

Treball final de màster

Estudi: Màster en Enginyeria Industrial

Títol: Disseny i càlcul d'una estructura paramètrica, tecnologies BIM

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Pau Duran Carrera

Tutor: Enric Simon Madrenas

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial (EMCI)

Àrea: Mecànica dels Medis Continus i Teoria d'Estructures (MMCTE)

Convocatòria: juny 2022

Agraïments:

Voldria mostrar el meu agraïment al professor i tutor d'aquest projecte, Dr. Enric Simon Madrenas, per la seva dedicació, opinions i consells impartits a l'hora de realitzar aquest projecte. També m'agradaria fer extensiu aquest agraïment al professor Miguel Alquezar Herrero, al seu company David Alejandro Acevedo Viera i al conjunt de l'equip de Construsoft que m'han permès adquirir coneixements molt valuosos i interessants sobre les tecnologies BIM, els quals han fet possible l'elaboració del projecte. He pogut gaudir d'una comunicació fluïda i còmode que m'ha facilitat moltíssim el procés d'aprenentatge i l'evolució constant tant de la meva feina com del meu aprenentatge.

Índex de continguts

| | |
|---|----|
| 1 Proposta | 2 |
| 1.1 Origen del projecte | 2 |
| 1.2 Motivació | 2 |
| 2 Introducció | 2 |
| 2.1 Objectius del projecte | 3 |
| 2.2 Abast del projecte | 3 |
| 3 Procés de disseny | 3 |
| 3.1 Disseny base | 4 |
| 3.2 Suports i unions | 5 |
| 3.3 Material i perfils metàl·lics | 6 |
| 3.4 Càrregues de l'estructura | 7 |
| 4 L'algoritme | 8 |
| 4.1 Disseny paramètric de l'estructura | 9 |
| 4.1.1 Paràmetres d'entrada | 9 |
| 4.1.2 Restriccions d'alçada i inclinació | 11 |
| 4.1.3 Generació del pòrtic | 11 |
| 4.1.4 Generació de profunditat | 15 |
| 4.1.5 Creus de Sant Andreu | 18 |
| 4.1.6 Paràmetres de Sortida | 21 |
| 4.2 Càlcul paramètric de l'estructura | 22 |
| 4.2.1 Elaboració del model de càlcul | 22 |
| 4.2.2 Càrregues del model | 27 |
| 4.2.3 Visualització del model | 31 |
| 4.3 Possibilitats de l'algoritme | 33 |
| 4.3.1 Canvi de paràmetres i interoperabilitat | 34 |
| 4.4 Optimització de l'estructura | 38 |
| 5 Validació del càlcul | 41 |
| 6 Plànols | 46 |
| 7 Avaluació econòmica | 46 |
| 8 Conclusions | 47 |
| 9 Relació de Documents | 47 |
| 10 Bibliografia | 47 |

1 Proposta

En aquest projecte s'ha proposat el modelatge paramètric d'una graderia per albergar esdeveniments esportius, culturals o de qualsevol acte que requereixi de públic.

1.1 Origen del projecte

Actualment el sector de la construcció està avançant cap al modelatge BIM.

El BIM (*Building Information Modeling*) és una filosofia de treball que pretén centralitzar en un sol model 3D tota la feina referent a la modelització i construcció d'estructures, que fins ara s'ha fet de manera coordinativa entre diferents actors, mitjançant plànols 2D. Aplicant aquesta tecnologia s'aconsegueix una reducció de costos i de temps, principalment millorant la detecció d'errors quan el seu cost encara és mínim. També afavoreix un augment de la productivitat, eficiència i rendiment del sector. El concepte principal que defineix el BIM és el fet de "Modelar amb Informació".

