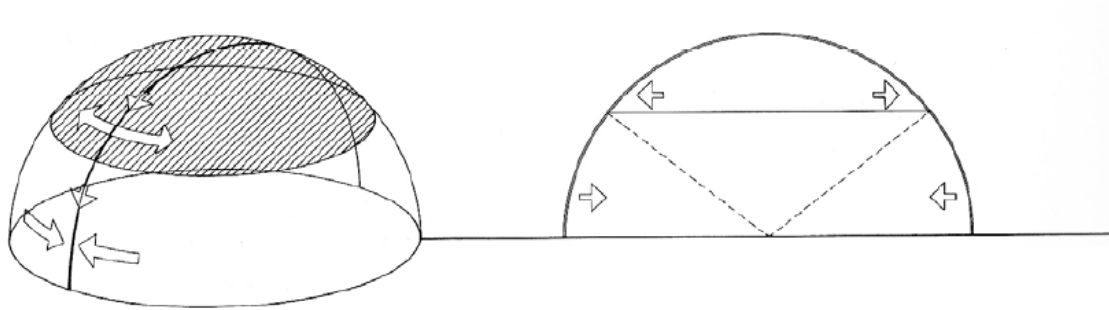
Les parts superiors dels segments descendeixen i es solapen en els seus costats al disminuir la curvatura. Les parts inferiors es deformen cap a l'exterior i s'expandeixen com major sigui la curvatura.



Deformació dels segments:

La capacitat de la membrana (malla) de la cúpula per generar esforços anulars evita que es deformi cap a l'interior o l'exterior a causa de la desviació de la catenària meridional.

La continuïtat horitzontal (anulació de forces) s'oposa a la deformació; per tant, la part superior, arriba un punt en què es comporta com una seqüència d'anells comprimits i la part inferior com una seqüència d'anells traccionats.

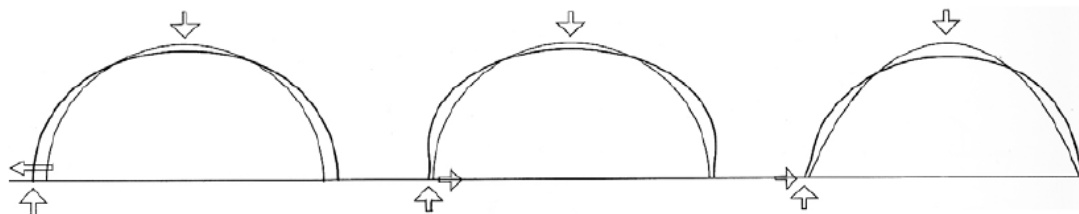


Efecte d'anulació de forces

La cúpula posseeix uns paral·lels que restringeixen el seu desplaçament lateral desenvolupant tensions en anell i fent possible el comportament de la membrana, o envoltant exterior.

Sota l'acció de les càrregues als punts més alts, aquestes tenen tendència a moure la membrana cap a dins, mentre que els més baixos ho fan cap a fora, és a dir, allunyant-se de l'eix central.

Per què aquestes accions tinguin lloc i la cúpula només tingui esforços propis de membrana, els costats han de poder experimentar un lliure moviment. Quan, aquest moviment és frenat fixant la base, es presentaran petites flexions a l'arrencada que la pròpia cúpula ha d'esmorteir.



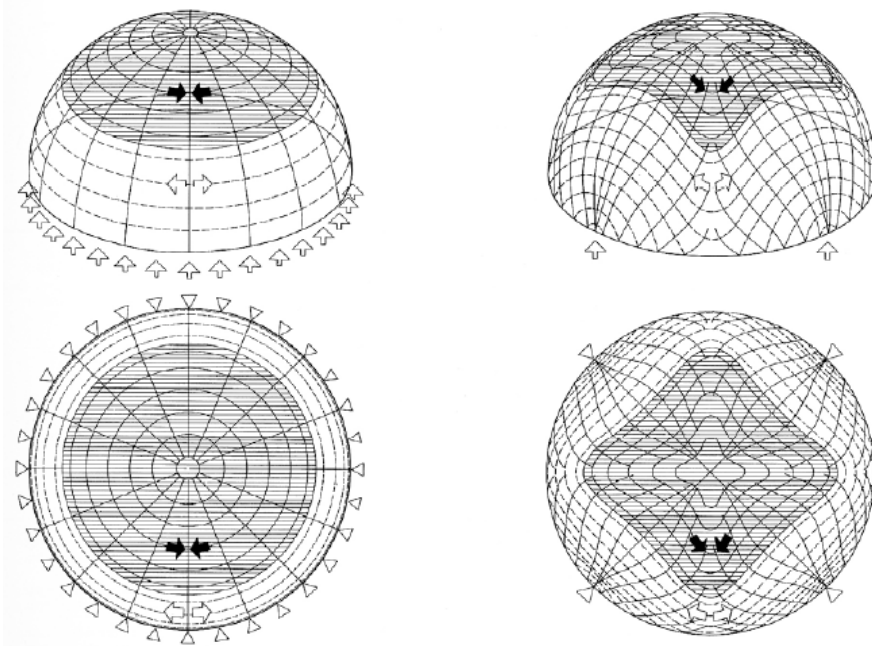
Mobilitat a la base

Resistència per fregament

Reacció horitzontal

Es pot imaginar la cúpula com uns arcs meridians, la flexió de la qual està limitada pels anells o paral·lels horitzontals. En les zones en les que els arcs meridians vulguin enfonsar-se cap a dins, els paral·lels li impedeixen treballant en compressió, i on els meridians vulguin obrir-se, el paral·lel ha d'evitar-ho resistint en tracció.

Transmissió de càrregues sota una càrrega simètrica:



Model A

Model B

En el cas del model A dels gràfics anteriors, s'observa com els esforços es transmeten segons la direcció dels meridians i els paral·lels. En aquest cas, la cúpula descansa sobre una base plana.

En el cas del model B, la direcció dels esforços meridionals i anulars es modifiquen ja que els punts de recolzament son només quatre individuals. Aquest fet provoca la descàrrega de forces igual que si estiguessin sotmeses a un camp magnètic central.

Les deformacions de la làmina ja no són suficientment petites per poder prescindir d'elles, ja que la obligada continuïtat entre la seva superfície i l'anell exterior, provoca una flexió dels meridians.

Tots els gràfics d'aquest apartat: *Anàlisis de tipologies estructurales bóveda, làmina, cúpula i paraboloides*

4.5. GEOMETRIA SAGRADA

Les cúpules geodèsiques estan íntimament relacionades amb la geometria sagrada al basar-se en sòlids platònics. En la seva constitució es troben pentàgons (associats al Pentàculo) i hexàgons (associats a l'Estrella de David, unió entre el cel i la terra). L'esfera confinada a la cúpula geodèsica representa el ventre matern, la matriu, concepte similar al que es veu en altres construccions com tipis i yurtes entre d'altres.

Existeix la teoria doncs, que tot l'univers prové de la mateixa font o intel·ligència universal, que alguns denominen Deu, o Mare Naturalesa, o Gran Esperit, i la Geometria Sagrada ens demostra, amb conceptes que poden captar la nostre ment racional, com tot el que existeix va ser creat per mitjà d'una immensa galàxia que segueix un mateix patró geomètric idèntic.

5. ANÀLISI I PARAMETRITZACIÓ DE LES ACCIONS

5.1 ANÀLISI

Per poder parametritzar les accions i posteriorment desenvolupar el càlcul de càrregues de l'estructura geodèsica, cal tenir clara la geometria volumètrica que donarà lloc a la descàrrega de forces de la pròpia estructura.

Per focalitzar aquesta, s'han pres diferents visions conceptuals basades en la freqüència de la pròpia cúpula. Aquestes visions conceptuals venen marcades segons el que es creu que és més estètic visualment, una forma o una altra. També recau en la minoració del número de barres i així disminuir la complexitat de disseny. A menor número de barres de diferents mesures major facilitat de construcció

Per aconseguir acostar aquesta visió, s'ha recercat programes gràfics de cúpules geodèsiques, i s'han comparat diferents projectes, sempre pensant en la facilitat de construcció real, sense complexitat d'elements i amb clara tendència a la utilització de la fusta com a element de construcció de les barres.

Aquí es presenten dos dels programes útils per a la recerca d'un dimensionament i visualització de la cúpula geodèsica:

a) www.desertdomes.com (lliure accés sense necessitat de descàrrega)

Programa d'origen americà amb una informació molt interessant i resumida de com calcular les barres d'una cúpula geodèsica.

S'hi pot localitzar una petita "calculadora". Escollint la freqüència de cúpula que vols projectar (V2, V3, V4, etc.), i introduint el radi (metres), et calcula la llargària de la barra entre nus i nus (unió-unió). Per tant, aquest programa pot aportar dos paràmetres a modificar: freqüència i radi de la esfera. El resultat és la llargada de la barra de cada figura entre unions.

Aquest programa, deixa per a l'usuari la recerca de la resta de informació: angles entre barres i en vers l'esfera, introducció de nusos, etc.. i també, el dibuix geomètric.

Val a dir que aquesta web, automatitza els càlculs de les barres a partir de la informació extreta del llibre "Dome Book 2". Aquest llibre, cedeix la informació d'uns coeficients per a ser multiplicats per el radi de la cúpula a projectar, i així donar com a resultat la llargada de les barres.

Aquesta web et mostra, això sí, els diferents diagrames de barres per a cada freqüència.

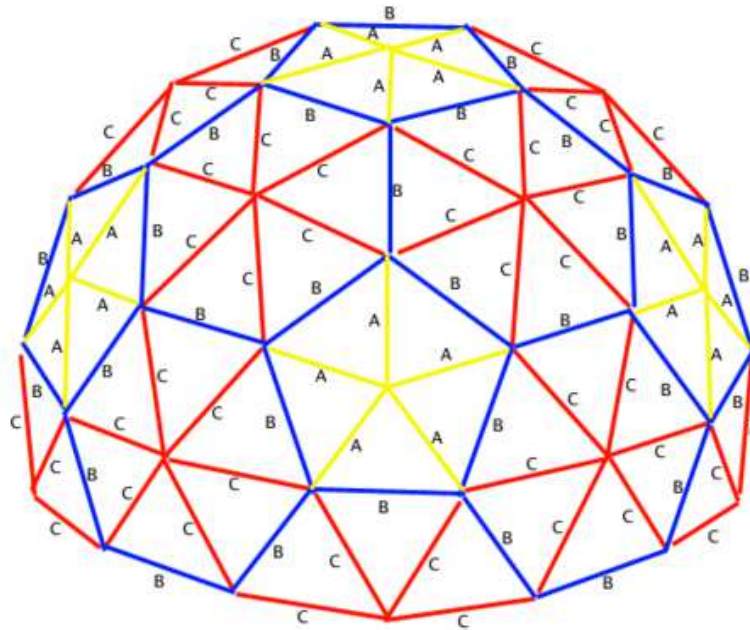


Diagrama Freqüència V3

b) www.acidome.ru (lliure accés sense necessitat de descàrrega)

Programa Rus de dimensionat d'estructures geodèsiques a partir del cos icosaèdre amb barres en forma de prismes rectangulars.

Té la peculiaritat de poder introduir i modificar molts factors (fins a 11) per poder modelar "el teu domo (cúpula geodèsica)" a mida, i fer la visualització en directe a mesura que modifiques cadascun dels factors:

Acidome **Geodesic dome calculator** Español

Opciones de geometría

Frecuencia, V

Tipo de subdivisión

Método de subdivisión

Simetría rotacional

Circunscripción

Porción de la esfera

Alinear la base

Opciones de Proyecto

Radio de la esfera, m

Tipo de conexión

Diámetro del tubo, mm

Tamaño de las piezas

Anchura, mm

Grosor, mm

Resultados

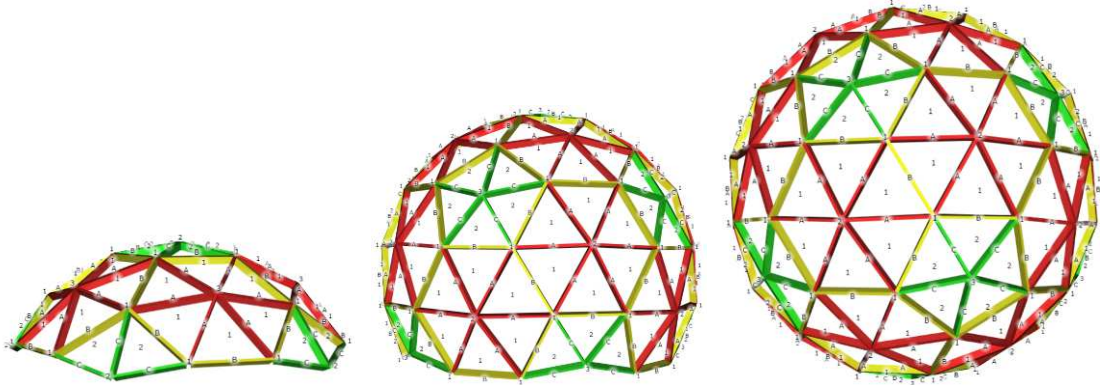
Carcasa Esquema Cubierta Base

Pantalla principal

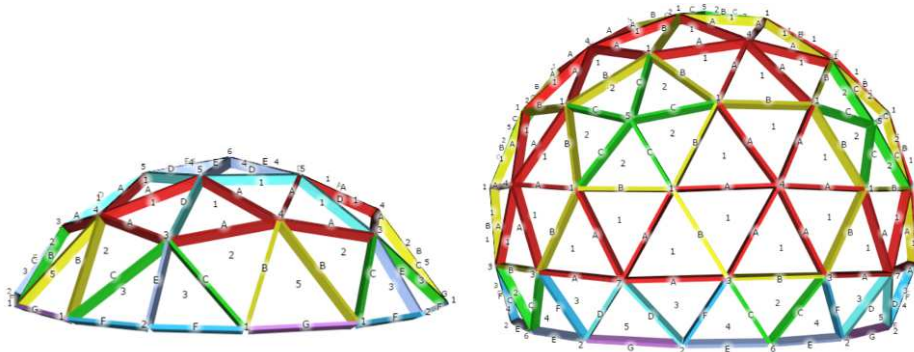
Factors de geometria destacats:

-Freqüència: Pots escollir fins a 10 freqüències diferents.

-Porció d'esfera: Permet escollir la porció (segons la freqüència) de l'esfera entra unes quantes opcions. Pots apropar-te més a l'esfera tancada completament o a un quart d'esfera (o porció més ínfima):



Opció que permet també visualitzar la cúpula geodèsica amb alineació de totes les barres amb una superfície (amb direcció dels plans al centre de l'esfera):

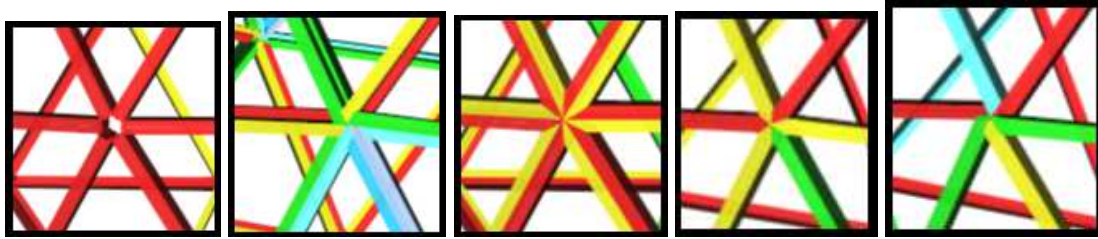


Com es pot veure però, aquest opció d'alinejar la base, comporta augmentar el número de barres diferents. En l'exemple superior, es passa de tres barres diferents (sense alinear base) a 7 (alineant la base al mateix pla).

Opcions de Projecte:

-Radi de l'esfera: En metres lineals coma unitat de mesura.

-Tipus de connexió: Permet visualitzar fins a 5 tipus de unions entre barres diferents. És un dels factors a modificar més importants del programa ja que no és fàcil imaginar-se i dissenyar aquest tipus d'unions amb components axials.

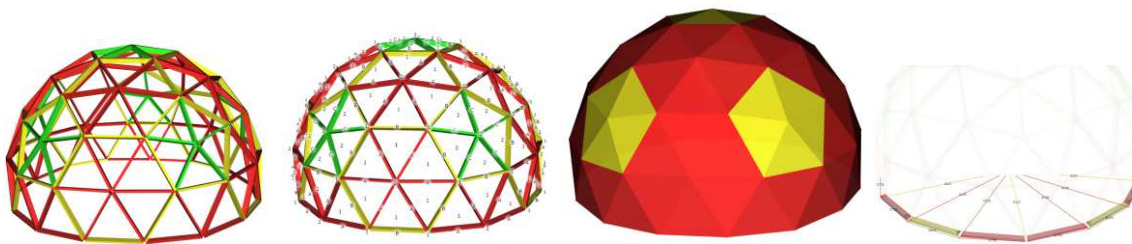


Dimensions de les peces:

-Amplada: En mil·límetres lineals coma unitat de mesura.

-Gruix: En mil·límetres lineals coma unitat de mesura.

A banda dels factors anteriors, té la possibilitat de quatre tipus de visualitzacions diferents:



Carcassa

Esquema

Coberta

Base

-Carcassa: Estructura diferenciada per colors segons dimensions de barres.

-Esquema: Carcassa amb numeració de barres per seguir els plànols de les barres se s'adjunten al propi programa.

-Coberta: Carcassa amb els triangles en forma de cares triangulars opaques i diferenciades per colors segons tipologia dimensional.

-Base: Visualització de les barres de l'estructura que estarien en contacte amb la suposada base. Marcació de punts geomètrics amb el centre i dimensionament de la cota exterior de cada barra.

Resultats:

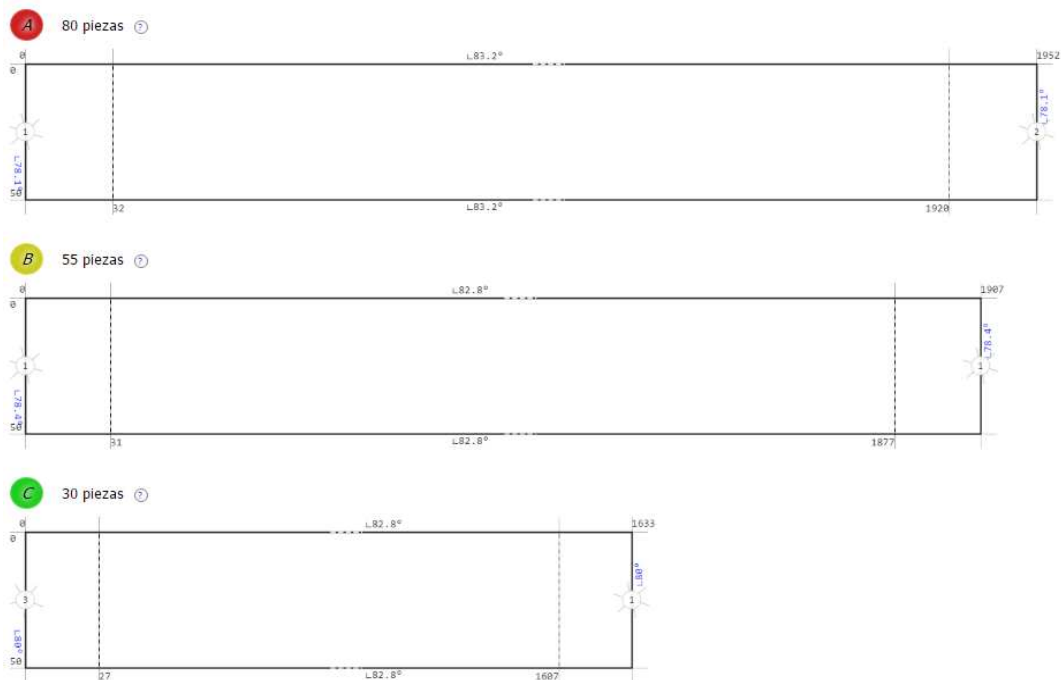
Permet conèixer alguns paràmetres bàsics de dimensionament de la pròpia cúpula i també de les barres que la componen i les corresponents unions:

ESTUDI PARAMÈTRIC DE CÚPULES CONSTRUÏDES AMB ESTRUCTURA DE FUSTA

Resultados ▾	
Altura desde la base, m	3.56
Radio de la base, m	2.95-2.96
Área de la base, m ²	26.59
Área de la cubierta, m ²	64.48
Tamaños (unidades)	
Caras	2 (105)
Aristas	3 (165)
Vértices	3 (61)
Travesaños 80x30mm	
Longitud total de los travesaños, m	195.51
Volumen total de los travesaños, m ³	0.46
Longitud máx. del travesaño, mm	1229
Ángulo entre caras, °	165.54-168.64
Triángulos	
Altura mín., mm	853-1056
Longitud máx. del lado, mm	1211-1237

Resultats numèrics

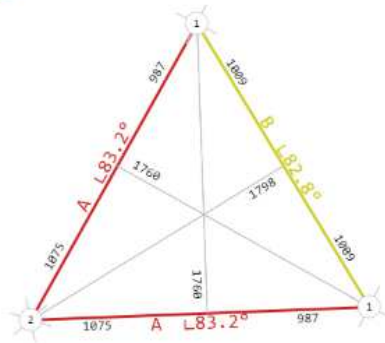
line



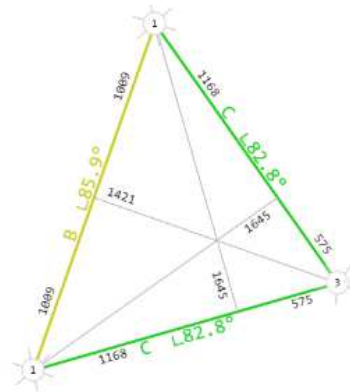
Característiques de les barres

face

1 75 piezas



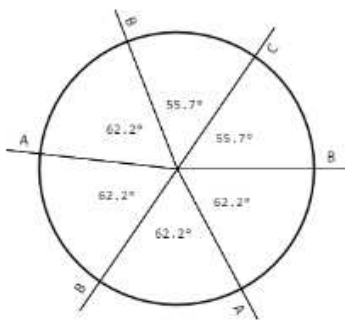
2 30 piezas



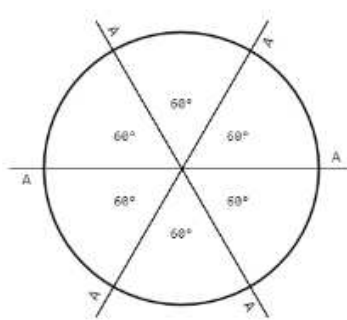
Característiques dimensionals de les cares

vertex

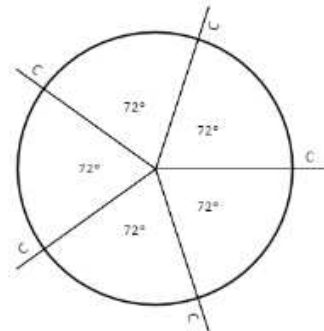
1 40 piezas



2 15 piezas



3 6 piezas



Característiques dels vèrtex

Tots els gràfics d'aquest apartat: www.acidome.ru

Conclusions de l'anàlisi:

El segon programa esmentat, ha permès poder concretar la cúpula que realment es creu amb més potencial. També ha ajudat la mera visualització de projectes ja realitzats, ja que s'ha escollit un tipus de construcció que no sempre s'ha utilitzat en el món geodèsic.