A més, existeix la modalitat de disseny paramètric. Mitjançant el programari adequat es pot crear un algoritme que permet modelar una estructura de manera parametritzada. D'aquesta manera, introduint distàncies, dimensions o propietats dels elements es genera un model 3D automàticament. Aquesta metodologia és una manera molt ràpida de modelar una estructura adaptada a cada situació partint d'un estàndard generat a través d'un treball previ de creació de l'algoritme.

1.2 Motivació

Pels motius esmentats, entre altres que en menor o major mesura també afavoreixen la millora del sector, el procés de modelatge està evolucionant gradualment en aquesta direcció, el BIM. Es fa interessant aprendre a treballar amb aquesta metodologia ja que adquirir coneixement i aptituds en aquest àmbit pot ser d'interès per les empreses que busquen talent i evolucionar personalment en consonància amb el sector.

2 Introducció

Aquest projecte consisteix en una explicació detallada sobre el procés d'elaboració d'un algoritme que dissenya i calcula una estructura metàl·lica. Concretament, s'ha modelat una graderia pensada per suportar el trànsit del públic en diversos esdeveniments.

La idea primitiva és similar a la d'una graderia circular o ovalada com les de qualsevol estadi esportiu o coliseu. S'interpreta la possibilitat de dissenyar una estructura modular que doni forma a aquesta idea. Realitzant una primera simplificació en planta d'aquesta primer pensament, s'ha imaginat un rectangle on els seus costats oposats més curts s'han substituït per arcs de circumferència. Per tant, a nivells base, aquesta construcció estarà formada per diversos mòduls, que definiran alguns trams rectes i d'altres amb certa curvatura. Cadascun dels mòduls serà tractat com una estructura metàl·lica independent i juntament tots ells acabaran dibuixant la vista en planta desitjada.

En aquest projecte s'ha modelat paramètricament l'estructura que defineix un dels mòduls encarregats de plasmar el tram recte de la graderia. Un cop s'ha arribat a la idea final del projecte, val a dir que no és d'ús exclusiu pel que s'ha pensat. És una estructura perfectament funcional com a element únic sense formar part de cap estructura modular. Es tracta d'una graderia recta que s'adequa als requeriments establerts. Queda pel futur,

l'elaboració d'algoritmes complementaris que puguin esdevenir estructures referents als mòduls que defineixen els trams amb curvatura de la graderia pensada en un primer moment.

El procés d'elaboració i definició del model paramètric queda recollit en les pàgines d'aquest projecte. En aquest document es narren els passos seguits i les possibles complicacions que poden sorgir a l'hora de treballar amb estructures paramètriques. Gràcies al programari adequat, s'ha obtingut el model i càlcul simultanis d'una estructura sobre la qual es poden modificar les seves mides i càrregues aplicades mitjançant diversos paràmetres d'entrada al procés.

2.1 Objectius del projecte

L'objecte d'aquest projecte consisteix en l'elaboració d'un algoritme que s'encarregui de modelar i calcular una estructura paramètrica. Es vol aplicar un mètode de modelatge i càlcul d'estructures paramètric que ajuda a obtenir, de la manera més ràpida i eficient possible, una estructura que compleix amb les sol·licitacions del peticionari a partir de certs paràmetres de disseny.

2.2 Abast del projecte

L'abast del projecte comprendrà la recerca, formació i instrucció necessària per utilitzar el programari adequat, l'elaboració de l'algoritme que permeti modelar i calcular l'estructura desitjada i obtenir una solució efectiva i real per fer front al problema plantejat.

No es tracta d'un projecte constructiu i per tant, no es presenten documents detallats de la solució elaborada per explicar el procés. Per tant, el recull d'informació es limita a presentar exemples generals de les possibilitats del procés de modelatge estudiat.

3 Procés de disseny

Per començar a elaborar un algoritme des de zero cal tenir una idea prèvia dels elements a dissenyar i de les variables a parametritzar. És per aquest motiu que per assolir l'objectiu, s'ha començat per un disseny preliminar base d'una estructura estàndard. A partir d'aquest disseny base s'han decidit les variables a parametritzar i els elements que formen el conjunt de l'estructura.

Per una banda, el disseny base s'ha elaborat amb el programari de càlcul d'estructures "Diamonds". Amb aquest model s'ha establert una idea bàsica pel disseny paramètric i s'ha utilitzat com a referència per verificar el càlcul estructural de l'algoritme.

Per altra banda s'ha utilitzat el programari de dibuix "Rhinceros7", concretament l'extensió de "Grasshopper" per elaborar l'algoritme que esdevé el disseny paramètric.

Per la correcta compressió del procés explicatiu cal remarcar que els eixos globals de referència en cadascun dels programaris és diferent. Al "Diamonds", els eixos que defineixen la planta de l'estructura són els anomenats "X" i "Z" i l'encarregat de definir l'alçada de l'estructura és l'eix "Y". En canvi, als dibuixos representats pel "Rhino" es defineix la vista en planta pels eixos "X" i "Y" i l'alçada s'estableix amb l'eix "Z" com a referència.

3.1 Disseny base

La idea inicial és la de dissenyar una estructura metàl·lica inclinada amb un angle de visió adequat per l'espectador. El públic transitarà sobre unes plaques alveolars de formigó prefabricat recolzades sobre els perfils metàl·lics seleccionats.

S'ha pensat en una estructura amb dos nivells de circulació, un de superior i l'altre d'inferior. Entre aquestes dues zones s'ha establert la part inclinada anomenada grada. Aquesta zona central, és on s'hi establiran els seients i el públic podrà gaudir, assegut, dels esdeveniments. També s'ha incorporat un tercer nivell, no transitable, a la part posterior de l'estructura pensant en una implementació de coberta futura. D'aquesta manera, el pòrtic queda definit com es representa a la figura 1.

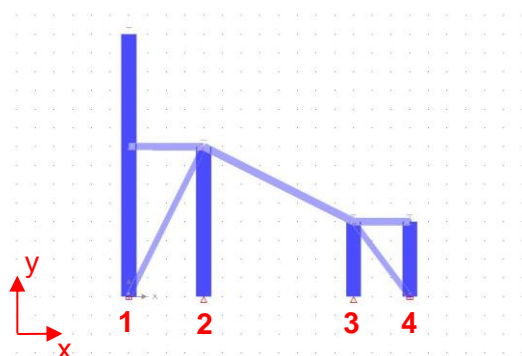


Figura 1: Pòrtic del disseny base.

Amb el concepte estàndard establert s'han designat unes mides en metres en el pla XY per cadascun dels sectors. Dos metres d'amplitud per la zona de circulació superior, quatre metres de grada central i un metre i mig per la zona de circulació inferior. Pel que fa a les magnituds en Y de cada sector s'ha establert una alçada de dos metres a la part de circulació inferior, quatre metres a la part de circulació superior i una diferència d'alçada entre aquesta última part i la corretja de coberta de tres metres. Aquestes magnituds en el pla XY acaben determinant el disseny base del pòrtic. Per altra banda, també s'ha definit l'estructura en l'eix Z donant una magnitud a la longitud de la construcció de quaranta metres i una distància entre els pòrtics que la suporten de 5 metres, resultant així una quantitat de nou pòrtics. El resum de les magnituds definides al disseny base queden representades a la taula 1.