Les dues opcions més viables davallaven entre la freqüència V3 i V4. Aquestes presenten una geometria que combina la relació d'apropar-se a l'esfera perfecte i alhora presenten un esquema de barres més simple, amb poca quantitat de barres diferents. En conseqüència la disminució de quantitat de nusos o unions entre barres a resoldre (un dels punts que es creu, a partir d'exemples comparats, més conflictius de calcular).

5.2 DEFINICIÓ DE LA CÚPULA

S'ha optat per la opció V3 (**freqüència 3**) per la seva esquematització simple (a priori amb només 3 dimensions diferents de barres), tot i que l'esfericitat no s'acosta tant a la perfecció com en el cas de la V4. També és veritat que com més alta és la freqüència, es multiplica el nombre de barres en dimensions més petites, aquest fet comporta però, que la descàrrega de forces sigui distribuïda amb més punts i per tant, el cos pugui treballar amb més solidesa.

S'ha escollit projectar una **cúpula de 6 metres de diàmetre**. Aquesta s'ha concretat per ser una mida amb què les distàncies que es treballaran (metres lineals) seran amenes, conceptualment ràpides de visualitzar. La freqüència que s'ha escollit tendeix a desenvolupar barres més llargues en comparació en freqüències majors, un motiu més per projectar una cúpula amb un diàmetre relativament petit.

Resum de característiques de la cúpula a estudiar:

Diàmetre: 6 metres lineals.

Freqüència: V3

Alçada des de al base: 3,56 metres lineals.

Superfície de la base: 26,59 metres quadrats.

Superfície de coberta: 64,38 metres quadrats.

Nº de cares (C): 105 unitats.

Nº d'arestes (A): 165 unitats.

Nº de vèrtex (V): 61 unitats.

Sumatori de distància de totes les barres: 195 metres lineals aproximadament.

Longitud de la barra més llarga: 1,23 metres lineals aproximadament.

Comprovació del teorema d'Euler (Apartat 4.3.1 d'aquest treball):

$$C+V-A = 1 \quad \rightarrow \quad 105 + 61 - 165 = 1$$

La **coberta** de la cúpula geodèsica no està definida. La tipologia pot ser molt vairada però es preveu una pes màxim de **50 kg/m²**, totalment opaca i estanca en la seva constitució. Abraçarà tota la superfície exterior, com una membrana continua, i es preveu la seva fixació homogènia en cadascuna de les barres de l'estructura. La elecció concreta del material i sistema constructiu poden variar segons diferents paràmetres: ús interior, estètica, aïllant, etc... els quals no s'entrarà amb l'estudi d'aquests.

5.3. DISSENY

Una vegada concretat el diagrama, s'ha de presentar a la realitat la projecció dels elements. Aquest fet comporta dimensionar cadascuna de les barres, buscar un sistema de unió entre barres que sigui real i construïble i, finalment, fer que el conjunt pugui ser muntat.

És necessari doncs pensar en global per focalitzar cadascun dels conceptes descrits.

El sistema de muntatge de la cúpula geodèsica que es vol desenvolupar es caracteritza per la construcció prèvia dels elements singulars de iguals formes i la unió d'aquests mitjançant connectors.

Aquest sistema s'ha extret de la funcionalitat real que utilitza l'empresa Esfèric. Gràcies a l'experiència de l'any de vida que porta Esfèric en actiu, s'ha pogut tenir una base real del procés de disseny i càlcul, construcció i muntatge, que ha permet treballar sobre un mètode d'assaig provat.

Es pot classificar com a elements singulars les figures hexàgon, el pentàgon i tres triangles que conformen un mig hexàgon per completar la base, extret de l'esquema mare:

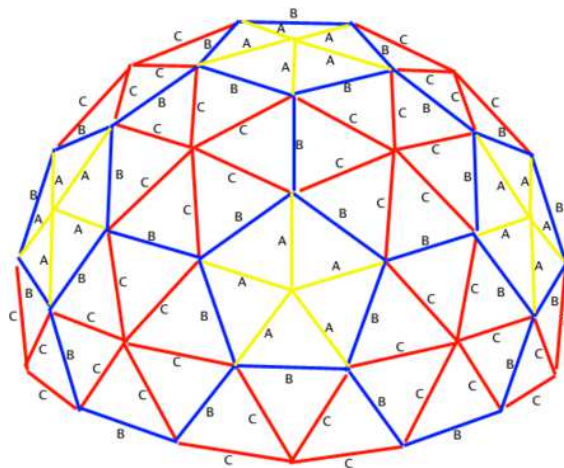


Diagrama Freqüència V3

Cadascun d'aquests elements singulars (Hexàgon (radis "C", vermells), pentàgon (radis "A", grocs) i mitjos hexàgons (radis C, vermells)), compartiran la barra "B", blava. Aquest fet ens condiciona en el muntatge posterior el doblat de la barra B, ja que una formarà part del pentàgon i l'altre de l'hexàgon o ½ hexàgon.

De totes maneres, en el primer càlcul aquests elements no es diferencien i per tant, s'estudia la cúpula amb la descàrrega de forces a través de barres sense volum que conformen triangles.

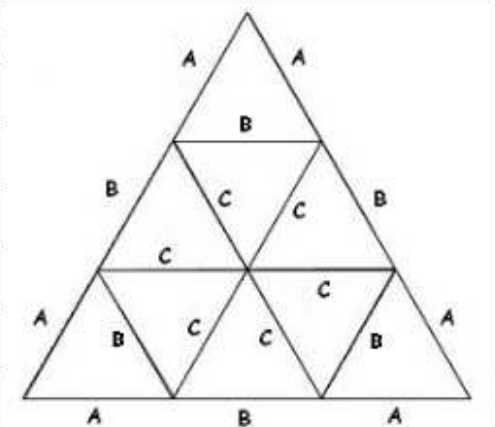
5.4. DESENVOLUPAMENT DEL MODEL

Una de les parts més complexes és la creació del model en un software conegut per poder introduir el cos geomètric al programa de càlcul.

En aquest cas, s'ha treballat amb dos programes de la companyia Autodesk: "AutoCAD" i "Inventor".

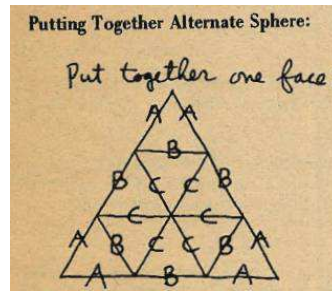
El primer programa ha estat de gran ajuda sobre tot per definir bases, buscar punts geomètrics i aproximar una geodèsica en 3D. Aproximar, perquè s'ha treballat en coeficients extrets i comparats de diferents fonts i viabilitat comprovada, de documentació bibliogràfica (el més referent: "Dome Book 2") i virtual ("Desertdomes") Aquests coeficients mare són els següents per als diferents tipus de barres i el diagrama a treballar (freqüència V3):

Strut	Strut factor	3/8	5/8	Sphere
A	.34862	30	30	60
B	.40355	40	55	90
C	.41241	50	80	120
4-way connectors		15	15	0
5-way connectors		6	6	12
6-way connectors		25	40	80



Font: www.desertdomes.com

3-FREQUENCY ALTERNATE 2 FT DIAMETER SPHERE				
Strut	Chord Factor	Strut Length *	Color Code	Make This Many
A	.3486	3 13/16"	Red	60
B	.4035	4 15/32"	Blue	90
C	.4124	4 9/16"	Yellow	120



Font: "Dome book 2" (pàgina 5)

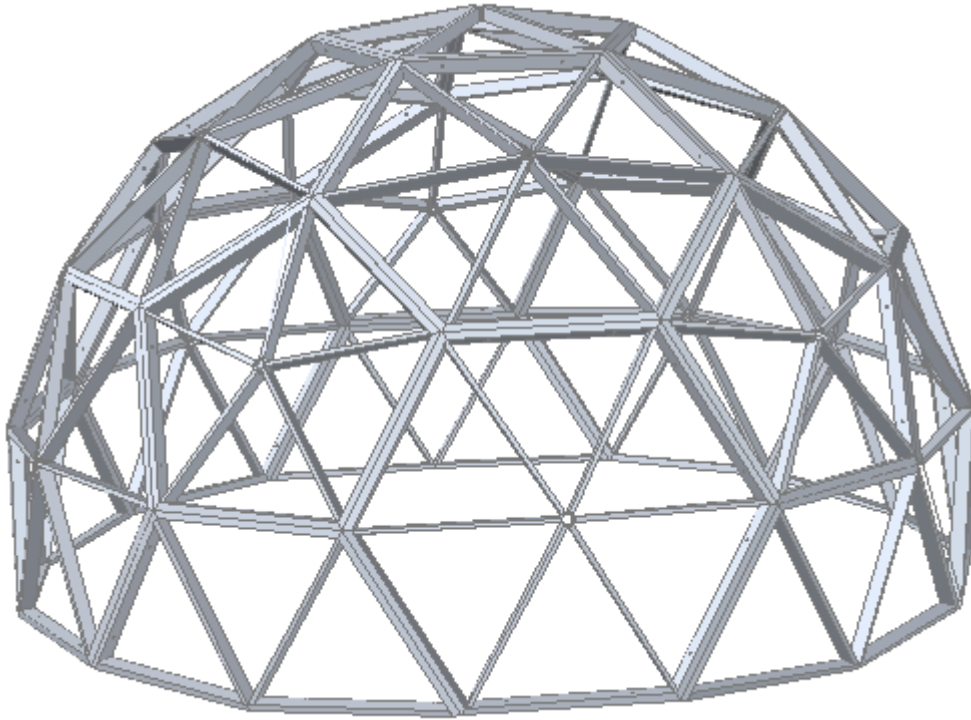
** En aquest post, es referència la cúpula de 5/8 de porció d'esfera. La realitat però, una vegada realitzat el dibuix en 3D i prenent aquests valors, ha demostrat que els coeficients de les barres que es mostren, dissenyen una cúpula de 7/12 d'esfericitat. Volumetria lleugerament superior al definit a la taula anterior i que sí mostra el programa de visualització "Acidome".

Multiplicant els coeficients donats, per el radi de la cúpula a projectar (6 metres lineals), ens resulta els valors següents, que són la llargada entre punts de les barres per conformar la cúpula:

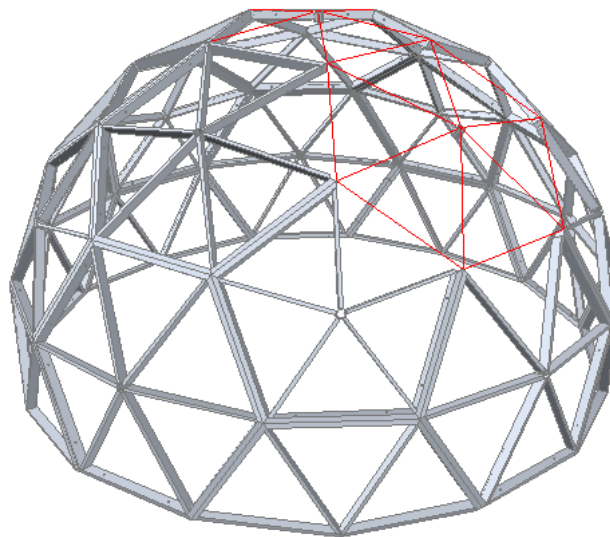
Strut	Length	3/8	5/8	Sphere
A	1.045	30	30	60
B	1.210	40	55	90
C	1.237	50	80	120
4-way connectors		15	15	0
5-way connectors		6	6	12
6-way connectors		25	40	80

Font: www.desertdomes.com

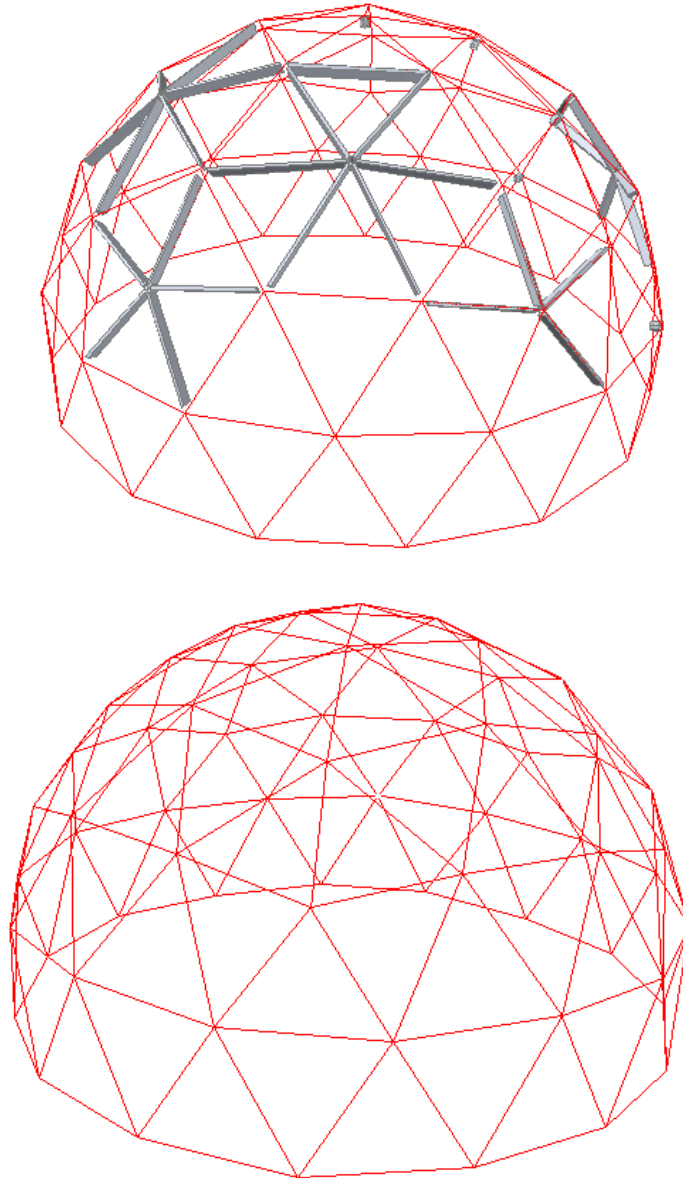
El procediment de disseny del cos al programa Inventor, ha permès projectar tota la cúpula simplement introduint els paràmetres Radi i la dimensió de la barra anomenada "B", l'aresta que comparteixen totes les figures singulars. Amb la introducció de només dos paràmetres, un de decimals finits (el Radi), ha permès que no hi haguessin conflictes entre mesures decimals que acabessin acumulant errors dimensionals.



A partir del cos volumètric extret del programa Inventor, s'ha pogut realitzar el diagrama de barres per poder introduir-lo al càlcul de descarrega de forces.



El procés ha estat manual, resseguint la unió entre figures amb una línia vermella per crear l'eix del diagrama.



Tots els gràfics d'aquest apartat: Creació pròpia.

5.5. DESCRIPCIÓ DE BARRES

Aquesta descripció ve determinada per cadascun dels elements que componen la cúpula i també les peces que permeten fixar-los i estabilitzar-los.

Es donarà importància en crear una estructura resistent però esvelta, aproximant el volum de material i les hores de fabricació d'aquest al mínim necessari per què es pugui desenvolupar a la realitat, acotant els costos econòmics per construir-la, muntar-la i si fos el cas desmuntar-la.

Elements/barres/puntals:

El material escollit per a la construcció dels elements o barres de la cúpula és l'abet Douglas (Pseudotsuga menziesii) o altrament classificat Pi d'Oregon (ara ja extingit pràcticament, es considera que l'abet Douglas "descendeix" del Pi Oregon).

L'elecció ha vingut donada per una combinació de dos factors:

a) La proximitat d'extracció d'aquesta fusta, compreses entre petites àrees de la Selva, el Montseny o les Guillaries, o a falta de proveïdor del país, la fusta Douglas es localitza a França a preus molt baixos.

b) Per les bones propietats estructurals, amb una densitat entre 520 i 480 kg/m³ i una duresa 3,96 mm⁻¹ classificada com a "semidura o dura", categoria C22 classe II, presenta unes excel·lents característiques de durabilitat al resistir en gran mesura atacs de fongs i insectes.

Aquesta espècie va ser introduïda, procedent d'Amèrica del Nord, costa oest, fa aproximadament 150 anys en els boscos europeus. Es desmarca de la resta de coníferes per les seves característiques intrínseques. Douglas és "hereditari" de l'espècie Oregon, molt apreciada per fusters del país amb una característica peculiar que li donava la seva agradable olor. Oregon, s'ha extingit pràcticament a l'actualitat i els professionals que la tractaven recorden amb nostàlgia les seves virtuts.

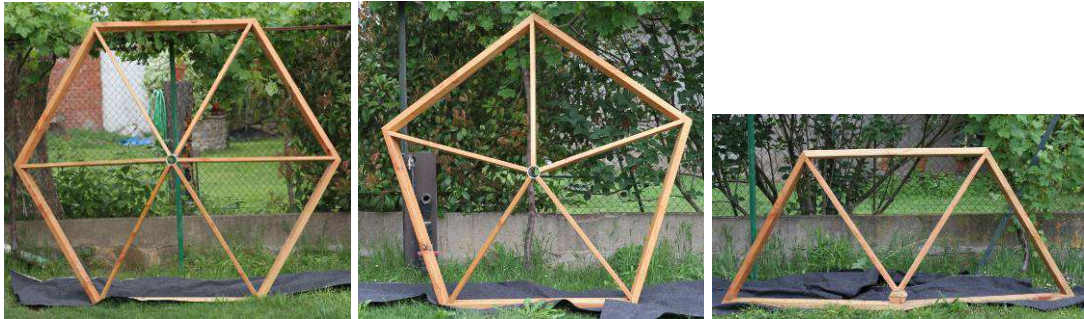
El color és un vermellós, ja que el color de l'albeca varia del blanc o el color crema fins al rosat, mentre que el duramen va del groc o el groc rogenc fins al taronja o fins i tot el roig fosc. Els anells són molt visibles per la clara diferenciació entre fusta de primavera i tardor. Radis llenyosos visibles en el tall radial. Presenta canals resinífers i nombrosos canals de resina. De fibra recta i uniforme, encara que en ocasions ondulada o en espiral i gra entre mitjà i gran.



Fotos: *Guia de la fusta de les espècies forestals de Catalunya*

Identificació figures:

A continuació es mostren els tres tipus diferents de figures que componen una cúpula geodèsica sencera V3, i 7/12 de proporció esfèrica. El radi de la cúpula generada per aquestes figures és de 6 metres.



Hexàgon

Pentàgon

½ Hexàgon

Nº de figures per construir una cúpula geodèsica V3, 7/12 de porció d'esfera, sense obertures:

Hexàgons: 10 unitats = 60 barres perimetrals + 60 barres radials.

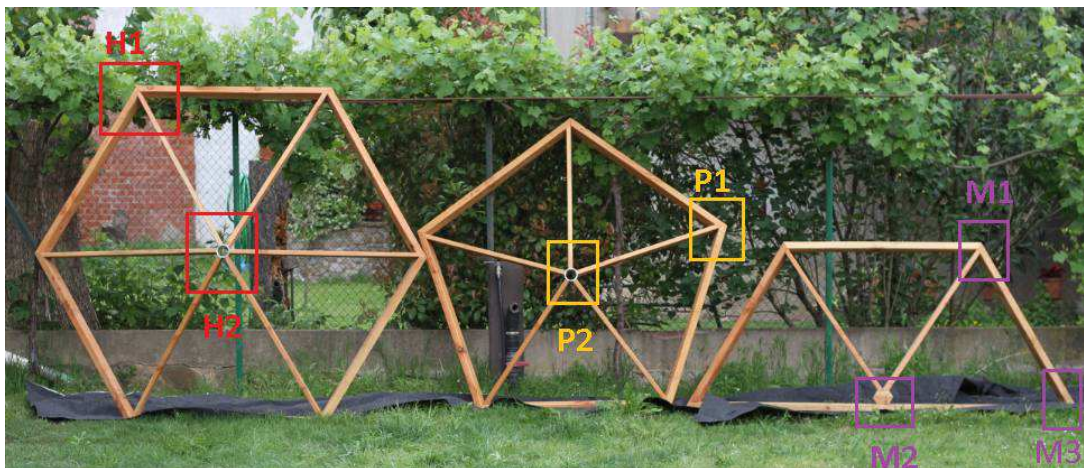
Pentàgons: 6 unitats = 30 barres perimetrals + 30 barres radials.

½ Hexàgons: 5 unitats = 2 barres base + 3 barres laterals + 2 barres radials

5.6. UNIONS I FIXACIONS

Elements que assumeixen una gran responsabilitat en la configuració de la cúpula, ja que són punts clau que s'encarreguen de traslladar les accions estructurals a les barres, el disseny del qual sol ser complexa. Com s'ha pogut previsualitzar amb softwares, i analitzar a l'apartat 5.1., existeixen ja diferents tipologies de metodologies per unir les barres.

S'ha escollit fer un mixt de dues tipologies, una per la part central de les figures Hexàgon i Pentàgon i l'altra per la connexió entre barres del perímetre i els radis d'aquests.



Classificació de tipus d'unions diferents a les figures

5.6.1. Unió entre Radis

S'ha escollit el tipus d'unió amb tub per motius pràctics de muntatge, introduint dos tirafons a 45° en direcció a la testa de la barra. Aquest tub permet resoldre ràpidament la unió de 5 o 6 barres sense necessitat de confeccionar-ne amb dobles angles o elements de reforç.

Tub d'alumini: Material dur i lleuger, amb una estètica elegant i neta. L'experiència d'utilitzar tub de PVC no va donar bons resultats ja que es deformava amb facilitat.



Unió H2 (Hexàgon)



Unió P2 (Pentàgon)

5.6.2. Unió entre elements (barres)

Els element de fixació entre tots els elements barra (fusta-fusta) i fusta-alumini (unió de centres de figures) són els tirafons HBS amb cap avellanat.

S'ha buscat un tirafons que el proveïdor garantís unes mínimes característiques. Els tirafons escollits HBS amb cap avellanat, estan fabricats d'acer al carboni (alta resistència $f_{yk} = 1000 \text{ N/mm}^2$) i zincat galvanitzat blanc. La rosca a 40° que el compona és asimètrica per una major capacitat de penetració a la fusta.

S'utilitzen, segons característiques de catàleg, tirafons HBS 5x90 mm. A la fixació entre barres (fusta-fusta). Per a la unió d'alumini (preforadat) amb fusta s'utilitza l'HBS 4x35 mm.

El proveïdor en concret assegura que segueix els paràmetres de normativa DIN 1052:1988, amb valors característics compresos a la normativa EN 1995:2008 / ETA-11/0030, per a què el projectista pugui prendre els valors referenciats a catàleg amb garanties de seguretat estructural.

Detalls tècnics dels tirafons de fixació de barres i unions:

1. Punta autoperforant: es caracteritza per una geometria afilada i punteguda (anomenada "sharp") amb una rosca a llevataps que arriba fins al final.

2. Mossegada: A la punta autoperforant se li suma una mossegada vertical que facilita el tall de les fibres durant el collat i redueix el risc de ruptures a la fusta.

3. Roscat: El pas de la rosca està calibrat en funció del diàmetre i de la longitud del tirafons: una rosca de pas ràpid és ideal als cargols llargs per reduir el temps de collat, metres una rosca de pas lent es ideal en petits cargols per garantir precisió al final del collat.

4. Fresa: La geometria de la fresa està especialment dissenyada per ampliar les fibres de la fusta i treure les virolles generades per l'avançament del tirafons. La fresa crea un espai per el pas de la barra i limita el sobreescalfament del tirafons.

5. Coll: Un encerat especial recobreix el coll lis i redueix la fricció en un 30% durant el collat.

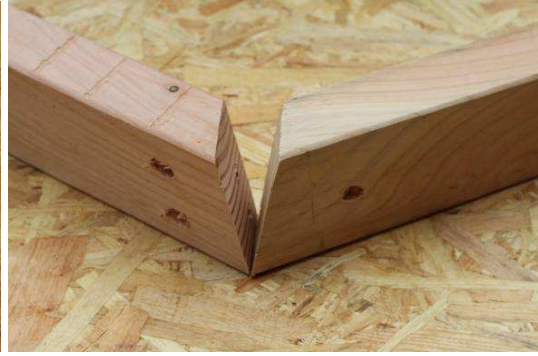
6. Sota el cap: Els aixamfranats (anomenats "ribs") es caracteritzen per un motlle molt afilat apte a tallar les virolles que surten del forat després de la perforació de la fusta.

7. Cap: El sistema de collat Torx permet tenir més cares de superfície per repartir la força a la punta tenir una adherència entre la punta del tornavís o trepant i el tirafons àmpliament assegurada que en d'altres tipus de caps.

ESTUDI PARAMÈTRIC DE CÚPULES CONSTRUÏDES AMB ESTRUCTURA DE FUSTA



Tirafons HBS



Barres perímetres figures



Fixació barres perímetre figures amb tirafons



Fixació barra radi figures amb tirafons



Unió H1 i P1. La diferència entre la unió d'un pentàgon i un hexàgon és en els angles de les testes de la fusta.



Unió M1 i M3. La diferència entre la unió d'un pentàgon i un hexàgon és en els angles de les testes de la fusta.

En el cas de la unió M2, s'ha escollit una unió lleugerament diferent a la visualitzada a les fotos, ja que varia en un element. El gruix del reforç és més esvelt. S'elimina un dels dos tacs. El que es mostra a continuació és d'una figura de dimensions més petites però amb les mateixes característiques que el ½ hexàgon de la cúpula de diàmetre 6 metres



Unió M2

5.6.3. Unió entre figures

Entre figures s'uneixen per els laterals d'aquestes a través de 2 punts per barra, el sistema de fixació és a partir de cargol amb cap hexagonal, doble volandera (una per cada cara) i femella hexagonal autoblocant. Acer galvanitzat com a material per els elements anteriors.

Amb el sistema cargol-femella permet fer una fixació ràpida mitjançant una pistola pneumàtica o "carrques" manuals per collar un element, i amb clau fixa per fixar l'altre element.



Fixació de figures

Totes les fotos d'aquest apartat: Font pròpia.

6. CÀLCUL

6.1. GENERALITATS

El càlcul de la cúpula ha de precedir d'un sistema fàcil de reclutament de dades de dimensions i introducció als softwares, que ajudin a fer càlculs amb més rapidesa i menys possibles punts on errar.

L'objectiu del treball és procedir a trobar un sistema de parametrització d'aquest càlcul. La complexitat rau en el gran nombre de cares, arestes i posicions d'aquestes, amb una distribució tridimensional que no té res a veure amb estructures que es poden plasmar amb esquemes 2D de pòrtics, per exemple.

Una vegada analitzat el disseny de l'estructura, els materials que conformaran les barres i la manera de distribució i fixació d'aquestes, es realitza un càlcul estructural del mateix conjunt per donar secció i dimensions concretes a tots els elements. Aquest càlcul ha de permetre l'estabilitat de la cúpula a la zona geogràfica on es desitgi ubicar i sota paràmetres de la normativa que regula els edificis de construccions actuals: "Codigo técnico de la edificación (CTE)", concretament el document bàsic d'accions a l'edificació (DB SE-AE) i DB-SE-M, degut al material del que es composaran les barres.

Es planteja realitzar el càlcul com una càrrega de llarga durada i de Classe de servei II. En una primera reflexió es pot pensar que les cúpules geodèsiques que s'han descrit poden ser construccions efímeres, comportant així haver de plantejar uns coeficients que permetin modificar els resultats segons la durabilitat desitjada de la construcció en comparació en un lloc fix. No és el mateix per exemple, construir l'estructura per un habitatge fixa, que construir-la per un esdeveniment de cap de setmana.

Aquesta consideració és resultant d'una reflexió en què s'ha de parametritzar tant si es dissenya una cúpula per un muntatge fix en el temps, com en efímer, per tant, s'haurà de tenir en compte aquest factor depenent de la durabilitat que se li atorgui.

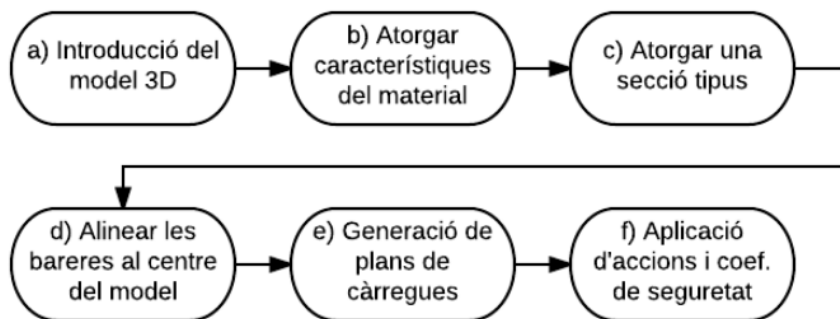
Com s'ha esmentat, la cúpula geodèsica a estudi incorpora coberta a la seva façana exterior. Aquest fet és de vital importància contemplar-lo, ja que un càlcul sense coberta, amb l'estructura nua, l'acció del vent tindria un comportament totalment diferent. La coberta en qüestió no es defineix ja que segons l'ús pot ser múltiple. L'emplaçament de la cúpula pot fer diferenciar potencialment el seu càlcul i posterior dimensionat de barres i nusos.

Es pren com a referència una coberta no transpirable, impermeable i llisa. L'acabat real, per donar-li una visió de realitat, podria anar des de'na lona de cobertura de PVC, acabat de fusta o fins hi tot un arrebossat continu de calç, per exemple.

Les condicions climatològiques prendran valors de situació a la província de Girona. Es tindran en compte paràmetres desfavorables d'aquesta zona per les accions de neu i vent.

6.2. PROCEDIMENT I PARÀMETRES DE CÀLCUL

Es segueix el següent procediment per realitzar el càlcul. En aquest procediment també es contempen tots els paràmetres de càlcul:



a) Introducció del model 3D

Acció senzilla al programa de càlcul "Metal 3D".

b) Atorgar les característiques del material

El mòdul de fusta utilitzat el C22 Classe de servei III. Aquesta, ve marcada per CTE-SE-Madera a l'Annex C, regulada per la norma francesa NF B 52.001-4, país d'on prové la majoria d'abet Douglas.

c) Atorgar una secció tipus

L'elecció de generalitzar la mateixa secció per a totes les barres ha estat per dues raons:

En primer lloc s'ha de tenir constància de quines seran les barres que hauran de suportar més esforç i seguidament es detectaran les que poden tenir seccions més petites o més grans que la establerta en aquest predimensionat.

Per altra banda es creu convenient que ha de ser així, generalitzant la majoria de barres amb una o poques seccions diferents, ja que per motius logístics de proveïdors, constructors i muntadors, el procediment s'agilitza i es desenvolupa amb mitjans més versàtils.

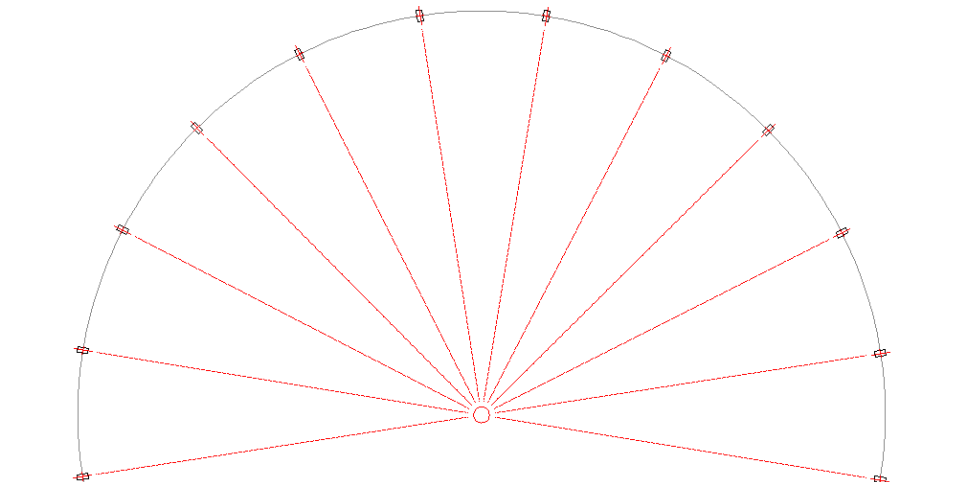
Aquesta secció ha estat definida de 80 x 30 mm. L'elecció ve donada per ser una mida estàndard de proveïdors.

d) Alinear les barres

Es tracte de dirigir les barres en el sentit a la qual treballen. Aquest es realitza focalitzant les barres amb el cantell 30 mm. a la posició 0, centre de l'esfera, centre de la cúpula. Dimensionades les barres se li ha de donar sentit per atorgar-li la forma de treballar i absorbir esforços. Bàsicament comporta direccionar la cara més estreta de la barra, perpendicularment al centre de l'esfera.

El motiu és que s'ha introduït un model amb barres simples, sense secció. Al aplicar-li aquesta secció, aquesta parteix del centre de gravetat que es col·loca alineat a la línia simple del model, però sense direcció gradual concisa.

Aquest paràmetre comporta doncs, atorgar una direcció perquè la barra estigui orientada segons la direcció que desitgem. Aquest procés es realitza a través del programa de càlcul amb una acció relativament simple.



Esquema alineació de barres al centre cúpula. Tall central en un eix.

e) Generació de plans de càrregues

Els plans de càrrega tenen forma triangular. Aquests plans es conformen alineant tres barres, formant triangles. Cada pla tindrà una direcció perpendicular única.

En direcció perpendicular a aquests plans, el programa de càlcul aplica la càrrega del factor vent que se li encomani, segons el grau d'exposició entre pla-direcció del vent.

f) Aplicació d'accions i coeficients de seguretat i durabilitat

Aquests paràmetres sorgeixen de normativa segons els criteris en què es vol comprovar l'estructura. Es desenvolupen a l'apartat 6.3. i 6.4.

6.3. ACCIONS

6.3.1. Classificació d'accions

Les càrregues que afectaran al conjunt de la cúpula i la coberta que l'envoltarà es poden dividir en dues seccions: les accions gravitatòries als nusos i les accions a les barres.

Les accions als nusos són les que tenen en compte els pesos gravitatoris de material, neu o us i les accions conduïdes per les barres al qual està unit.

El pes de la cargolaria, i el pes de les unions amb tub d'alumini(<500g/ut.), estan inclosos al pes de la coberta.

Les accions a les barres, bàsicament corresponent a les induïdes per la força del vent que xoca a la coberta formant descàrregues de forces als plans, i aquestes alhora, les transmeten a les tres barres que conformen cada triangle estructural de la cúpula geodèsica.

Cal remarcar l'estanquitat de la cúpula en prendre com a base teòrica l'omissió d'obertures. Si existissin obertures, el càlcul de l'acció del vent s'hauria d'estudiar amb un format diferent, ja que l'estructura hauria de suportar, a més de les esmentades accions del vent exterior, forces d'empenta i succió dins la pròpia cúpula.

6.3.2. Accions gravitatòries als nusos

Eep: -Pp: fusta categoria C22, Classe III

-Cp: 50 kg/m² (coberta)

-Qús: 100 kg*

-N: 60 kg/m²*

(Pp) - El pes propi ve determinat bàsicament per les barres, ja que és el material predominant a l'estructura. S'ha considerat una categoria de fusta C22, classe III, com marca el "CTE-SE-Madera".

(Cp) - S'ha considerat un pes de coberta de 50 kg/m².

(Qús) - Aquest paràmetre només es contempla per a una persona que realitza tasques de construcció de la pròpia cúpula. Per a contemplar-ho als nusos, s'ha considerat que es reparteix a aquest en parts iguals de 50 kg per nus per tota la coberta.

(N) - S'ha considerat una sobrecàrrega de neu, a una alçada de 400 metres sobre el nivell del mar de 0,6 KN/m². "Taula E.2. Sobrecàrrega de neu en terreny horitzontal" CTE DB SE-AE.

*Cal remarcar en els dos paràmetres anteriors (Qús) i (N), que no es combinaran mai junts, ja que es considera que o bé es munta la cúpula (i per tant, encara no hi ha coberta per a suportar neu) o ve neva (per tant, la coberta està muntada i ja no hi ha la construcció de la mateixa).

Per homogeneïtzar les càrregues als nusos, les aplicarem per figures per introduir-los al programa de càlcul, el qual repartirà els esforços. Aplicarem la càrrega de la figura més desfavorable a la resta de figures, separant això sí, pentàgons i hexàgons.

Procediment: Superfície * càrregues

Àrea del pentàgon/hexàgon: $P \cdot A / 2$ (m²) on P= perímetre figura i A és l'Apotema.

$$\text{Hexàgon: } 7,2 \cdot 1,03 / 2 = 3,71 \text{ m}^2 \approx 3,75 \text{ m}^2$$

$$\text{Cp: } 3,75 \text{ m}^2 \cdot 50 \text{ kg/m}^2 = 187,5 \text{ kg.}$$

$$\text{Sús: } 100\text{kg.}$$

Total nusos hexàgon: 187,5 kg. + 100 kg. = 387,5 kg. Cada nus confluència de 6 barres.

$$\text{Pentàgon: } 6 \cdot 1,03 / 2 = 2,46 \text{ m}^2 \approx 2,5 \text{ m}^2$$

$$\text{Cp: } 2,5 \text{ m}^2 \cdot 50 \text{ kg/m}^2 = 125 \text{ kg.}$$

$$\text{Qús: } 100\text{kg.} / 2 = 50 \text{ kg.}$$

Total nusos pentàgon: 125 kg. + 100 kg. = 225 kg. Cada nus confluència de 5 barres.

6.3.3. Accions a les barres

El factor vent condiona a través d'una empenta de pressió i succió horitzontal l'estructura. Aquest factor s'ha de transmetre a cadascuna de les barres, encarregades de suportar-lo, i seguidament als nusos.

Càlcul càrrega del vent:

$$\text{Segons CTE DB SE-AE: } q_e = q_b \cdot C_e \cdot C_p$$

$$q_b = 50 \text{ kg/m}^2$$

$$C_e = 2,4 \text{ (classe I, estructura } < 3 \text{ metres d'alçada)}$$

C_p = en aquest cas hi ha dos coeficients.

$$\text{Per càrregues en pressió} = C_{pp} = 0,7$$

$$\text{Per càrregues en succió} = C_{ps} = -0,4$$

$$\text{**coeficient d'esveltesa} = \lambda = \text{alçada} / \text{base} = a / 2a = 0,5$$

ESTUDI PARAMÈTRIC DE CÚPULES CONSTRUÏDES AMB ESTRUCTURA DE FUSTA

L'alçada de la base de la cúpula és quasi la meitat del diàmetre o base. Per tant alçada = a. Base = 2a.

Valor final de la càrrega del vent més desfavorable en cas de pressió:

$$Q_p = 50 \text{ kg/m}^2 \cdot 2,4 \cdot 0,7 = \mathbf{84 \text{ kg/m}^2}$$

Valor final de la càrrega del vent més desfavorable en cas de succió:

$$Q_s = 50 \text{ kg/m}^2 \cdot 2,4 \cdot (-0,4) = \mathbf{-48 \text{ kg/m}^2}$$

6.4. JUSTIFICACIÓ DE NORMATIVA

S'ha comprovat, segons paràmetres de normativa, la resistència de la barra més desfavorable del model dissenyat barres de 40x80 mil·límetres de secció.

La normativa que regula i marca les comprovacions pertinents és el CTE DB SE-M.

La barra més desfavorable és la compresa entre els nusos N44/N49. Amb aquesta, es realitzarà la comprovació de resistència de la normativa esmentada.

6.4.1. Compliment de resistència del material

Resistència a compressió uniforme paral·lela a la fibra ($N_{c,0,d}$)
(CTE DB SE-M: Apartat 6.1.4 – 6.3.2)

Factor de modificació per la durada de la càrrega (Llarga durada) i el contingut d'humitat (Classe de servei 2):

- k_{mod} : 0,70

Factor associat a la rectitud de les peces:

- β_c : 0,20

Resistència a flexió a l'eix y ($M_{y,d}$)
(CTE DB SE-M: Apartat 6.1.6 – 6.3.3)

Mòdul resistent elàstic de la secció transversal:

- $W_{el,y}$: 42,67 cm³

Factor de modificació per a la duració de la càrrega i el conjunt d'humitat:

- k_{mod}^+ : 0,90

- k_{mod}^- : 0,60

Coefficient parcial per a les propietats del material:

- γ_M : 1,30

Resistència a flexió a l'eix z: ($M_{z,d}$)
(CTE DB SE-M: Apartat 6.1.6 – 6.3.3)

Mòdul resistent elàstic de la secció transversal:

- $W_{el,z}$: 21,33 cm³

Factor de modificació per a la duració de la càrrega i el conjunt d'humitat:

- k_{mod}^+ : 0,90

- k_{mod}^- : 0,60

Coefficient parcial per a les propietats del material:

- γ_M : 1,30

Resistència a tallant a l'eix y: ($V_{y,d}$)
(CTE DB SE-M: Apartat 6.1.8)

Factor que té en compte la influència de les fenedures:

- k_{cr} : 0,67

Factor de modificació per la durada de la càrrega (Curta durada) i el contingut d'humitat (Classe de servei 2):

- k_{mod} : 0,90

Coefficient parcial per a les propietats del material:

- γ_M : 1,30

Resistència a tallant a l'eix z: ($V_{z,d}$)

(CTE DB SE-M: Apartat 6.1.8)

Factor que té en compte la influència de les fenedures:

- k_{cr} : 0,67

Factor de modificació per la durada de la càrrega (Curta durada) i el contingut d'humitat (Classe de servei 2):

- k_{mod} : 0,90

Coefficient parcial per a les propietats del material:

- γ_M : 1,30

Resistència a flexió esbiaixada: ($M_{y,d}M_{z,d}$)

(CTE DB SE-M: Apartat 6.1.7)

Factor de modificació per la durada de la càrrega (Curta durada) i el contingut d'humitat (Classe de servei 2):

- k_{mod} : 0,90

Coefficient parcial per a les propietats del material:

- γ_M : 1,30

Factor que té en compte l'efecte de redistribució de tensions sota flexió esbiaixada i la falta d'homogeneïtat del material en la secció transversal:

- k_m : 0,70

Resistència a flexió i compressió axial combinades: ($N_{c,0,d}M_{y,d}M_{z,d}$)

(CTE DB SE-M: Apartat 6.2.3)

Factor de modificació per la durada de la càrrega (Curta durada) i el contingut d'humitat (Classe de servei 2):

- k_{mod} : 0,90

Coefficient parcial per a les propietats del material:

- γ_M : 1,30

Factor que té en compte l'efecte de redistribució de tensions sota flexió esbiaixada i la falta d'homogeneïtat del material en la secció transversal:

- k_m : 0,70

Factor d'inestabilitat:

- $\chi_{c,y}$: 0,74

- $\chi_{c,z}$: 0,26

6.4.2. Resum de factors i coeficients:

Factor de modificació per la durada de la càrrega (Llarga durada) i el contingut d'humitat (Classe de servei 2):

- k_{mod} : 0,70

Valor determinat per UNE-EN 14981-1 per fusta massissa. S'ha considerat la durada de càrrega de llarga durada ja que es considerava excessiu un durada permanent de menys més de 10 anys. La classe de servei ve determinada per la ubicació a la província de Girona, amb una mitjana per sota el 85% d'humitat.

Factor de modificació per a la duració de la càrrega i el conjunt d'humitat:

- k_{mod}^+ : 0,90

- k_{mod}^- : 0,60

La combinació d'accions ve determinada entre la màxima durabilitat (permanent, superior a 10 anys) i la mínima marcada per normativa (curta, menys de una setmana)

Factor associat a la rectitud de les peces:

- β_c : 0,20

Factor on influeixen diferents característiques de la fusta com el mòdul d'elasticitat transversal característic, al superfície de la secció, el mòdul d'elasticitat longitudinal característic i el moment d'inèrcia de la secció.

Mòdul resistent elàstic de la secció transversal:

- $W_{el,y}$: 42,67 cm³

- $W_{el,z}$: 21,33 cm³

Coeficient parcial per a les propietats del material:

- γ_M : 1,30

Coeficient determinat per el tipus de fusta: fusta massissa.

Factor que té en compte la influència de les fenedures:

- k_{cr} : 0,67

Paràmetre fixa per fusta massissa.

Factor que té en compte l'efecte de redistribució de tensions sota flexió esbiaixada i la falta d'homogeneïtat del material en la secció transversal:

- k_m : 0,70

Valor fixa per seccions rectangulars.

Factor d'instabilitat:

- $\chi_{c,y}$: 0,74

- $\chi_{c,z}$: 0,26

Paràmetres en funció de l'esveltesa mecànica i la classe resistent (C22).

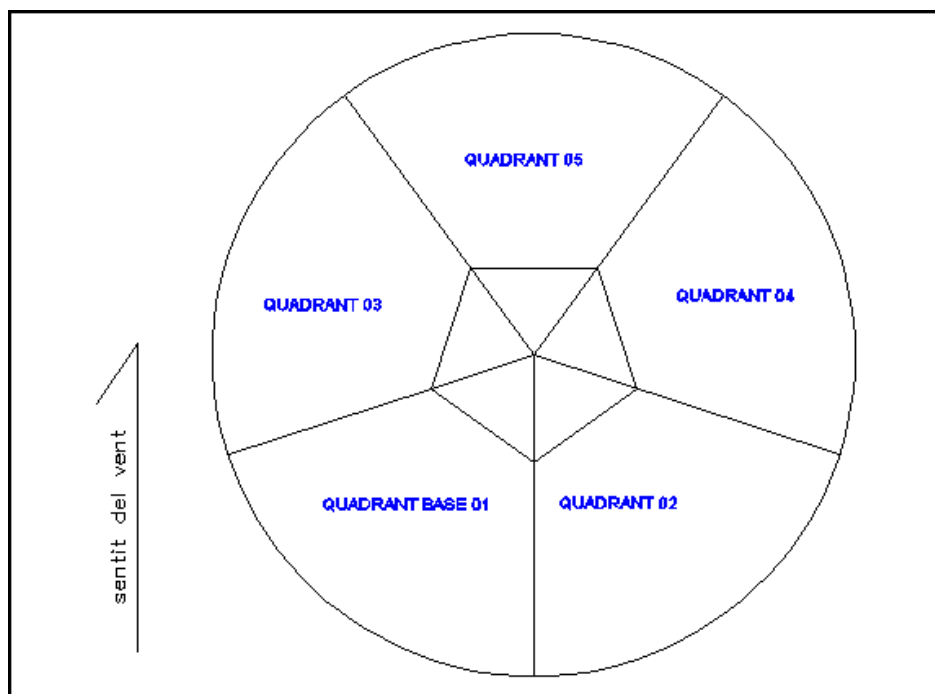
6.5. PARAMETRITZACIÓ D'ACCIONS

Aquest punt és on està la dificultat d'execució del càlcul. La cúpula geodèsica a estudi, està composta per 10 hexàgons, 6 pentàgons i 5 mitjos hexàgons.