Taula 1: Resum de magnituds del disseny base.

| Sector | Definició | Valor |
|----------------------|--|-------|
| Profunditat Superior | Distància en X entre la fila de columnes 1 i 2 | 2 m |
| Profunditat Grada | Distància en X entre la fila de columnes 2 i 3 | 4 m |
| Profunditat Inferior | Distància en X entre la fila de columnes 3 i 4 | 1,5 m |
| Alçada Inferior | Distància en Y entre el sòl i la circulació inferior | 2 m |
| Alçada Superior | Distància en Y entre el sòl i la circulació superior | 4 m |

Taula 1: Resum de magnituds del disseny base.

| Sector | Definició | Valor |
|----------------------|--|-------|
| Alçada Coberta | Distància en Y entre la circulació superior i el punt superior | 3 m |
| Longitud de la grada | Distància en Z total de l'estructura | 40 m |
| Quantitat de pòrtics | Distància entre pòrtics de cinc metres | 9 u. |

A partir d'aquestes dades s'ha dibuixat al programari de càlcul estructural una construcció amb les característiques de la taula 1 formada pels diferents elements que s'han anomenat: columnes, cordons i corretges. També s'ha incorporat al disseny un element més, les diagonals. Aquests elements serveixen d'arriostament de l'estructura a la deformació deguda a les carregues laterals de vent previstes. Quatre creus se sant Andreu entre els dos pòrtics més exteriors de cada costat i una diagonal més sota de cadascuna de les zones de circulació. L'estructura té l'aspecte mostrat a la figura 2.

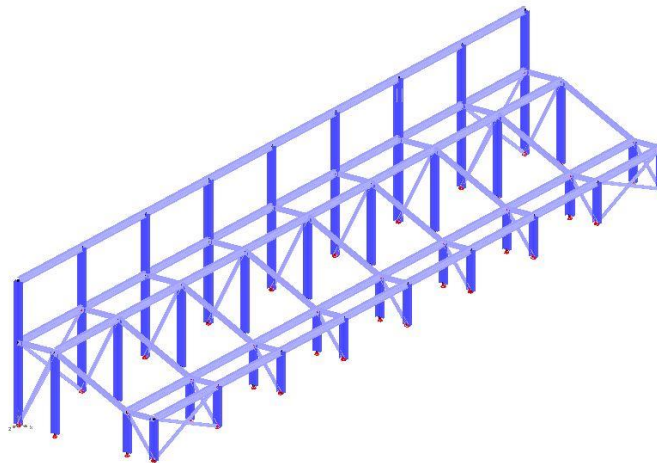


Figura 2: Disseny basic de l'Estructura estàndard 3D.

3.2 Suports i unions

El disseny base també ha servit per determinar els suports de l'estructura i les unions entre els diversos elements. Com es pot observar a la figura 1 els dos suports exteriors del pòrtic, són encastaments a terra. Els altres dos contactes a terra, les dues columnes interiors, són recolzaments simples que permeten la rotació i impedeixen la translació.

Per altra banda, per defecte, tots els elements estan connectats per unions rígides, transmeten tots els esforços: tallant, axial i moment flector. En el cas de les diagonals, però, s'han tractat com barres biarticulades amb les característiques mostrades a la figura 3. Per aquest motiu aquests elements no transmeten moment flector ni en el seu eix y' local ni en el seu eix z' local en cap dels seus extrems.

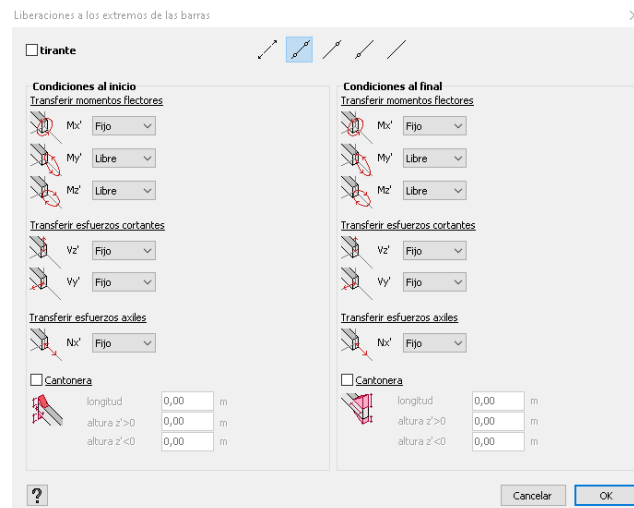


Figura 3: Configuració de les unions per les diagonals.

Una altra de les restriccions que s'ha tingut en compte en el càlcul d'aquesta estructura és el vinculament de les barres del pòrtic que van unides per les plaques alveolars, els cordons. Aquests elements presenten una longitud de vinculament molt petita respecte el seu eix local y' degut al recolzament de les plaques alveolars. Per tant, no s'ha tingut en compte el vinculament en aquesta direcció dels cordons.

3.3 Material i perfils metàl·lics

Pel disseny bàsic s'ha tingut en compte una gran homogeneïtzació dels aspectes material i perfils metàl·lics. L'Acer S275 és el més habitual degut a les seves prestacions i cost econòmic. Pel que fa als perfils metàl·lics s'ha seleccionat una tipologia de secció per cadascun dels elements de l'estructura. Les columnes, corretges i diagonals són de la família IPE de més gran a més petita segons l'ordre citat. En canvi, els cordons s'han previst per recolzar les plaques de formigó prefabricat. És per aquest motiu que s'ha pensat en un perfil HEB que disposa d'una superfície superior a les ales, sobre les quals s'ubicaran les plaques. Així doncs, com queda representat a la taula 2, les columnes, corretges i diagonals són perfils IPE400, IPE360, IPE160 respectivament i els cordons són perfils HEB200. D'aquesta manera, cada placa es recolzarà sobre la meitat de l'ala del perfil HEB i disposarà d'una superfície de recolzament de 100mm per l'amplada de la placa.

Taula 2: Material i perfils dels elements

| Elements | Material | Perfil |
|-----------------|-----------------|---------------|
| Columnes | S275 | IPE400 |
| Corretges | S275 | IPE360 |
| Diagonals | S275 | IPE160 |
| Cordons | S275 | HEB200 |

3.4 Càrregues de l'estructura

Cada estructura està sol·licitada per les seves càrregues particulars. En aquest cas, aquestes càrregues depenen del material i perfils dels elements, que afectaran al pes propi, de la quantitat de plaques alveolars que suporti l'estructura i de la concurrència d'aquesta mateixa. Com que es tracta d'un disseny base que es vol convertir en una estructura variable, s'han establert les càrregues en funció de les capacitats de variabilitat que s'ofereixen. Per tant, a part del pes propi que ja ve determinat pels elements que esdevenen la construcció, la resta s'han determinat en un valor per unitat de superfície.

Les càrregues establertes estan resumides a la taula 3. Si es detallen aquestes començant per la més externa s'han determinat següents grups de càrrega:

En primer lloc s'ha considerat una càrrega de 0,5 kN/m² atribuïts als seients pel públic. Aquests seients aniran recolzats sobre les plaques alveolars que alhora es recolzaran sobre els perfils HEB200 dels cordons. Aquestes s'han extret del "Catàleg Tècnic de Prefabricats Planas". S'utilitza la placa alveolar per forjat de cantell 15 cm amb una capa de compressió A-1510 de 5 cm. La sobrecàrrega que han de suportar aquestes plaques és la d'ús. Seguint els valors característics per sobrecàrregues d'ús estipulats a la taula 3.1 del document DB-SE-AE, s'ha adoptat un valor de sobrecàrrega d'ús de 5 kN/m² corresponent a la categoria C5, zones d'accés al públic (C), zones d'aglomeració (5). La longitud màxima de les plaques és funció de la sobrecàrrega que suporten. Per una sobrecàrrega entre 5 kN/m² i 7,5 kN/m² la màxima allargada possible de les plaques és de 6,40m. La càrrega que recau sobre els cordons depèn d'aquestes dimensions de placa. Per tant, el valor que s'ha considerat, queda estipulat també pel catàleg tècnic consultat, és de 3,63 kN/m². Per últim, s'han determinat dos grups de càrrega referents al vent seguint el mateix document DB-SE-AE. En primer lloc el vent lateral circula en direcció a l'eix global Z i impacta en el pla XY sobre els cordons i columnes del primer pòrtic. I en segon lloc, el vent posterior que circula en direcció a l'eix global X i impacta en el pla ZY sobre les corretges i columnes al llarg de tota la longitud del la grada. Amb una pressió dinàmica de 0,5 kN/m², un coeficient d'exposició igual a 2 (independent de l'alçada) i un coeficient eòlic de 0,7, resulta una càrrega de vent de 0,728 kN/m².