Cada hexàgon està subdividit amb 6 triangles, que cadascun d'aquest està orientat en un sentit diferent. El mateix passa amb el pentàgon, que en aquest cas son 5 triangles el que el componen. Finalment, el mig hexàgon, està compost per 3 triangles dels quals els plans d'aquests estan perpendicularment orientats en diferents direccions. En definitiva, la suma de tots els plans dels triangles que conformen la cúpula geodèsica, és de 105 plans amb cadascun, una orientació diferent.

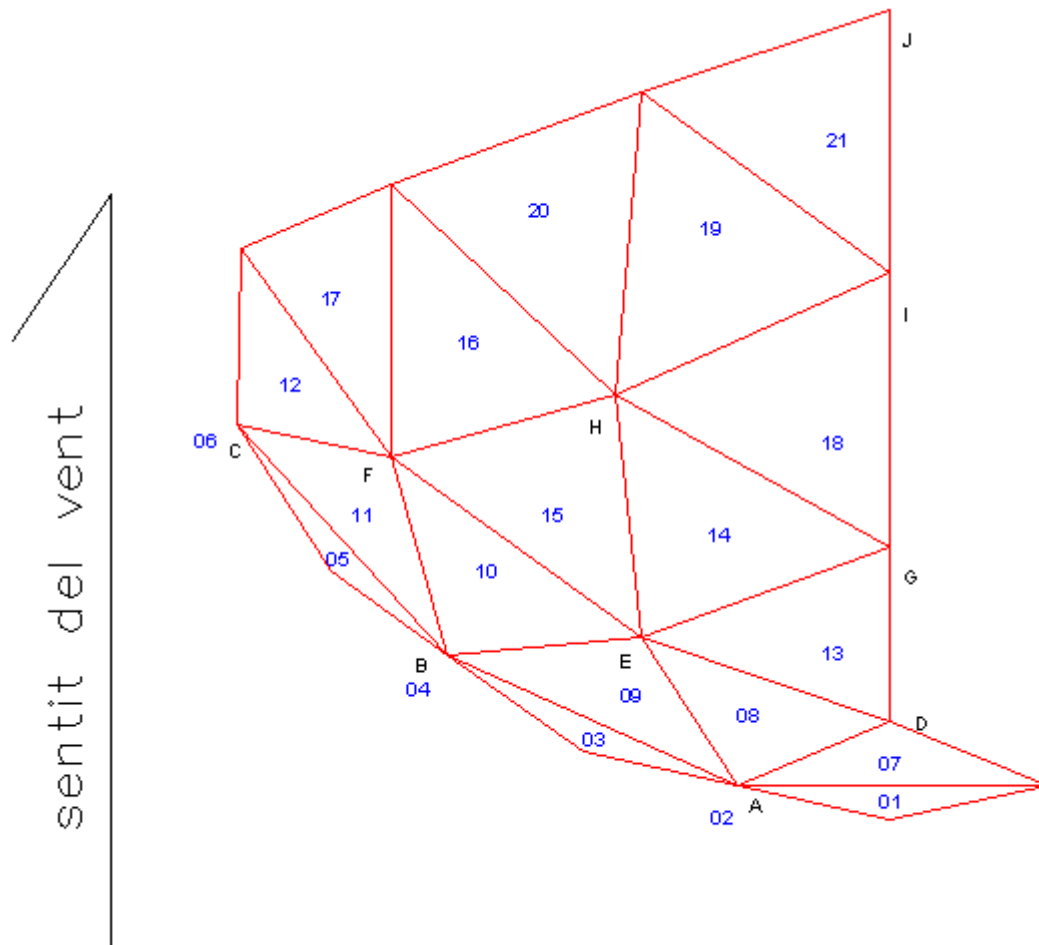
La opció òptima, ha estat la visualització global de la geodèsica i observar una relació de simetria per poder agilitzar el procés de càlcul dels 105 plans. En aquest sentit s'ha observat que la cúpula geodèsica V3, consta de un patró de triangles que es repeteix simètricament 5 vegades per conformar-la. Aquest patró, ve dividit a partir del pentàgon superior de la geodèsica. . A partir d'aquesta figura, l'envolten 5 hexàgons i així fins a conformar la cúpula. Per aquesta raó es podria dir que la cúpula segueix un patró de base pentagonal.

S'ha creat un vector de direcció del vent. Aquest vent, anirà paral·lel al terreny o base (empentes horitzontals), ja que es considera en factor més desfavorable. S'ha dividit la cúpula i s'ha escollit una orientació en planta sobre la cúpula, en aquest cas, paral·lel a un meridià de la cúpula.



Font pròpia: Divisió de 5 quadrants simètrics (es pot anomenar cúpula pentagonal).

Cada quadrant conté 21 plans diferents (en forma de triangles equilàters en pentàgons) i isòsceles (en hexàgons i ½ hexàgons) i 12 nusos diferents més 1 del centre del pentàgon superior, que es comparteix amb tots els quadrants.



Planta QUADRANT BASE 01. Números en blau: plans. Lletres amb negre: nusos

Com s'ha esmentat, cada pentàgon, hexàgon i ½ hexàgon estan conformats per triangles. Aquests triangles, aplicant una coberta, per exemple una lona de PVC, acaben creant plans triangulars sobre l'estructura de fusta de la cúpula que impedeixen que l'acció del vent s'escoli dins d'aquesta fent de barrera. És precisament a cadascun d'aquests plans, conformant una coberta, on el vent hi incideix en major o menor mesura segons sigui la seva situació. Cada triangle està exposat doncs, en major o menor mesura que la resta. No hi ha cap pla que li recaigui la mateixa quantitat d'acció de vent que un altre.

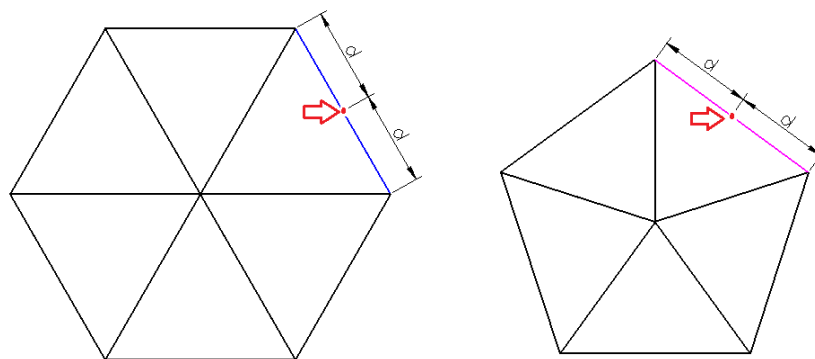
S'ha treballat amb energia per poder trobar una forma de parametritzar al màxim la incidència del factor vent a aquest model, i a més, pensant en poder extrapolar-ho a altres cúpules de diàmetres, i fins hi tot freqüències, diferents.

El programa de càlcul admet la càrrega a partir d'accions repartides a tota la superfície de cada pla per igual, en direcció perpendicular a aquest. Aquestes accions perpendiculars al pla, venen precedides per la orientació del propi pla (més exposat o menys al factor vent). És a dir, és necessari entrar les coordenades de les ubicacions dels plans, perquè automàticament el programa sabrà atorgar les càrregues en la perpendicularitat d'aquest pla. Aquesta perpendicularitat però, es resol trigonòmicament per obtenir, finalment la càrrega. Aquestes càrregues són les que s'acaben descomposant en dos angles:

Angle Alpha: descomposa la perpendicular del pla triangular respecte el sentit del vent en la verticalitat d'aquest.

Angle Beta: descomposa la perpendicular del pla triangular segons el grau d'exposició del vent en relació a la horitzontalitat del sentit d'aquest.

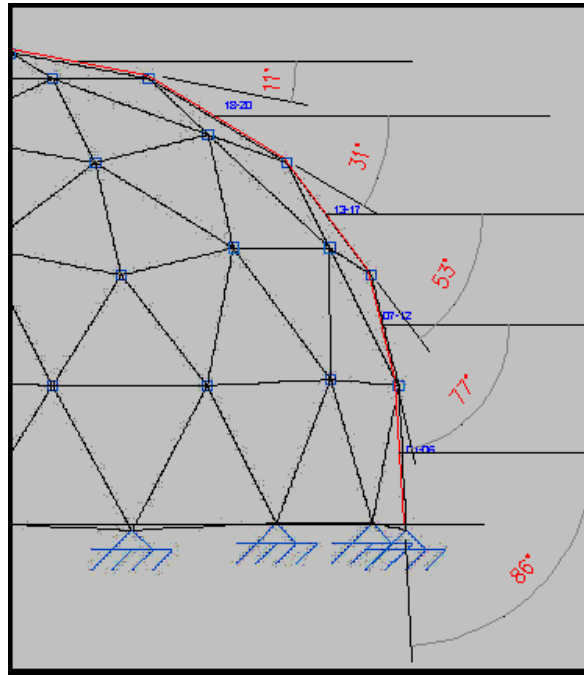
Com que no tenim definit els centres de cada pla triangular en el model 3D, es pren com a referència la barra base del triangle isòsceles per a cada figura. Altrament dit, es referència la barra del perímetre de cada figura per atorgar la ubicació des d'on descomposar el vector perpendicular al pla i descobrint Alpha i Beta respecte la direcció del vent.



Punt de l'aresta on es mesurarà l'angle Alpha i Beta, respecte cadascun dels seus plans.

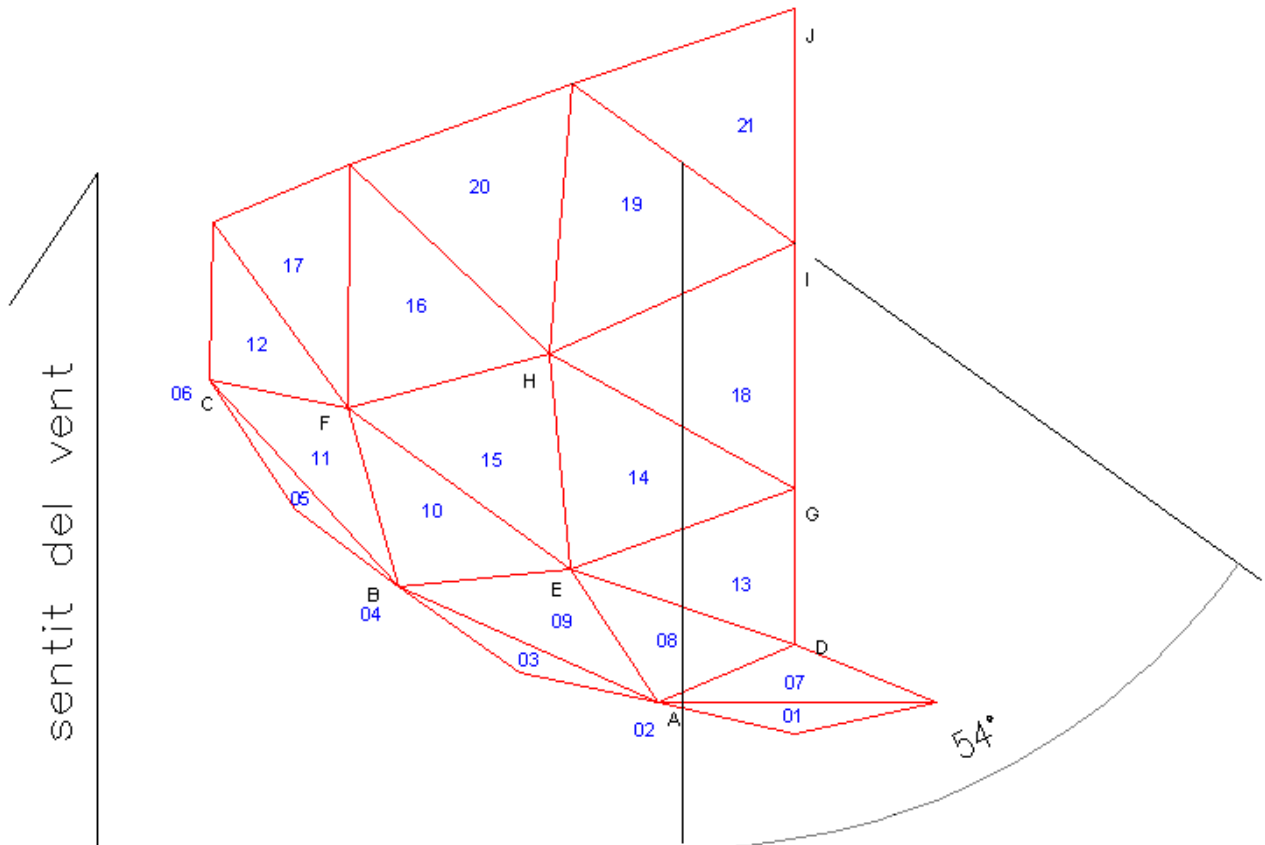
Aquest procés és totalment "manual", buscant cada barra base del triangle isòsceles els dos angles respecte una direcció del vent que s'ha determinat prèviament.

Per realitzar aquesta tasca en Alpha, es col·loca el perfil de la cúpula en alçat. S'acota l'angle entre la horitzontal del sentit del vent i la inclinació de la barra. Observem que com més inclinat el pla, o barra, menys incidència tindrà el vent sobre aquesta.



Parametrització d'angles Alpha. Angle vertical entre el pla i la direcció del vent

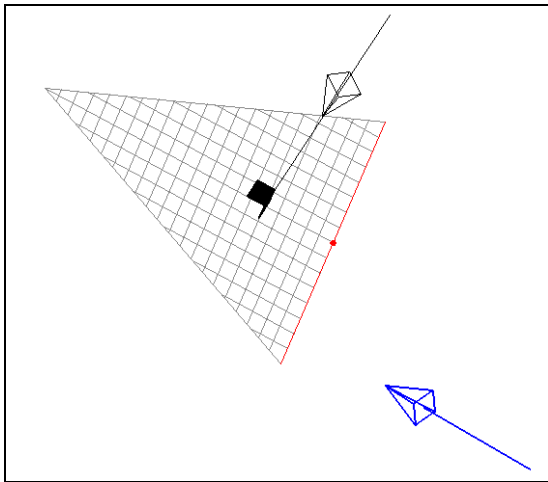
Per cercar l'angle Beta de cada barra, es col·loca el model en planta i es realitza el mateix procediment, partint del punt centre de la barra base de cada triangle isòscels, amb la línia directora del vent.



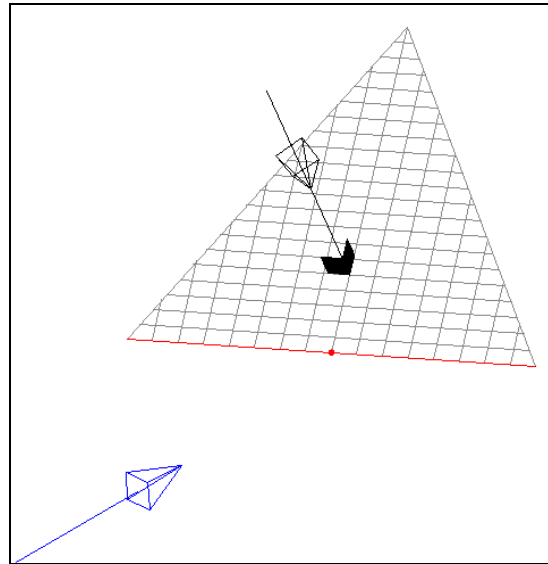
Parametrització d'angles Beta. Angle horitzontal entre el pla i la direcció del vent.

En el gràfic anterior, es mostra un exemple de com es prendran els angles Beta dels plans 18 i 21, triangles dels quals comparteixen la mateixa base.

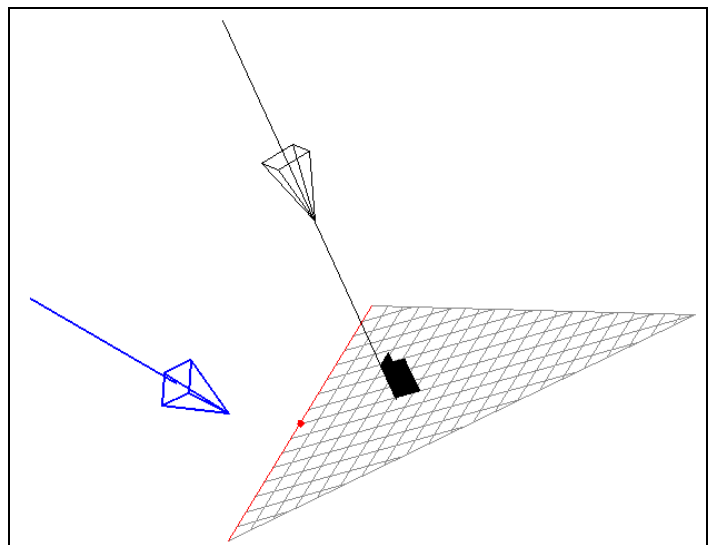
Gràfics explicatius de un model de pla triangular exemple.:



Perspectiva 1



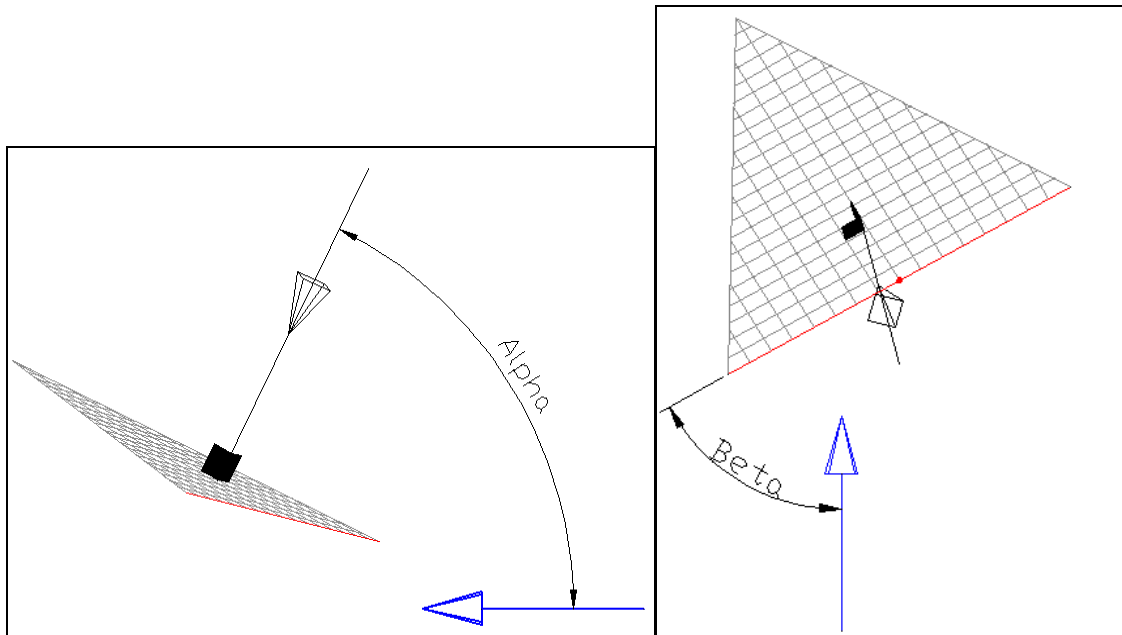
Perspectiva 2



Perspectiva 3

- On:
- En blau: Sentit de direcció del vent
 - En negre: Sentit del vector perpendicular al pla
 - En vermell: Línia de referència per a extreure Alpha i Beta.

ESTUDI PARAMÈTRIC DE CÚPULES CONSTRUÏDES AMB ESTRUCTURA DE FUSTA



Extracció de l'angle Alpha i Beta en relació a la verticalitat i l'horitzontalitat de la direcció del vent.

Resum de càrregues extrems del vent del Quadrant 1, també anomenat Quadrant base:

QUADRANT 01	ALPHA	BETA (base)	CÀRREGA	
1	86	90	83,80	kg/m2
2	86	79	82,26	kg/m2
3	86	67	77,13	kg/m2
4	86	55	68,64	kg/m2
5	86	44	58,21	kg/m2
6	86	31	43,16	kg/m2
7	77	90	81,85	kg/m2
8	77	79	80,34	kg/m2
9	77	67	75,34	kg/m2
10	77	55	67,05	kg/m2
11	77	44	56,86	kg/m2
12	77	31	42,15	kg/m2
13	53	79	65,85	kg/m2
14	53	73	64,15	kg/m2
15	53	55	54,95	kg/m2
16	53	36	39,43	kg/m2
17	53	31	34,55	kg/m2
18	31	73	41,37	kg/m2
19	31	54	35,00	kg/m2
20	31	36	25,43	kg/m2
21	11	54	12,97	kg/m2

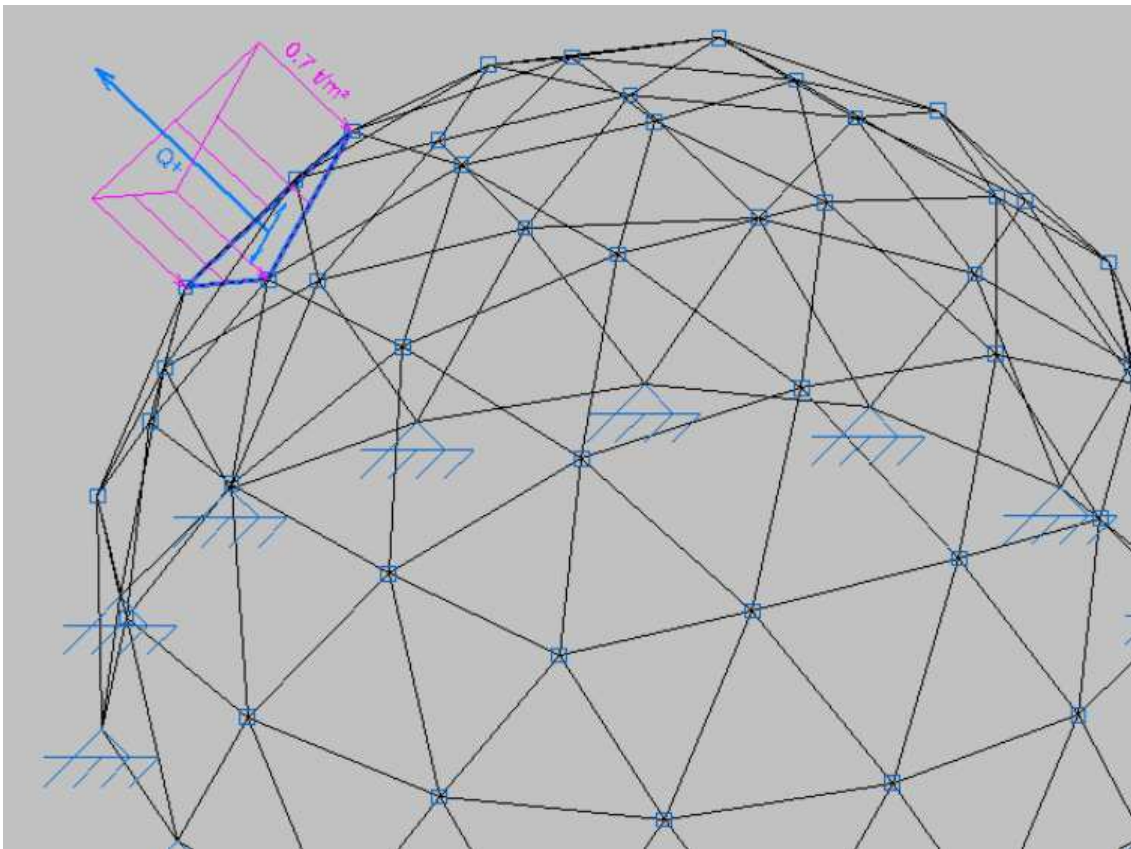
Parametrització del primer quadrant

La càrrega en pressió o succió del vent ($Q_p = 84 \text{ kg/m}^2$ o $Q_s = -48 \text{ kg/m}^2$), s'aplicarà al pla, establert amb els angles Alpha i Beta. El sentit d'aquesta acció té relació entre la incidència del vent al pla, i la situació del pla en relació a la situació dins la cúpula.