Taula 3: Resum de magnituds del disseny base.

| Grup de càrrega | Definició | Valor (kN/m²) |
|------------------------|--|---------------------------------|
| Pes propi | Kilonewtons resultants del pes de l'estructura | - |
| Plaques alveolars | Plaques alveolars per forjat 15+5 | 3,63 |
| Sobrecàrrega d'ús | Categoria d'ús C5: Zones d'aglomeració | 5 |
| Seients | Pes dels seients recolzats sobre les plaques alveolars | 0,5 |
| Vent lateral | Vent que impacta sobre el pla XY, (columnes i cordons) | 0,728 |
| Vent posterior | Vent que impacte sobre el pla ZY, (columnes i corretges) | 0,728 |

4 L'algoritme

A partir d'una primera idea concebuda en el programari de càlcul estructural Diamonds s'ha treballat en l'elaboració d'un algoritme que permet generar el disseny i realitzar el càlcul d'una família d'estructures metàl·liques a les quals s'hi pot donar un ús de graderia per esdeveniments culturals i/o esportius. Aquest objectiu s'ha dut a terme amb el programari de disseny gràfic "Rhinceros" i la seva extensió de "Grasshopper". El programa en qüestió és un programa de dibuix en 3D que es caracteritza per treballar amb superfícies complexes a un molt bon rendiment. L'extensió de "Grasshopper" és una eina que permet dibuixar a "Rhino" a partir d'una programació de blocs. L'execució d'aquests blocs connectats de manera consecutiva fa que el disseny de "Rhino" prengui una forma o una altra en funció dels paràmetres d'entrada estipulats.

És útil pensar en "Grasshopper" en termes de flux de dades, ja que la interfície gràfica està dissenyada per contenir fluxos d'informació dins i fora de determinats components. No obstant, són les dades, com per exemple llistes de punts o curves, els que defineixen la informació que circula. Per tant, la comprensió de com manipular les dades de la llista és fonamental per la correcta utilització d'aquesta eina. Amb aquesta, és possible tenir varies llistes de dades dins d'un mateix paràmetre. Per tant, s'ha de mantenir un sistema concret i exhaustiu per identificar cadascuna de les llistes individualment i poder tractar la informació completament. Degut a la complexitat d'aquest sistema, el seu creador, David Rutten, el va representar mitjançant un diagrama d'arbre ben estructurat com el de la figura 4.