La fórmula que representa aquesta càrrega és la següent:

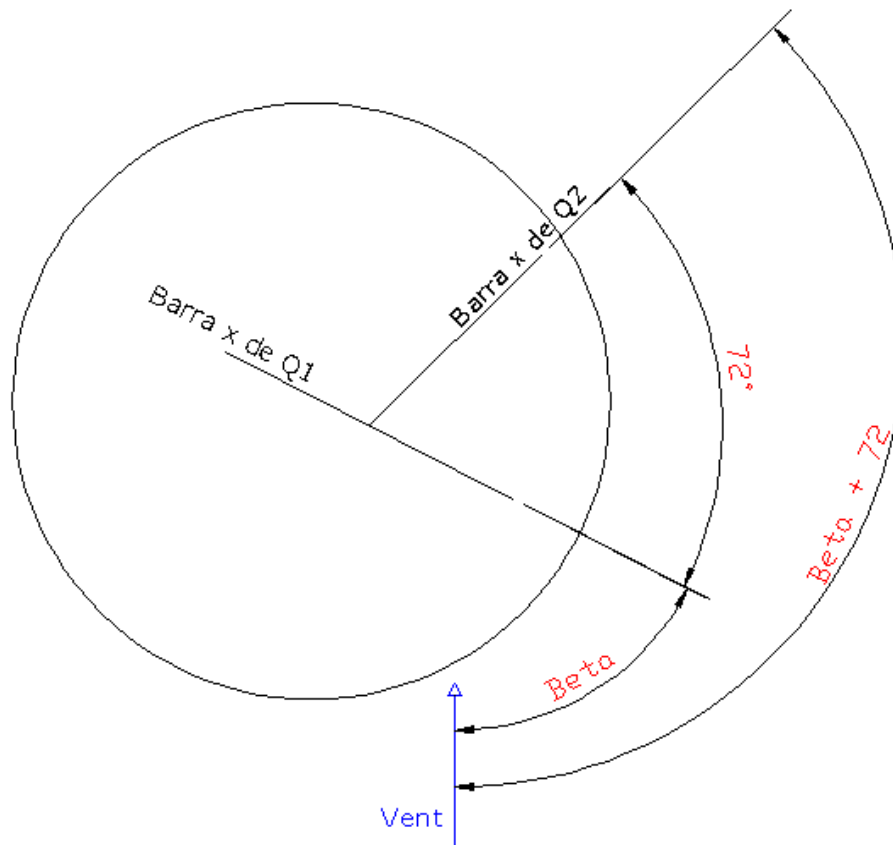
$$Q_t(\text{superfície,pla})=Q*(\text{SIN}(\text{BETA})+\text{SIN}(\text{ALPHA}))$$

Si el resultat surt positiu, s'aplica la càrrega Q_p (pressió). Si el resultat surt negatiu, s'aplica la càrrega Q_s (succió).



Exemple d'aplicació de càrregues de vent. Q_+ és la direcció del vector representatiu de la pressió del vent per aquest cas.

S'utilitza un angle de 72° de gir en angle Beta entre el primer quadrant (quadrant base) i la resta de quadrants. És una translació dels plans però mantenint la referència de la direcció del vent.



Translació de barra "x" del primer Quadrant (Q1) al segon quadrant (Q2).

Aquest fet es basa en què la cúpula la distingim de base pentagonal, per aconseguir col·locar el quadrant al seu lloc establert segons el gràfic mostrat anteriorment: "Divisió de 5 quadrants simètrics". Es parteix de la base 180° en els Quadrants 2 i 4 perquè l'angle de la operació resultant sigui amb signe de valor absolut i pugui ser operat.

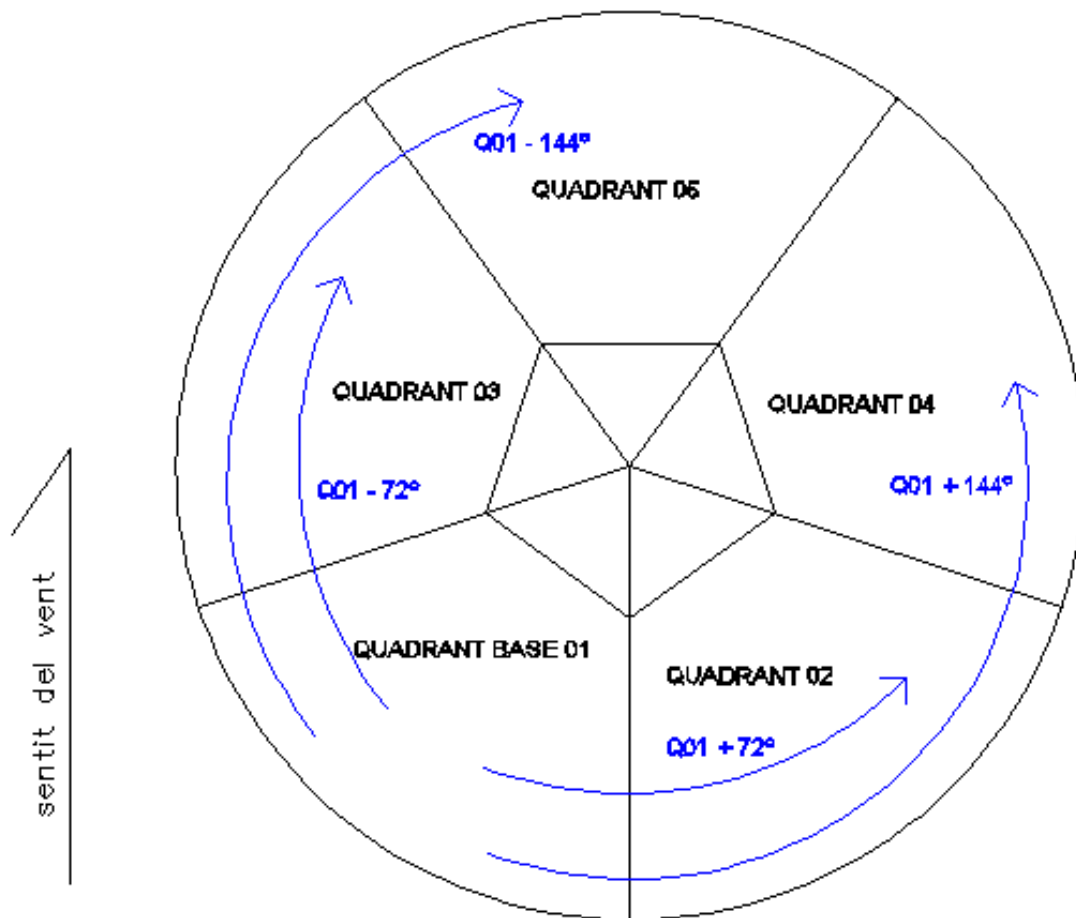
Quadrant 1: Base

Quadrant 2: $180 - \text{Base} + 72^\circ$

Quadrant 3: $\text{Base} - 72^\circ$

Quadrant 4: $180^\circ - \text{Base} + 144^\circ$

Quadrant 5: $\text{Base} - 144^\circ$



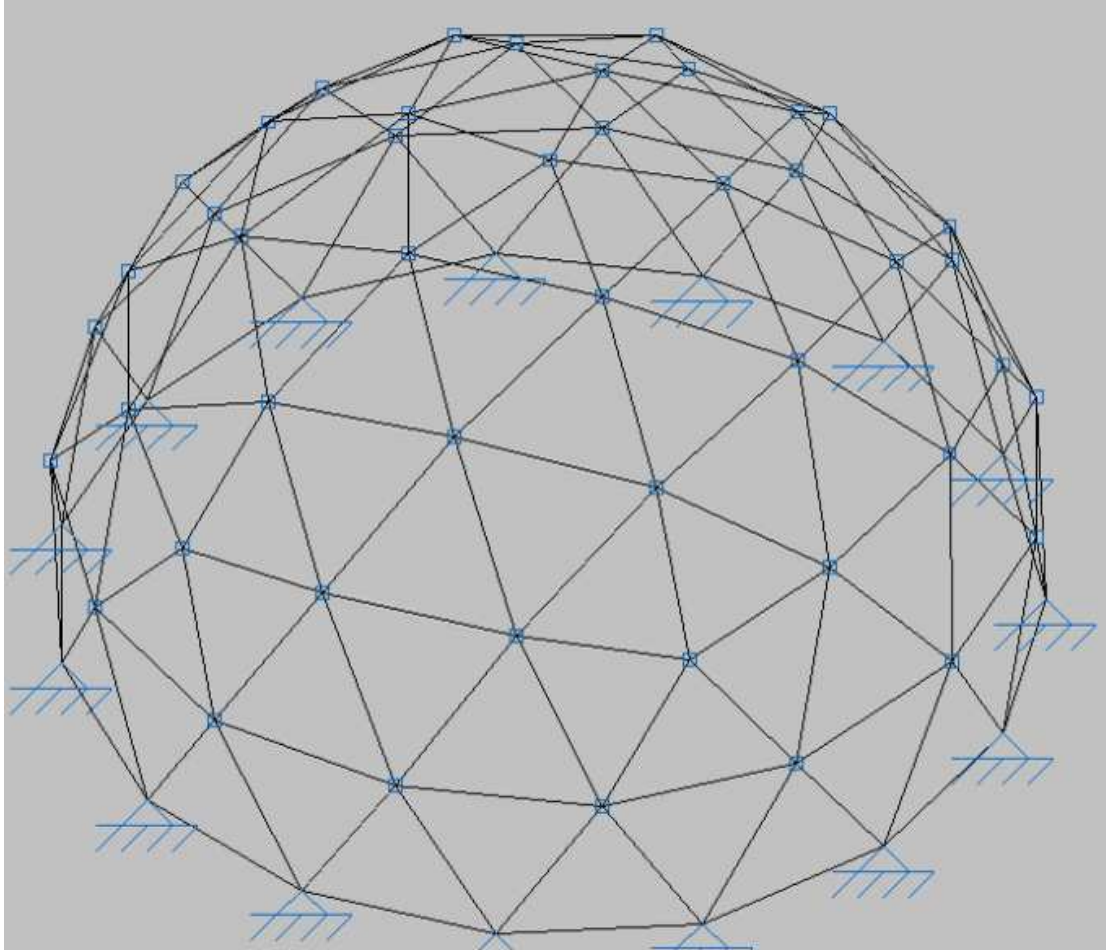
Mètode de parametrització dels quadrants

A l'**Annex 1** s'adjunten les taules del càlcul de forces de tots els quadrants amb els 21 plans de cada quadrant.

Tots els gràfics d'aquest apartat: Font pròpia.

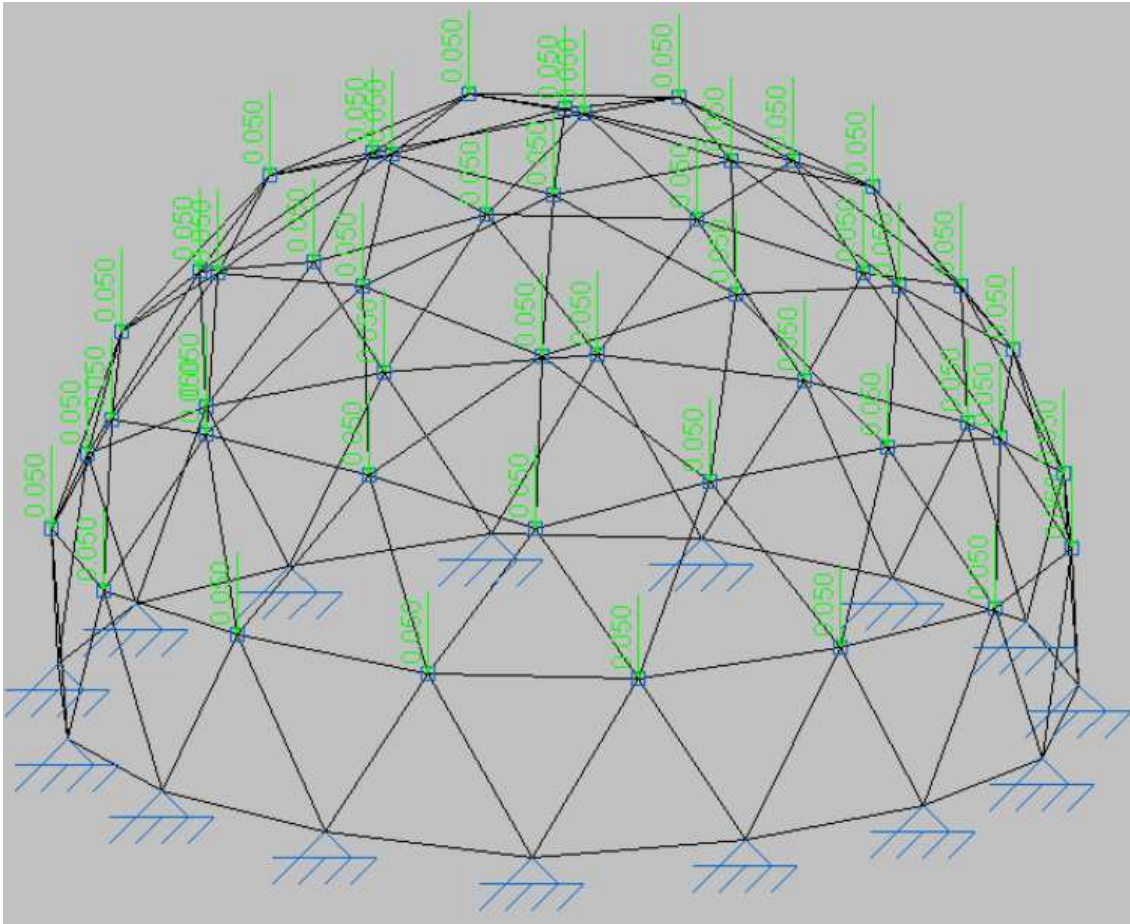
6.6. INTRODUCCIÓ DE CÀRREGUES AL MODEL

S'ha entrat el model dissenyat al programa estructural "Metal 3D". S'han identificat els nusos i els suports de la base.



Model al programa de càlcul

En el següent gràfic es mostra com s'apliquen les accions gravitatòries d'ús a cada nus.



Aplicació de càrregues d'ús als nusos

S'ha considerat l'ús de 50 kg. Ja que aquest, és de muntatge o bé de manteniment de la coberta, la qual cosa, els 100 kg. designats per aquesta acció, s'ha pres com a criteri que una persona sempre reparteix la càrrega amb dos punts. A més, la cúpula contempla els 50 kg. a tots els nusos, quan realment, significaria tenir moltes persones sobre la cúpula al mateix moment.

A banda de l'ús, també s'introdueix la força gravitatòria del pes de la coberta (calculat a l'apartat 6.3).

Per introduir les càrregues del vent, com s'ha esmentat anteriorment, es parteix de l'acció perpendicular al pla respecte la direcció del vent. El programa, s'encarrega de distribuir les càrregues d'aquest valor (kg/m²) a les tres barres perimetrals del pla triangular. En aquest cas no es mostra el gràfic general ja que és de difícil lectura al tenir un garbuix de línies, entre vectors i càrregues que es solapen gràficament.

El programa també s'encarrega de distribuir el pes propi de les barres als nusos.

7. ANÀLISI DE RESULTATS

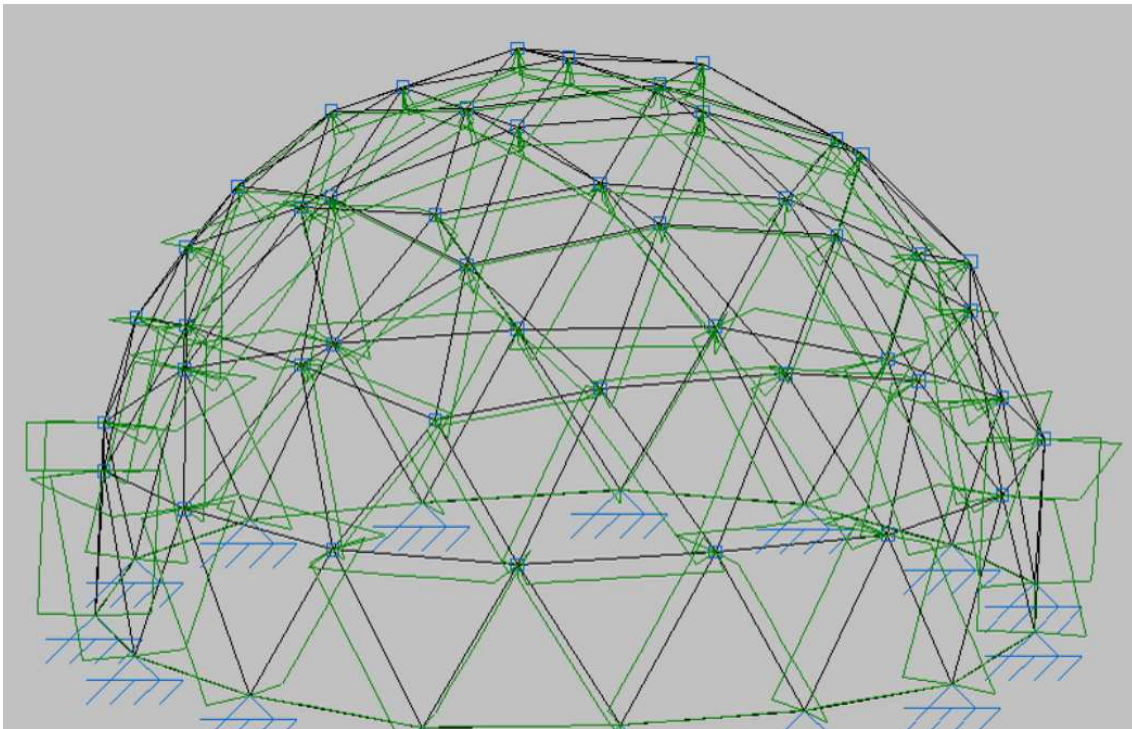
7.1. RESULTATS

7.1.1. Anàlisi de resultats teòrics

Els primers resultats ens demostren el que la teoria predeia en cadascun dels gràfics que s'han anat recopilant.

A la teoria es mostrava, apartat "4.4 Estabilitat estructural", com els meridians (barres iso estàtiques) eren les encarregades de suportar unes empentes que, en casos de descàrrega de forces homogènia, patien una deformació més gran.

En el gràfic d'axials següents, es demostra gràficament la teoria citada anteriorment. Les barres majoritàriament de la part superior, treball a compressió (el gràfic tendeix a entrar a la cúpula). A la cintura de la part inferior en canvi, les barres treballen a tracció.



Direcció de les càrregues axials.

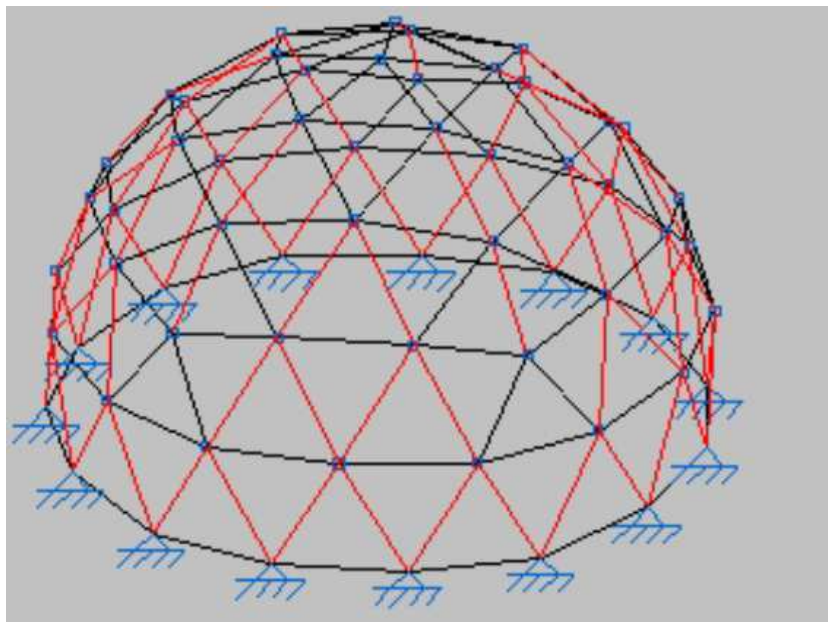
És veritat però, que algunes treballen al revers del que es creu que ho haurien de fer. Aquest fet és degut a un mal direccionalment de la barra alhora d'introduir aquesta al model, errant 180°.

7.1.2. Anàlisi resultat cas fictici

Per comprendre bé el funcionament estructural de les barres, és convenient portar al límit, o fins hi tot a valors que resultin de trencament de les barres tot el conjunt. Aquesta teoria és molt pràctica per entendre visualment el conjunt del model.

Per aquest motiu, es va escollir una classe resistent inferior a la fusta que li assignem el càlcul d'aquest estudi. El material que es treballa en aquest projecte és el Douglas, categoria C22. En canvi en el model que es mostrarà a continuació, s'ha escollit una categoria de fusta C18, i de secció més petita que la d'estudi, una secció de 30x80 mm, vers els 40x80 que se li atorgarà en el càlcul real.

En el següent gràfic es mostren en vermell les barres que no suporten les càrregues que se li apliquen i per tant, són les que s'haurien de prendre especial atenció.



Observació de barres. Secció 30 x 80 mm.

Les barres en vermell, no són aptes per a la càrrega aplicada. Majoritàriament, són les barres més verticals, les que representarien els meridians, les que pateixen un major esforç que les barres horitzontals, formació de paral·lels.

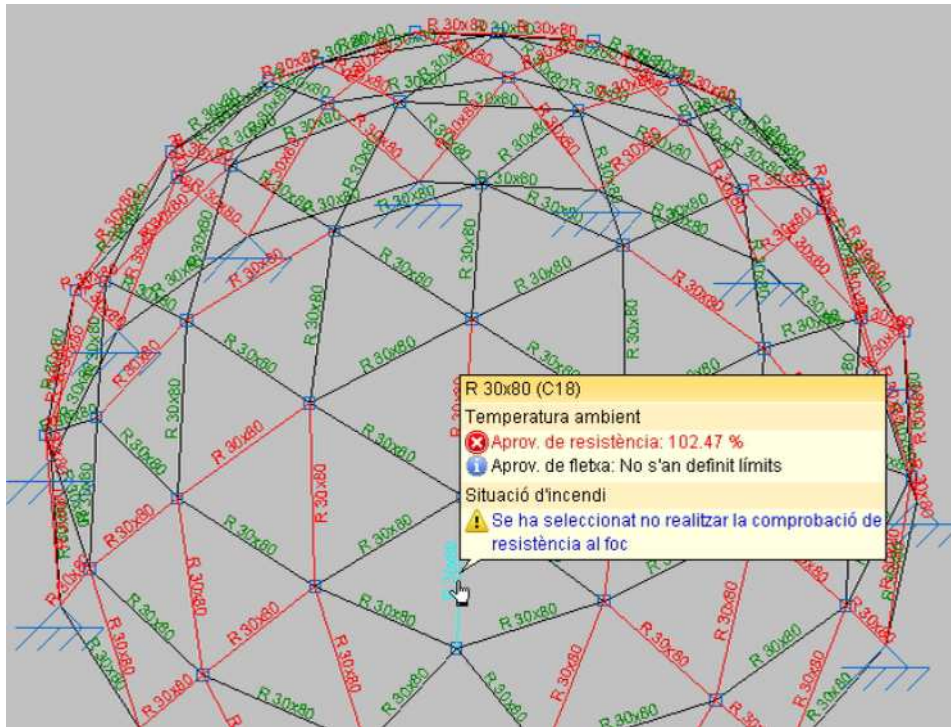
Els gràfics que es mostren a continuació, extrets del programa de càlcul, indica, seleccionant cada barra del model, quin tant per cent ha sobrepassat el seu límit d'absorció de càrrega. O altrament dit, a quin tant per cent està rendint.

Vídeo dinàmic per mostrar els següents quatre gràfics junts:

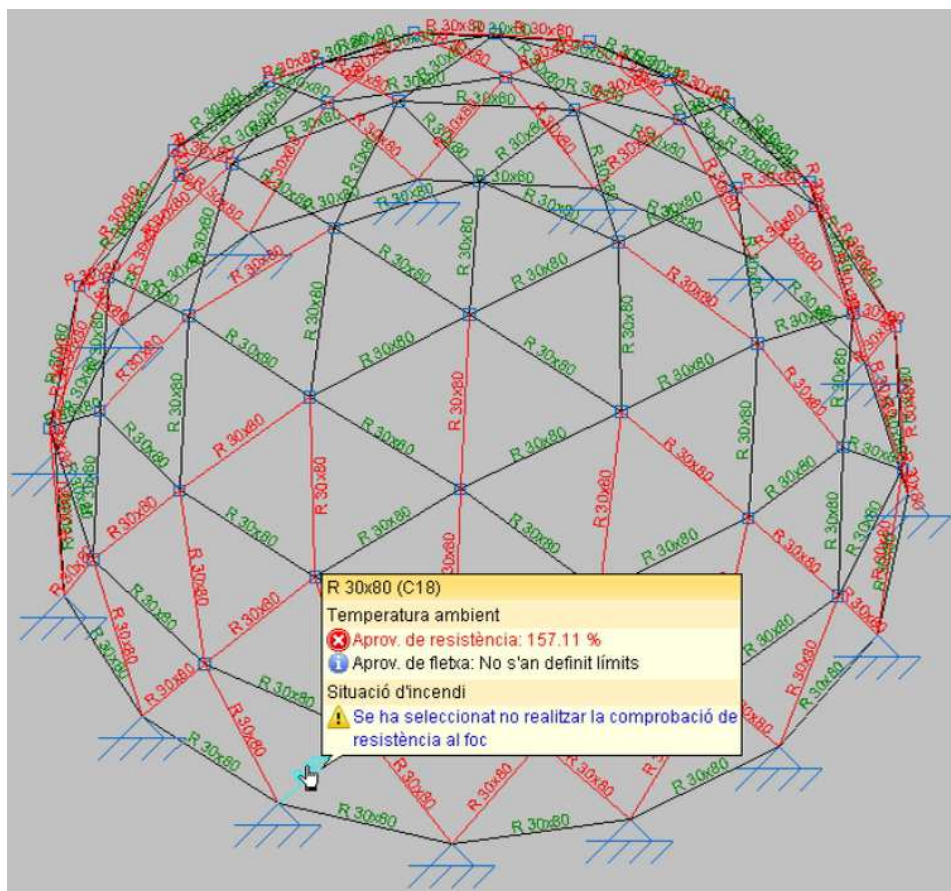
Marc Subirós Viñolas (any 2016), canal de youtube pròpi.

https://www.youtube.com/watch?v=TERRH_nTCJA

ESTUDI PARAMÈTRIC DE CÚPULES CONSTRUÏDES AMB ESTRUCTURA DE FUSTA



Aprofitament resistència (exemple 1, teòric sota límit)



Aprofitament resistència (exemple 2, teòric sota límit)

Com es pot comprovar, s'ha de prendre especial atenció a les barres amb tendència vertical i amb èmfasi a la base, encarregades de transmetre les càrregues derivades de les barres superiors.

7.1.3. Anàlisi de resultats cas real

Es parteix de la secció de barra 40x80 mm. ja que es referència de la construcció d'aquest model per l'empresa Esfèric. Aquesta, havia escollit la secció a ull, sense comprovació estructural sòlid. Ara doncs, s'ha pogut comprovar la viabilitat d'aquest model, amb les característiques del material que li correspon.

A l'**Annex 2** es localitzen els resultats i comprovacions del càlcul estructural descrites a l'apartat 6.4. JUSTIFICACIÓ DE NORMATIVA.

a) Major resistència

Cal esmentar un apunt important que li atorga major resistència al càlcul de les barres i al model en global. Com s'ha esmentat a l'apartat descripció geomètrica, les figures que conformen el model (hexàgons, pentàgons i $\frac{1}{2}$ hexàgons) aniran units entre ells mitjançant 2 cargols per barra. Aquest fet, doble la secció de càrrega, tot hi que al no està estretament lligada, poden patir un mínim de deformació a vinclament. Mínim perquè els dos cargols estan separat una distància aproximada de 70 cm. entre ells i centrats per l'eix de gravetat de la barra.

b) Resultats barra 40x80 mm.

Deformacions a les barres:

En el següents gràfics es mostren com totes les barres resisteixen amb claredat els esforços estructurals que li han estat sotmesos a l'apartat 6.3. ACCIONS.

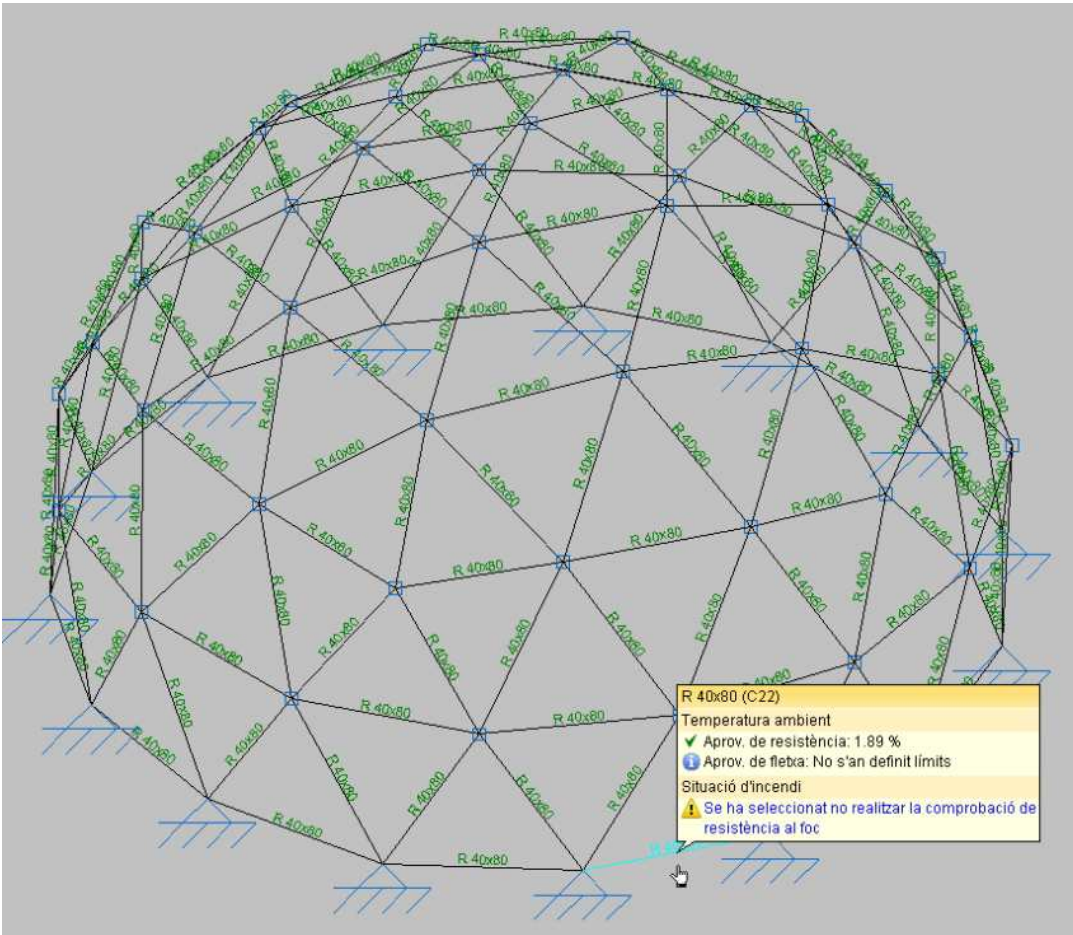
En els requadres de cada gràfic es pot observar la resistència al qual està treballant la barra seleccionada en càrrega màxima.

A continuació, quatre imatges (extretes de vídeos) per mostrar el treball de les barres des de la base a la part superior de la cúpula geodèsica de fusta.

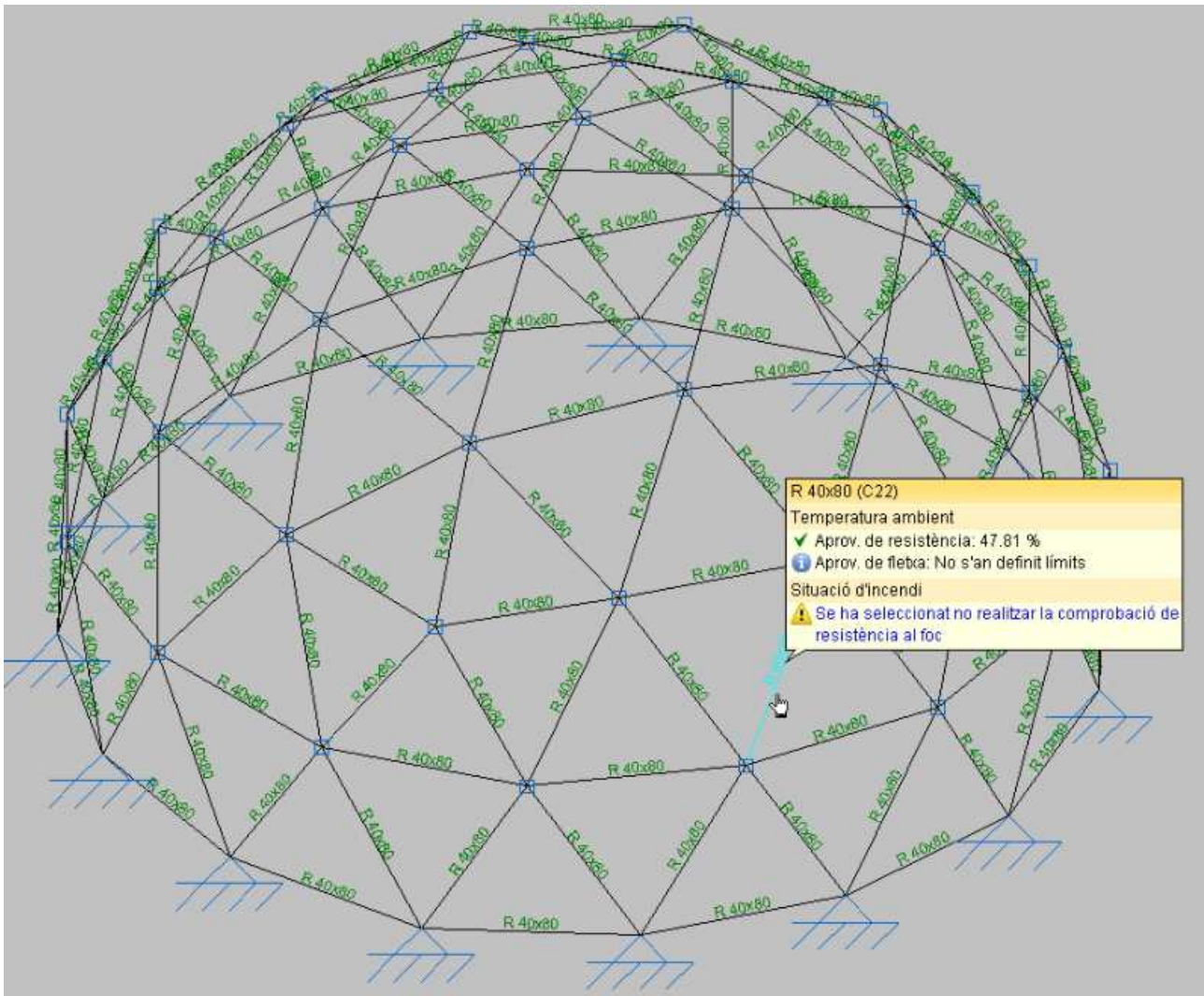
Vídeo dinàmic per mostrar els següents quatre gràfics junts:

Marc Subirós Viñolas (any 2016), canal de youtube pròpi. <https://www.youtube.com/watch?v=v8K1DtlunDs>

ESTUDI PARAMÈTRIC DE CÚPULES CONSTRUÏDES AMB ESTRUCTURA DE FUSTA

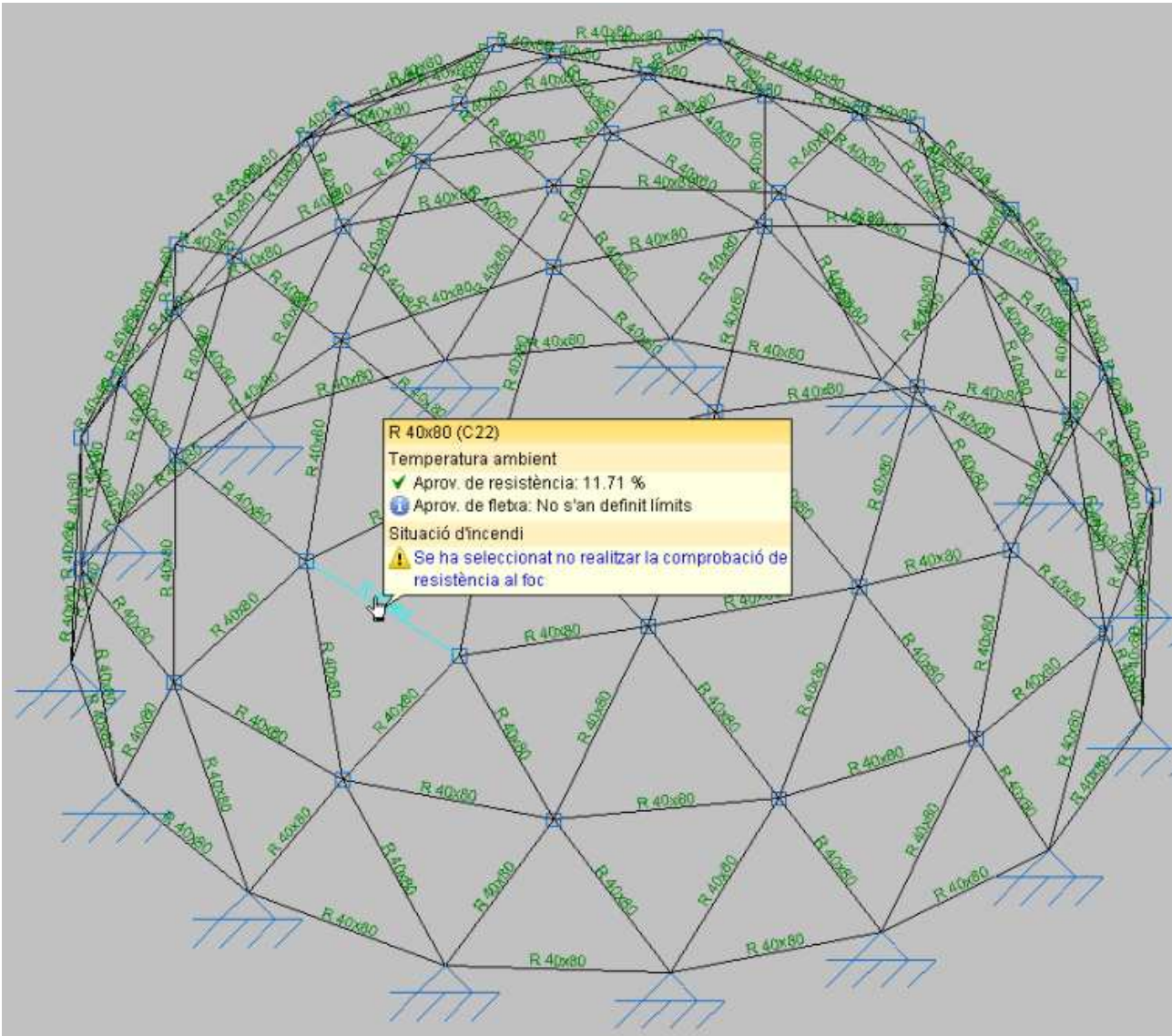


Aprofitament de resistència barra horitzontal de base



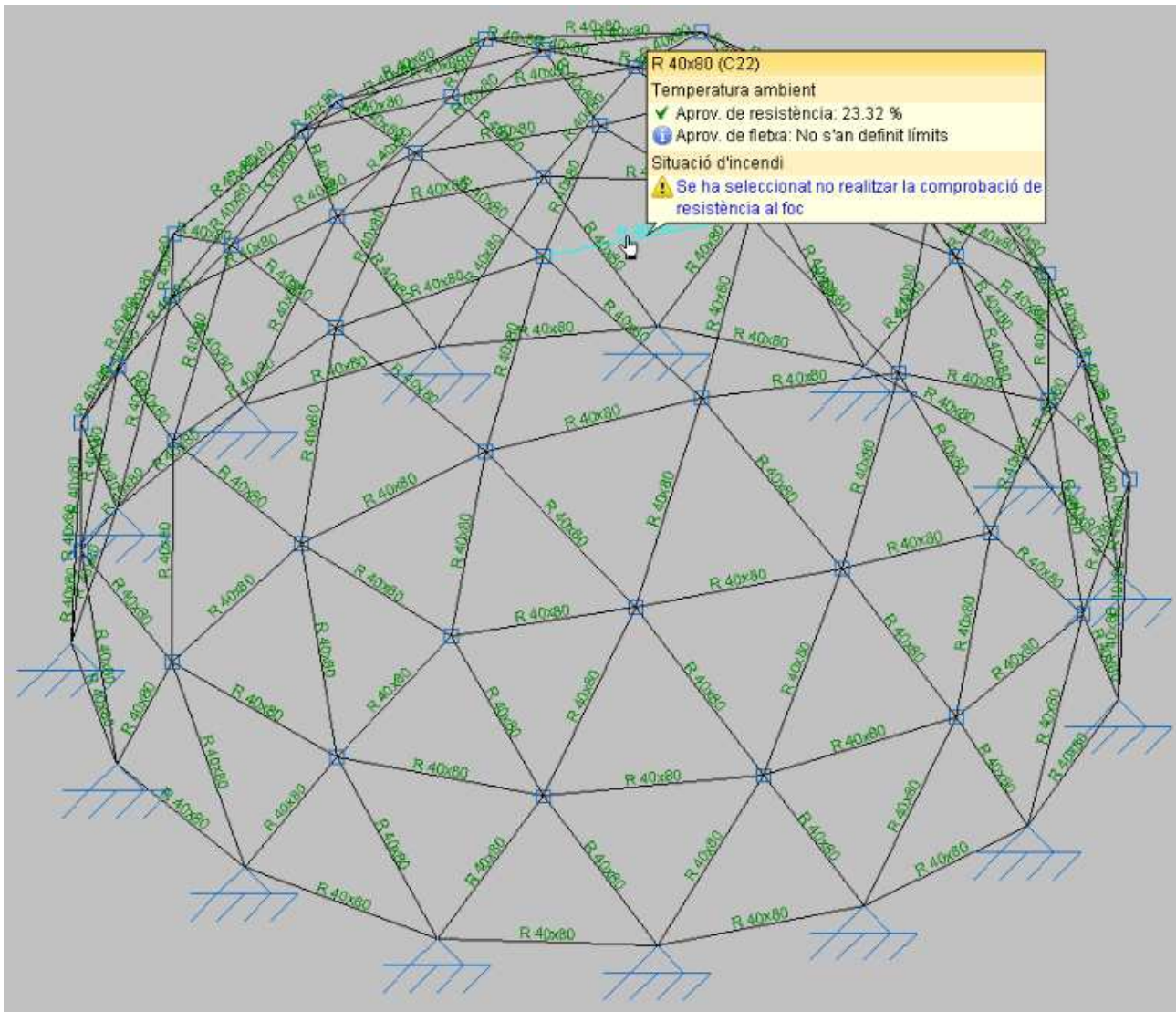
Aprofitament de resistència barra vertical central

ESTUDI PARAMÈTRIC DE CÚPULES CONSTRUÏDES AMB ESTRUCTURA DE FUSTA



Aprofitament de resistència barra horizontal central

ESTUDI PARAMÈTRIC DE CÚPULES CONSTRUÏDES AMB ESTRUCTURA DE FUSTA



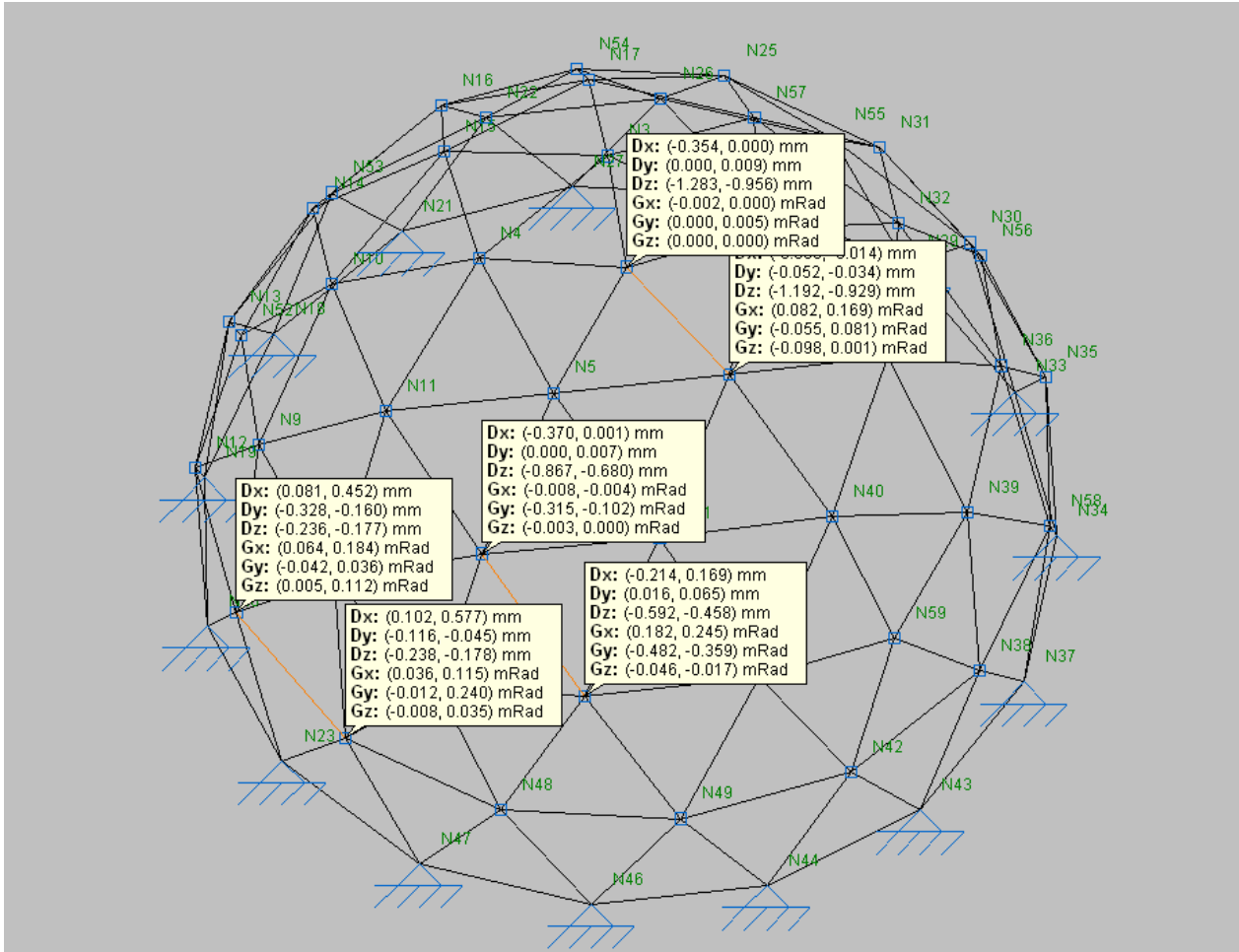
Aprofitament de resistència barra horizontal part superior

<https://www.youtube.com/watch?v=v8K1DtlunDs>

Deformacions als nusos:

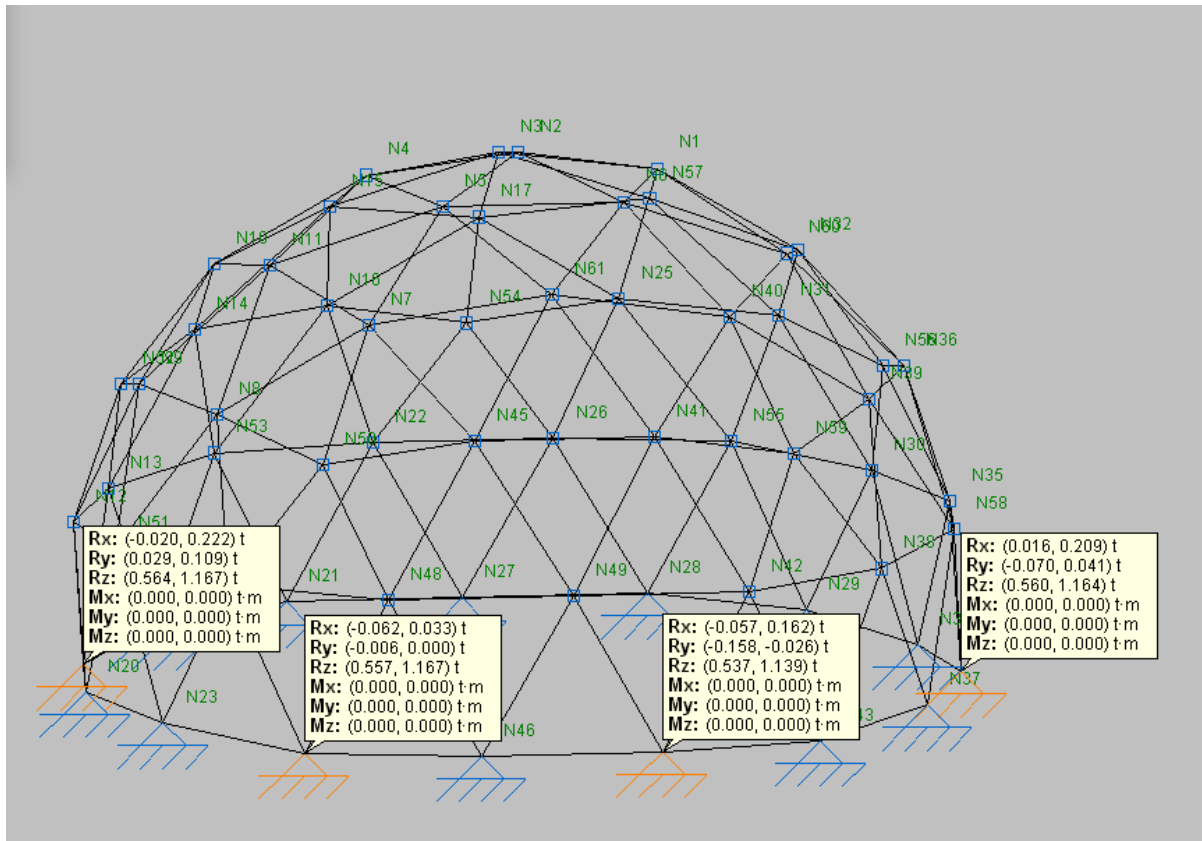
Les deformacions als nusos també tenen una lectura visual des del propi software. Aquests, ens mostren entre quins valors tenen tendència a desplaçar-se els nusos.

I Quan els nusos estan alineats a la base, també ens mostra les seves reaccions. Aquestes ens determinen la fonamentació a projectar.



Deformacions als nusos

ESTUDI PARAMÈTRIC DE CÚPULES CONSTRUÏDES AMB ESTRUCTURA DE FUSTA

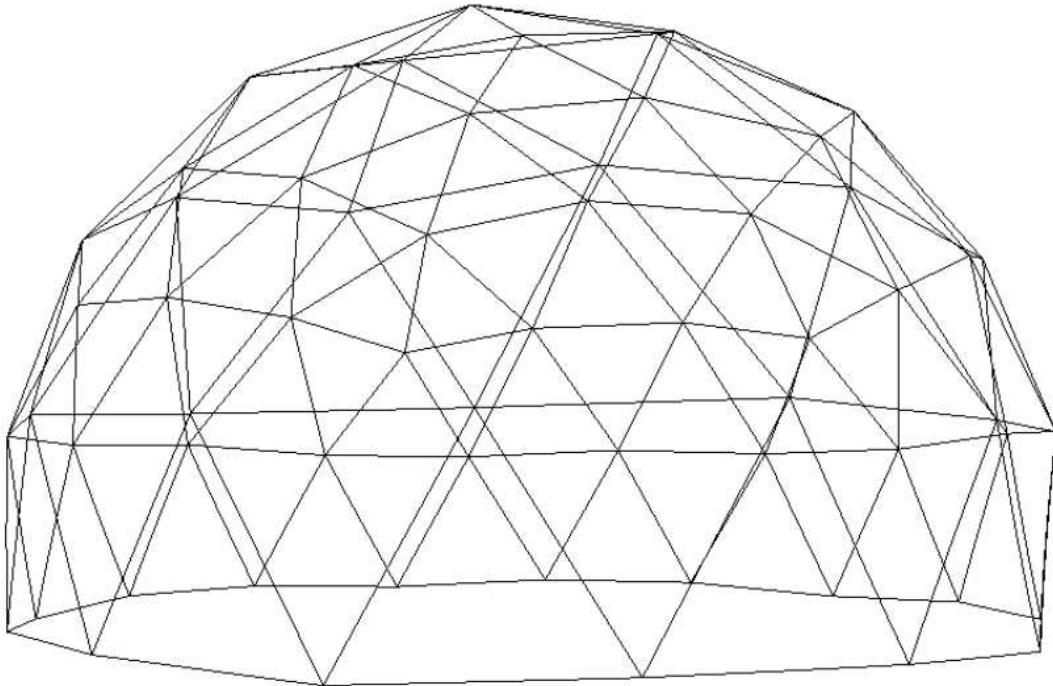


Reaccions a la base

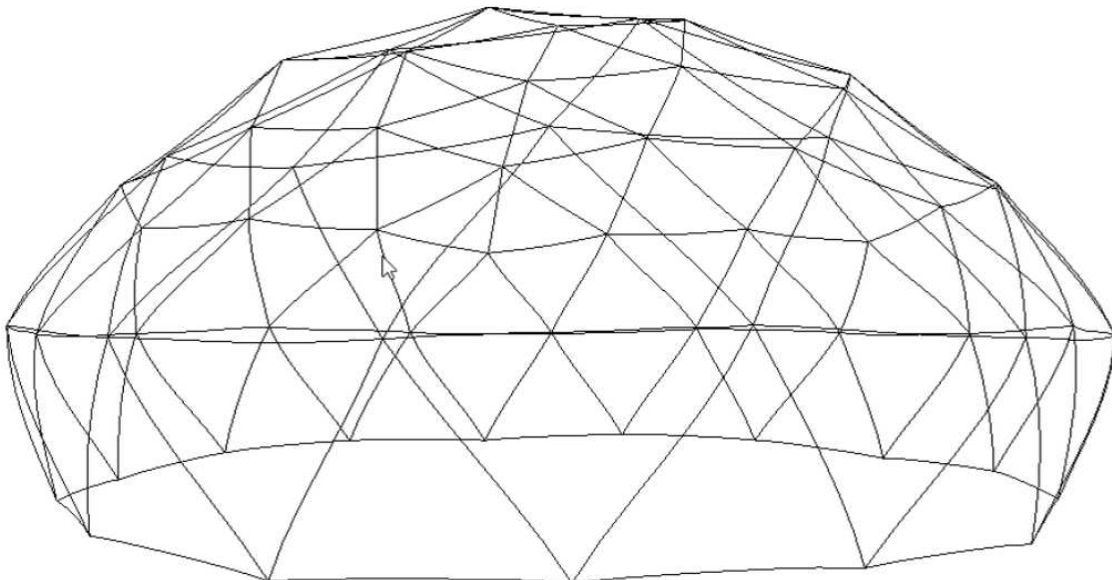
Tots els gràfics d'aquest apartat: Font pròpia. Cessió despatx estructural. Sorgit del programa Metal 3D.

7.2. REPRODUCCIONS VISUALS

Amb els gràfics que es mostren a continuació (extrets de vídeos), hom es pot fer una idea del comportament de l'estructura de manera molt visual. Aquestes, estan augmentades a la realitat 500 vegades.

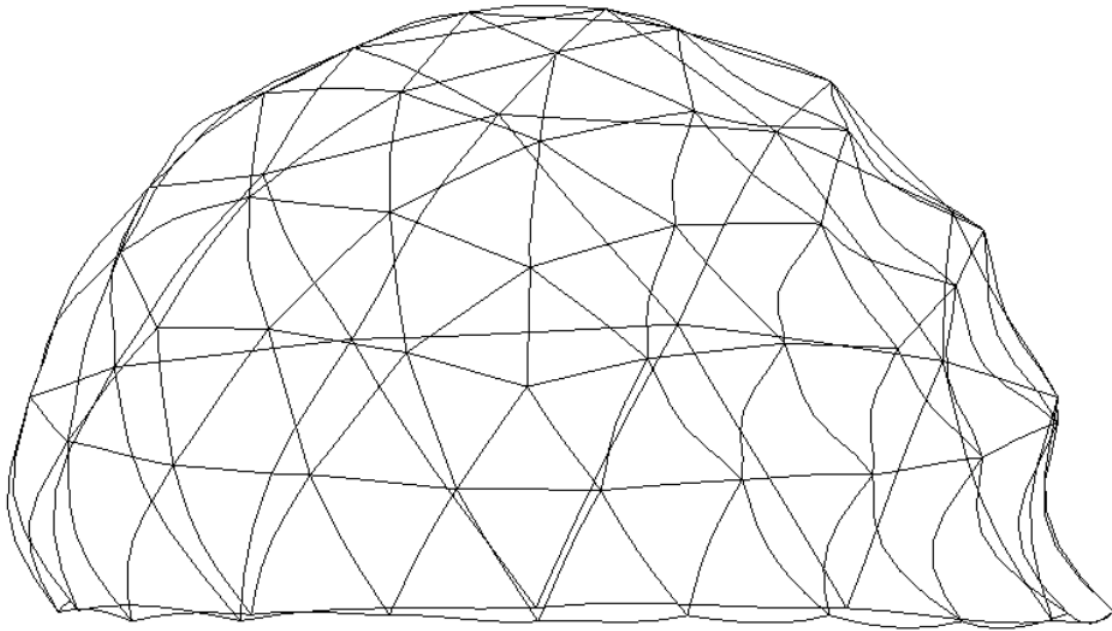


Model sense aplicació de càrregues.



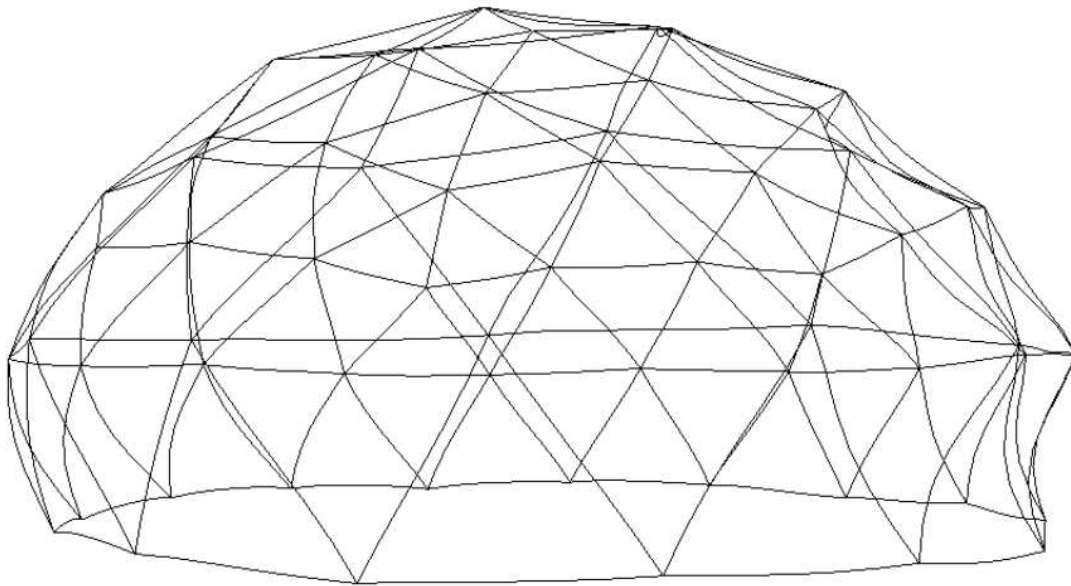
Deformada de càrregues permanents (gravitatòries).

<https://www.youtube.com/watch?v=21KSO2HWW1E>



Deformada càrregues vent (direcció del vent de dreta a esquerra).

<https://www.youtube.com/watch?v=L7OGy3thFkg>



Deformada càrregues combinades vent i permanents (direcció del vent de dreta a esquerra).

<https://www.youtube.com/watch?v=menNvVqF38o>

*Tots els gràfics d'aquest apartat: Font pròpia. Cessió despatx estructural. Sorgit del programa Metal 3D.

**Tots els vídeos: Marc Subirós Viñolas (any 2016), canal de youtube propi.

8. CONCLUSIONS FINALS I PROPOSTA DE FUTURS DESENVOLUPAMENTS

8.1. CONCLUSIONS FINALS

a) El disseny d'un cos o model geomètric el podem definir com a laboriós. La intenció, a partir de crear tota la cúpula per mitjà només de les dimensions radi i d'una distància (barra perimetral de les figures), ha resolt el problema de definicions de vèrtex, concretant amb exactitud cada barra sense localitzar solapaments ni errors dimensionals causats per la suma de decimals omesos de les distàncies de cada barra.

b) Les comprovacions estructurals de normativa ha permès saber que la cúpula geodèsica a estudi, amb secció de barres 40x80mm. i fusta d'avet Douglas, resisteix en factors màxim desfavorables a la província de Girona (exceptuant comarques de Puigcerdà, Ripollès i zones altes de la Garrotxa. Per aquest motiu es creu que seria factible la seva certificació de solidesa, amb estudi previ de la seva fonamentació.

La secció escollida és òptima, ja que es podria ajustar a dimensions més petites, però es creu que no variaria significativament, ja que s'ha visualitzat el comportament d'una secció de 30x80mm. Classe 18, la qual és lleugerament inferior a la secció i categoria a estudi i té comportaments no vàlids, però de molta igualtat.

c) Focalitzar una parametrització de les càrregues de la cúpula per aplicar el factor vent, ha estat el major avanç que s'ha contemplat en aquest treball.

En primer lloc, poder agrupar els plans en quadrants facilita la tasca de comptabilitzar els 105 plans (en aquest model concret).

També agilitza el provés el fet de poder agrupar els diferents angles, anomenats Alpha i Beta, per descomposar la força del vent que podem aplicar.

La importància dels dos punts anteriors, recau en què es pot traslladar el mateix sistema de parametrització en cúpules d'altres dimensions, d'altres freqüències, d'altres graus d'esfericitat, i els tres aspectes anteriors a la vegada. Simplement, en alguns casos s'haurien de localitzar més o menys valors, però respectant el procediment establert a l'apartat "6.4. Parametrització d'accions".

d) L'estudi d'aquest treball, també ha estat de gran interès per saber la procedència i els inicis d'aquest model d'estructura, que l'autor d'aquest projecte fins ara desconeixia.

8.2. PROPOSTES DE FUTURS DESNVOLUPAMENTS

a) Desenvolupament d'un programa per definir geometries.

Aquest programa intentaria crear, amb agilitat i amb la introducció de pocs paràmetres bàsics, la geometria de cúpules geodèsiques. Podria tenir una íntima relació amb la possibilitat de materialitzar aquest programa de disseny amb l'apartat b)

b) Desenvolupament d'un programa de càlcul específic.

El programa específic per el càlcul estructural de cúpules geodèsiques seria de gran utilitat per poder introduir i modificar tots els paràmetres estructurals característics del material i de límits de normativa. Podria ser la parella perfecte del programa definit a l'apartat a).

c) Parametrització del càlcul estructural de la cúpula geodèsica de fusta amb obertures.

En el projecte que s'ha desenvolupat, s'ha contemplat una cúpula tancada en forma de mitja esfera. Es planteja doncs, en aquest apartat, estudiar la possible parametrització i càlcul d'una cúpula que disposi d'obertures a la seva façana/coberta. Ja siguin obertures de pas, ventilació, etc. O la creació de cúpules obertes tipus orbit o amb múltiples obertures grans.

d) Creació del model a partir només el Radi de l'esfera.

La idea sorgeix de crear la cúpula amb el mínim d'introducció de distàncies. A partir del radi de l'esfera, on estan tangencialment disposats els vèrtex de la cúpula, i la freqüència d'aquesta, es podria desenvolupar un model geomètric àgil i sense errors dimensionals d'acumulació de números decimals.

f) Estudi estructural exhaustiu d'una o vàries unions.

Existeixen múltiples unions per a connectar les barres de les cúpules geodèsiques. Estudiar el seu comportament estructural pot ajudar a conèixer el funcionament i alhora, poder disposar d'informació per millorar-les.

9. REFERÈNCIES DE RECERCA

Bibliografia

- Gené, J. i Borràs A. (2016). *Guia de la fusta de les espècies forestals de Catalunya* (2a ed.). Generalitat de Catalunya, Institut català de la fusta.
- Khan, Ll. (1974) *Dome Book 2* (3a edició). Santa Bàrbara (California) Shelter Publications
- Requena Ruiz, I. *Análisis de tipologías estructurales bóveda, lámina, cúpula i paraboloides*.
- Rothoblaas Srl, (2014) *Tornillos para madera*. Cortaccia (BZ)

Webgrafia:

- Davis, T. (2011) *Godesic Domes*. <http://www.geometer.org/mathcircles>
- Landry, T. *Desert Domes*. <http://www.desertdomes.com/>
- Stasi, G. *Geometrias Geodésicas* <http://control-zeta.org/archives/2304>
- Empresa desconeguda *Acidome*.
http://acidome.ru/lab/calc/#7/12_Piped_D80_3V_R3_beams_80x30

DVD:

Buckminster Fuller. El mundo de Fuller. Robert Snyder:

Títol: Buckminster Fuller | h[Enregistrament de vídeo] : | bel mundo de Fuller / | cdirigido por Robert Snyder ; texto del arquitecto Carlos Ferrater

Peu d'impremta [Barcelona] : | bFundación Caja de Arquitectos, | cDL 2012

Descripció 1 disc òptic (DVD) (ca. 80 min) + | e1 llibret

Col·lecció Arquia ; | v25

Nota Versió en anglès, subtítols amb castellà

Matèria Fuller, R. Buckminster

Matèria Arquitectes

Autor sec. Snyder, Robert

Autor sec. Ferrater, Carlos

ANNEXOS

Annex 1 Càlcul de forces parametritzades per quadrants

Annex 2 Comprovació de càlcul

Annex 1 Càlcul de forces parametritzades per quadrants

QUADRANT 01	ALPHA	BETA (base)	CÀRREGA	
1	86	90	83,80	kg/m2
2	86	79	82,26	kg/m2
3	86	67	77,13	kg/m2
4	86	55	68,64	kg/m2
5	86	44	58,21	kg/m2
6	86	31	43,16	kg/m2
7	77	90	81,85	kg/m2
8	77	79	80,34	kg/m2
9	77	67	75,34	kg/m2
10	77	55	67,05	kg/m2
11	77	44	56,86	kg/m2
12	77	31	42,15	kg/m2
13	53	79	65,85	kg/m2
14	53	73	64,15	kg/m2
15	53	55	54,95	kg/m2
16	53	36	39,43	kg/m2
17	53	31	34,55	kg/m2
18	31	73	41,37	kg/m2
19	31	54	35,00	kg/m2
20	31	36	25,43	kg/m2
21	11	54	12,97	kg/m2

QUADRANT 02	ALPHA	BETA (180- base+72)	CÀRREGA	
1	86	18	25,89	kg/m2
2	86	29	40,62	kg/m2
3	86	41	54,97	kg/m2
4	86	53	66,92	kg/m2
5	86	64	75,31	kg/m2
6	86	77	81,65	kg/m2
7	77	18	25,29	kg/m2
8	77	29	39,68	kg/m2
9	77	41	53,70	kg/m2
10	77	53	65,37	kg/m2
11	77	64	73,56	kg/m2
12	77	77	79,75	kg/m2
13	53	29	32,52	kg/m2
14	53	35	38,48	kg/m2
15	53	53	53,58	kg/m2
16	53	72	63,80	kg/m2
17	53	77	65,37	kg/m2
18	31	35	24,81	kg/m2
19	31	54	35,00	kg/m2
20	31	72	41,15	kg/m2
21	11	54	12,97	kg/m2

QUADRANT 03	ALPHA	BETA (base- 72)	CÀRREGA	
1	86	18	25,89	kg/m2
2	86	7	10,21	kg/m2
3	86	-5	-4,17	kg/m2
4	86	-17	-14,00	kg/m2
5	86	-28	-22,48	kg/m2
6	86	-41	-31,41	kg/m2
7	77	18	25,29	kg/m2
8	77	7	9,97	kg/m2
9	77	-5	-4,08	kg/m2
10	77	-17	-13,67	kg/m2
11	77	-28	-21,96	kg/m2
12	77	-41	-30,68	kg/m2
13	53	7	8,18	kg/m2
14	53	1	1,17	kg/m2
15	53	-17	-11,21	kg/m2
16	53	-36	-22,53	kg/m2
17	53	-41	-25,15	kg/m2
18	31	1	0,76	kg/m2
19	31	-18	-7,64	kg/m2
20	31	-36	-14,53	kg/m2
21	11	-18	-2,83	kg/m2

QUADRANT 04	ALPHA	BETA (180- base+144)	CÀRREGA	
1	86	-54	-38,74	kg/m2
2	86	-43	-32,66	kg/m2
3	86	-31	-24,66	kg/m2
4	86	-19	-15,59	kg/m2
5	86	-8	-6,66	kg/m2
6	86	5	7,30	kg/m2
7	77	-54	-37,84	kg/m2
8	77	-43	-31,90	kg/m2
9	77	-31	-24,09	kg/m2
10	77	-19	-15,23	kg/m2
11	77	-8	-6,51	kg/m2
12	77	5	7,13	kg/m2
13	53	-43	-26,14	kg/m2
14	53	-37	-23,07	kg/m2
15	53	-19	-12,48	kg/m2
16	53	0	0,00	kg/m2
17	53	5	5,85	kg/m2
18	31	-37	-14,88	kg/m2
19	31	-18	-7,64	kg/m2
20	31	0	0,00	kg/m2
21	11	-18	-2,83	kg/m2

*al resultat negatiu s'aplica Qs

QUADRANT 05	ALPHA	BETA (base- 144)	CÀRREGA	
1	86	-54	-38,74	kg/m2
2	86	-65	-43,40	kg/m2
3	86	-77	-46,66	kg/m2
4	86	-89	-47,88	kg/m2
5	86	-80	-47,16	kg/m2
6	86	-67	-44,08	kg/m2
7	77	-54	-37,84	kg/m2
8	77	-65	-42,39	kg/m2
9	77	-77	-45,57	kg/m2
10	77	-89	-46,76	kg/m2
11	77	-80	-46,06	kg/m2
12	77	-67	-43,05	kg/m2
13	53	-65	-34,74	kg/m2
14	53	-71	-36,25	kg/m2
15	53	-89	-38,33	kg/m2
16	53	-72	-36,46	kg/m2
17	53	-67	-35,29	kg/m2
18	31	-71	-23,37	kg/m2
19	31	-90	-24,72	kg/m2
20	31	-72	-23,51	kg/m2
21	11	-90	-9,16	kg/m2

*al resultat negatiu s'aplica Qs

Barra N44/N49

Perfil: R 40x80 Material: Fusta (C22)							
	Nusos		Longitud (m)	Característiques mecàniques			
	Inicial	Final		Àrea (cm ²)	I _y ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _z ⁽¹⁾ (cm ⁴)	I _t ⁽²⁾ (cm ⁴)
	N44	N49	1.239	32.00	170.67	42.67	117.25
	Notes: (1) Inèrcia respecte l'eix indicat (2) Moment d'inèrcia a torció uniforme						
				Vinclament		Vinclament lateral	
				Pla XY	Pla XZ	Ala sup.	Ala inf.
			β	1.00	1.00	0.00	0.00
			L _K	1.239	1.239	0.000	0.000
			C _m	1.000	1.000	1.000	1.000
Notació: β: Coeficient de vinclament L _K : Longitud de vinclament (m) C _m : Coeficient de moments							

Barra	COMPROVACIONS (CTE DB SE-M)											Estat
	N _{t,0,d}	N _{c,0,d}	M _{y,d}	M _{z,d}	V _{y,d}	V _{z,d}	M _{x,d}	M _{y,d} M _{z,d}	N _{t,0,d} M _{y,d} M _{z,d}	N _{c,0,d} M _{y,d} M _{z,d}	M _{x,d} V _{y,d} V _{z,d}	
N44/N49	N.P. ⁽¹⁾	x: 0 m η = 64.6	x: 1.24 m η = 11.1	x: 0 m η = 1.6	x: 1.24 m η = 0.5	x: 1.24 m η = 8.4	N.P. ⁽²⁾	x: 1.24 m η = 11.8	N.P. ⁽³⁾	x: 1.24 m η = 71.3	N.P. ⁽⁴⁾	COMPLEX η = 71.3
Notació: N _{t,0,d} : Resistència a tracció uniforme paral·lela a la fibra N _{c,0,d} : Resistència a compressió uniforme paral·lela a la fibra M _{y,d} : Resistència a flexió a l'eix y M _{z,d} : Resistència a flexió a l'eix z V _{y,d} : Resistència a tallant a l'eix y V _{z,d} : Resistència a tallant a l'eix z M _{x,d} : Resistència a torsió M _{y,d} M _{z,d} : Resistència a flexió esbiaxada N _{t,0,d} M _{y,d} M _{z,d} : Resistència a flexió i tracció axial combinades N _{c,0,d} M _{y,d} M _{z,d} : Resistència a flexió i compressió axial combinades M _{x,d} V _{y,d} V _{z,d} : Resistència a tallant i torsor combinats x: Distància a l'origen de la barra η: Coeficient de aprofitament (%) N.P.: No procedeix												
Comprovacions que no procedeixen (N.P.): (1) La comprovació no procedeix, ja que no hi ha axial de tracció. (2) La comprovació no procedeix, ja que no hi ha moment torsor. (3) La comprovació no procedeix, ja que no hi ha interacció entre axil de tracció i moment flector per a cap combinació. (4) La comprovació no procedeix, ja que la barra no està sotmesa a moment torsor ni a esforç tallant.												

Resistència a tracció uniforme paral·lela a la fibra (CTE DB SE-M: 6.1.2)

La comprovació no procedeix, ja que no hi ha axial de tracció.

Resistència a compressió uniforme paral·lela a la fibra (CTE DB SE-M: 6.1.4 - 6.3.2)

S'ha de satisfer:

Resistència de la secció transversal a compressió

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \leq 1$$

η : 0.165 ✓

Resistència a vinclament per flexió en l'eix y

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

η : 0.224 ✓

Resistència a vinclament per flexió en l'eix z

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} \leq 1$$

η : 0.646 ✓

L'esforç sol·licitant de càlcul pèssim es produeix en el nus N44, per a la combinació d'accions 1.35·G+1.5·us.

On:

σ_{c,0,d}: Tensió de càlcul a compressió paral·lela a la fibra, donada per:

σ_{c,0,d} : 18.17 kp/cm²

$$\sigma_{c0,d} = |N_{c,0,d}|/A$$

On:

$N_{c,0,d}$: Compressió axial de càlcul paral·lela a la fibra

A : Àrea de la secció transversal

$f_{c,0,d}$: Resistència de càlcul a compressió paral·lela a la fibra, donada per:

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot f_{c,0,k} / \gamma_M$$

On:

k_{mod} : Factor de modificació per la durada de la càrrega (Llarga durada) i el contingut d'humitat (Classe de servei 2)

$f_{c,0,k}$: Resistència característica a compressió paral·lela a la fibra

γ_M : Coeficient parcial per a les propietats del material

Resistència a vinclament: (CTE DB SE-M: 6.3.2)

χ_c : Factor d'inestabilitat, donat per:

$$\chi_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}}$$

On:

$$k = 0.5 \cdot (1 + \beta_c \cdot (\lambda_{rel} - 0.3) + \lambda_{rel}^2)$$

On:

β_c : Factor associat a la rectitud de les peces

λ_{rel} : Esbeltesa relativa, donada per:

$$\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,k}}}$$

On:

$E_{0,k}$: Valor del cinquè percentatge del mòdul d'elasticitat paral·lel a la fibra

$f_{c,0,k}$: Resistència característica a compressió paral·lela a la fibra

λ : Esbeltesa mecànica, donada per:

$$\lambda = \frac{L_k}{i}$$

On:

L_k : Longitud de vinclament de la barra

i : Radi de gir

$$N_{c,0,d} : \underline{0.581} \text{ t}$$

$$A : \underline{32.00} \text{ cm}^2$$

$$f_{c,0,d} : \underline{109.78} \text{ kp/cm}^2$$

$$k_{mod} : \underline{0.70}$$

$$f_{c,0,k} : \underline{203.87} \text{ kp/cm}^2$$

$$\gamma_M : \underline{1.30}$$

$$\chi_{c,y} : \underline{0.74}$$

$$\chi_{c,z} : \underline{0.26}$$

$$k_y : \underline{1.00}$$

$$k_z : \underline{2.40}$$

$$\beta_c : \underline{0.20}$$

$$\lambda_{rel,y} : \underline{0.93}$$

$$\lambda_{rel,z} : \underline{1.87}$$

$$E_{0,k} : \underline{68297.66} \text{ kp/cm}^2$$

$$f_{c,0,k} : \underline{203.87} \text{ kp/cm}^2$$

$$\lambda_y : \underline{53.67}$$

$$\lambda_z : \underline{107.33}$$

$$L_{k,y} : \underline{1239.34} \text{ mm}$$

$$L_{k,z} : \underline{1239.34} \text{ mm}$$

$$i_y : \underline{23.09} \text{ mm}$$

$$i_z : \underline{11.55} \text{ mm}$$

Resistència a flexió a l'eix y (CTE DB SE-M: 6.1.6 - 6.3.3)

S'ha de satisfer:

Resistència de la secció transversal a flexió:

$$\eta = \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1$$

η : 0.111



L'esforç sol·licitant de càlcul pèssim es produeix en el nus N49, per a la combinació d'accions 1.35·G+1.05·us+1.5·vent.

No es comprova la resistència a bolcada lateral, ja que la corresponent longitud de vinclament és nul·la.

Resistència de la secció transversal a flexió:

$\sigma_{m,d}$: Tensió de càlcul a flexió, donada per:

$\sigma_{m,y,d}^+$: 19.46 kp/cm²

$\sigma_{m,y,d}^-$: 0.00 kp/cm²

$$\sigma_{m,d} = |M_d| / W_{el}$$

On:

M_d : Moment flector de càlcul

$M_{y,d}^+$: 0.008 t·m

$M_{y,d}^-$: 0.000 t·m

W_{el} : Mòdul resistent elàstic de la secció transversal

$W_{el,y}$: 42.67 cm³

$f_{m,d}$: Resistència de càlcul a flexió, donada per:

$f_{m,y,d}^+$: 176.06 kp/cm²

$f_{m,y,d}^-$: 117.37 kp/cm²

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot k_h \cdot f_{m,k} / \gamma_M$$

On:

k_{mod} : Factor de modificació per a la duració de la càrrega i el contingut d'humitat

k_{mod}^+ : 0.90

k_{mod}^- : 0.60

On:

Classe de duració de la càrrega

Classe⁺ : Curta durada

Classe⁻ : Permanent

Classe de servei

Classe : 2

$f_{m,k}$: Resistència característica a flexió

$f_{m,k}$: 224.26 kp/cm²

k_h : Factor d'altura, donat per:

k_h : 1.13

Per a cantells (flexió) o amples (tracció) de peces rectangulars de fusta massissa inferiors a 150 mm:

$$k_h = \min\{(150/h)^{0.2}; 1.3\}$$

On:

h : Cantell amb flexió o major dimensió de la secció en tracció

h : 80.00 mm

γ_M : Coeficient parcial per a les propietats del material

γ_M : 1.30

Resistència a flexió a l'eix z (CTE DB SE-M: 6.1.6 - 6.3.3)

S'ha de satisfer:

Resistència de la secció transversal a flexió:

$$\eta = \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

η : 0.016



L'esforç sol·licitant de càlcul pèssim es produeix en el nus N44, per a la combinació d'accions 1.35·G.

No es comprova la resistència a bolcada lateral, ja que el mòdul resistent elàstic de la secció respecte a l'eix z és inferior o igual al mòdul resistent elàstic respecte a l'eix y.

Resistència de la secció transversal a flexió:

$\sigma_{m,d}$: Tensió de càlcul a flexió, donada per:

$\sigma_{m,z,d}^+$: 1.42 kp/cm²

$\sigma_{m,z,d}^-$: 2.14 kp/cm²

$$\sigma_{m,d} = |M_d| / W_{el}$$

On:

M_d : Moment flector de càlcul

$M_{z,d}$: 0.000 t·m

W_{el} : Mòdul resistent elàstic de la secció transversal

$W_{el,z}$: 21.33 cm³

$f_{m,d}$: Resistència de càlcul a flexió, donada per:

$f_{m,z,d}^+$: 201.83 kp/cm²

$f_{m,z,d}^-$: 134.56 kp/cm²

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot k_h \cdot f_{m,k} / \gamma_M$$

On:

k_{mod} : Factor de modificació per a la duració de la càrrega i el contingut d'humitat

k_{mod}^+ : 0.90

k_{mod}^- : 0.60

On:

Classe de duració de la càrrega

Classe⁺ : Curta durada

Classe⁻ : Permanent

Classe de servei

Classe : 2

$f_{m,k}$: Resistència característica a flexió

$f_{m,k}$: 224.26 kp/cm²

k_h : Factor d'altura, donat per:

k_h : 1.30

Per a cantells (flexió) o amples (tracció) de peces rectangulars de fusta massissa inferiors a 150 mm:

$$k_h = \min \left\{ (150/h)^{0.2}; 1.3 \right\}$$

On:

h : Cantell amb flexió o major dimensió de la secció en tracció

h : 40.00 mm

γ_M : Coeficient parcial per a les propietats del material

γ_M : 1.30

Resistència a tallant a l'eix y (CTE DB SE-M: 6.1.8)

S'ha de satisfer:

$$\eta = \frac{\tau_{y,d}}{f_{v,d}} \leq 1$$

η : **0.005** ✓

L'esforç sol·licitant de càlcul pèssim es produeix en el nus N49, per a la combinació d'accions 0.8·G+1.5·vent.

On:

τ_d : Tensió de càlcul a tallant, donada per:

$\tau_{y,d}$: 0.12 kp/cm²

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{|V_d|}{A \cdot k_{cr}}$$

On:

V_d : Tallant de càlcul

$V_{y,d}$: 0.002 t

A : Àrea de la secció transversal

A : 32.00 cm²

k_{cr} : Factor que té en compte la influència de les fenedures

k_{cr} : 0.67

$f_{v,d}$: Resistència de càlcul a tallant, donada per:

$f_{v,d}$: 26.82 kp/cm²

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot f_{v,k} / \gamma_M$$

On:

k_{mod} : Factor de modificació per la durada de la càrrega (Curta durada) i el contingut d'humitat (Classe de servei 2)

k_{mod} : 0.90

$f_{v,k}$: Resistència característica a tallant

$f_{v,k}$: 38.74 kp/cm²

γ_M : Coeficient parcial per a les propietats del material

γ_M : 1.30

Resistència a tallant a l'eix z (CTE DB SE-M: 6.1.8)

S'ha de satisfer:

$$\eta = \frac{\tau_{z,d}}{f_{v,d}} \leq 1$$

η : **0.084** ✓

L'esforç sol·licitant de càlcul pèssim es produeix en el nus N49, per a la combinació d'accions 1.35·G+1.05·us+1.5·vent.

On:

τ_d : Tensió de càlcul a tallant, donada per:

$\tau_{z,d}$: 2.24 kp/cm²

$$\tau_d = \frac{3}{2} \cdot \frac{|V_d|}{A \cdot k_{cr}}$$

On:

V_d : Tallant de càlcul

$V_{z,d}$: 0.032 t

A : Àrea de la secció transversal

A : 32.00 cm²

k_{cr} : Factor que té en compte la influència de les fenedures

k_{cr} : 0.67

$f_{v,d}$: Resistència de càlcul a tallant, donada per:

$f_{v,d}$: 26.82 kp/cm²

$$f_{v,d} = k_{mod} \cdot f_{v,k} / \gamma_M$$

On:

k_{mod} : Factor de modificació per la durada de la càrrega (Curta durada) i el contingut d'humitat (Classe de servei 2)

k_{mod} : 0.90

$f_{v,k}$: Resistència característica a tallant

$f_{v,k}$: 38.74 kp/cm²

γ_M : Coeficient parcial per a les propietats del material

γ_M : 1.30

Resistència a torsió (CTE DB SE-M: 6.1.9)

La comprovació no procedeix, ja que no hi ha moment torsor.

Resistència a flexió esbiaxada (CTE DB SE-M: 6.1.7)

S'ha de satisfer:

Resistència a flexió esbiaxada

$$\eta = \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

η : 0.118 ✓

$$\eta = k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

η : 0.088 ✓

L'esforç sol·licitant de càlcul pèssim es produeix en el nus N49, per a la combinació d'accions 1.35·G+1.05·us+1.5·vent.

On:

$\sigma_{m,d}$: Tensió de càlcul a flexió, donada per:

$\sigma_{m,y,d}$: 19.46 kp/cm²

$\sigma_{m,z,d}$: 2.09 kp/cm²

$$\sigma_{m,d} = |M_d| / W_{el}$$

On:

M_d : Moment flector de càlcul

$M_{y,d}$: 0.008 t·m

$M_{z,d}$: 0.000 t·m

W_{el} : Mòdul resistent elàstic de la secció transversal

$W_{el,y}$: 42.67 cm³

$W_{el,z}$: 21.33 cm³

$f_{m,d}$: Resistència de càlcul a flexió, donada per:

$f_{m,y,d}$: 176.06 kp/cm²

$f_{m,z,d}$: 201.83 kp/cm²

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot k_h \cdot f_{m,k} / \gamma_M$$

On:

k_{mod} : Factor de modificació per la durada de la càrrega (Curta durada) i el contingut d'humitat (Classe de servei 2)

k_{mod} : 0.90

$f_{m,k}$: Resistència característica a flexió

$f_{m,k}$: 224.26 kp/cm²

k_h : Factor d'altura, donat per:

$k_{h,y}$: 1.13

$k_{h,z}$: 1.30

γ_M : Coeficient parcial per a les propietats del material

γ_M : 1.30

k_m : Factor que té en compte l'efecte de redistribució de tensions sota flexió esbiaxada i la falta d'homogeneïtat del material en la secció transversal.

k_m : 0.70

Resistència a flexió i tracció axial combinades (CTE DB SE-M: 6.2.2)

La comprovació no procedeix, ja que no hi ha interacció entre axil de tracció i moment flector per a cap combinació.

Resistència a flexió i compressió axial combinades (CTE DB SE-M: 6.2.3)

L'esforç sol·licitant de càlcul pèssim es produeix en el nus N49, per a la combinació d'accions 1.35·G+1.05·us+1.5·vent.

S'ha de satisfer:

Resistència de la secció transversal a flexió i compressió combinats

$$\eta = \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

η : 0.143 ✓

$$\eta = \left(\frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

η : 0.113 ✓

Resistència a vinclament per a flexió i compressió combinats

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,y} \cdot f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

η : 0.335 ✓

$$\eta = \frac{\sigma_{c,0,d}}{\chi_{c,z} \cdot f_{c,0,d}} + k_m \cdot \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1$$

η : 0.713



Resistència a bolcada lateral per a flexió i compressió combinats

No és necessària la comprovació de resistència a bolcada lateral ja que la longitud de bolcada lateral és nul·la.

On:

$\sigma_{c,0,d}$: Tensió de càlcul a compressió paral·lela a la fibra, donada per:

$\sigma_{c,0,d}$: 22.60 kp/cm²

$$\sigma_{c,0,d} = |N_{c,0,d}|/A$$

On:

$N_{c,0,d}$: Compressió axial de càlcul paral·lela a la fibra

$N_{c,0,d}$: 0.723 t

A : Àrea de la secció transversal

A : 32.00 cm²

$\sigma_{m,d}$: Tensió de càlcul a flexió, donada per:

$\sigma_{m,y,d}$: 19.46 kp/cm²

$\sigma_{m,z,d}$: 2.09 kp/cm²

$$\sigma_{m,d} = |M_d|/W_{el}$$

On:

M_d : Moment flector de càlcul

$M_{y,d}$: 0.008 t·m

$M_{z,d}$: 0.000 t·m

W_{el} : Mòdul resistent elàstic de la secció transversal

$W_{el,y}$: 42.67 cm³

$W_{el,z}$: 21.33 cm³

$f_{c,0,d}$: Resistència de càlcul a compressió paral·lela a la fibra, donada per:

$f_{c,0,d}$: 141.14 kp/cm²

$$f_{c,0,d} = k_{mod} \cdot f_{c,0,k} / \gamma_M$$

On:

k_{mod} : Factor de modificació per la durada de la càrrega (Curta durada) i el contingut d'humitat (Classe de servei 2)

k_{mod} : 0.90

$f_{c,0,k}$: Resistència característica a compressió paral·lela a la fibra

$f_{c,0,k}$: 203.87 kp/cm²

γ_M : Coeficient parcial per a les propietats del material

γ_M : 1.30

$f_{m,d}$: Resistència de càlcul a flexió, donada per:

$f_{m,y,d}$: 176.06 kp/cm²

$f_{m,z,d}$: 201.83 kp/cm²

$$f_{m,d} = k_{mod} \cdot k_h \cdot f_{m,k} / \gamma_M$$

On:

k_{mod} : Factor de modificació per la durada de la càrrega (Curta durada) i el contingut d'humitat (Classe de servei 2)

k_{mod} : 0.90

$f_{m,k}$: Resistència característica a flexió

$f_{m,k}$: 224.26 kp/cm²

k_h : Factor d'altura, donat per:

$k_{h,y}$: 1.13

$k_{h,z}$: 1.30

Eix y:

Per a cantells (flexió) o amples (tracció) de peces rectangulars de fusta massissa inferiors a 150 mm:

$$k_h = \min\{(150/h)^{0.2}; 1.3\}$$

On:

h : Cantell amb flexió o major dimensió de la secció en tracció

h : 80.00 mm

Eix z:

Per a cantells (flexió) o amples (tracció) de peces rectangulars de fusta massissa inferiors a 150 mm:

$$k_h = \min\{(150/h)^{0.2}; 1.3\}$$

On:

h : Cantell amb flexió o major dimensió de la secció en tracció

h : 40.00 mm

γ_M : Coeficient parcial per a les propietats del material

γ_M : 1.30

k_m : Factor que té en compte l'efecte de redistribució de tensions sota flexió esbiaxada i la falta d'homogeneïtat del material en la secció transversal.

k_m : 0.70

χ_c : Factor d'inestabilitat

$\chi_{c,y}$: 0.74

$\chi_{c,z}$: 0.26

Resistència a tallant i torsor combinats (CTE DB SE-M: 6.1.8 - 6.1.9, Criteri de CYPE Enginyers)

La comprovació no procedeix, ja que la barra no està sotmesa a moment torsor ni a esforç tallant.