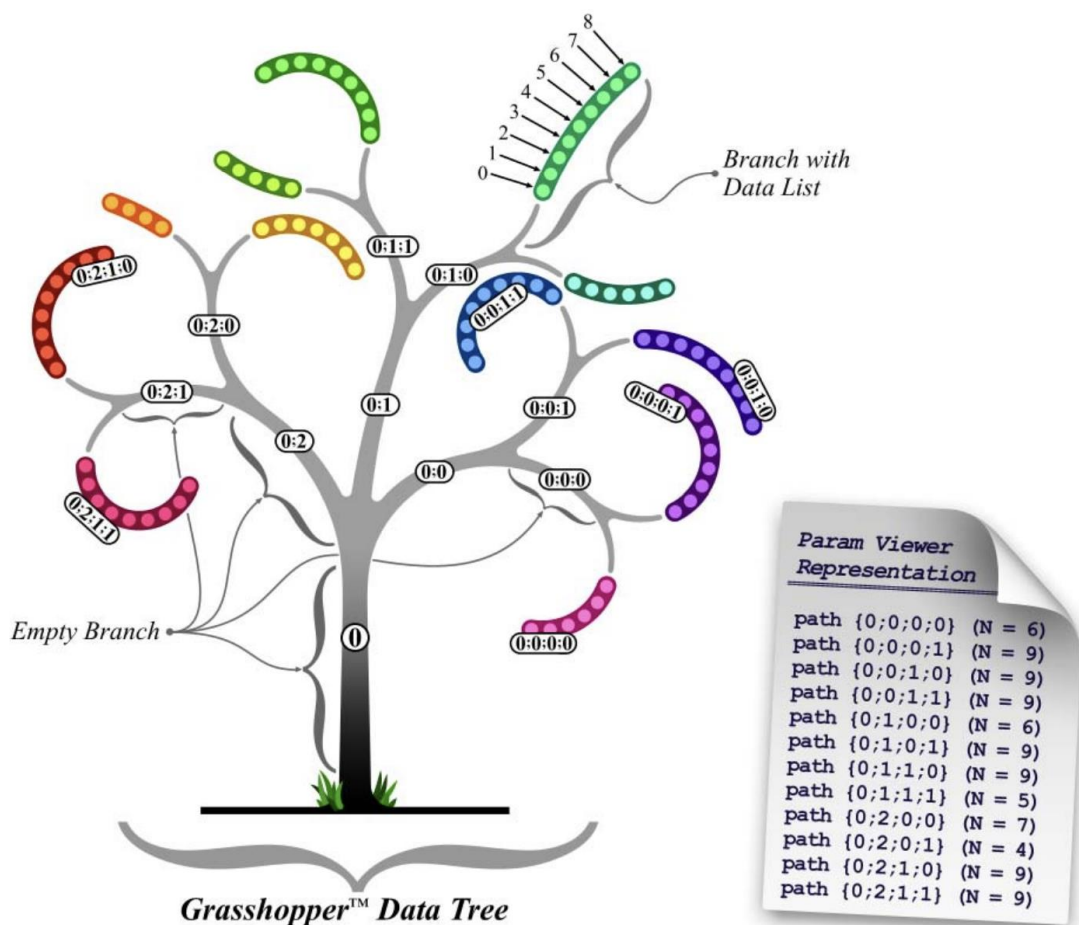


Figura 4: Arbre de dades de Grasshopper. (Issa, 2009)

En aquest diagrama es mostra l'existència d'una branca mestra a la ruta (0). D'aquest primer tronc, es generen tres branques més que hereten l'índex de la branca mare i aporta el seu propi subíndex (0:0, 0:1, 0:2). Les branques es poden anar subdividint fins que aconseguen el seu estat de nidació i hi trobem algunes dades. Les llistes de dades estan representades per línies gruixudes de colors i cadascun dels elements que la formen amb un punt brillant. Per tant, cada element de dades disposa d'un índex que especifica la seva ubicació dins de la branca i cada branca té una ruta que especifica la seva ubicació dins l'arbre.

4.1 Disseny paramètric de l'estructura

En el cas d'aquest projecte s'ha realitzat un disseny de línies i punts que descriuen els elements de l'estructura estàndard dissenyada prèviament. Cada línia ha esdevingut un element de l'estructura i cadascun dels punts fan referència als nodes i unions d'aquesta mateixa. Les possibilitats dels programaris emprats permeten realitzar variacions del dibuix a partir d'uns paràmetres d'entrada variables que s'han definit a continuació.

Com s'ha esmentat anteriorment, cal remarcar que l'eix de coordenades del programari de parametrització és diferent al del programari "Diamonds" emprat pel disseny base. En aquest cas, l'eix global Z és el vertical i que per tant defineix l'alçada de l'estructura. La planta del model ve definida per l'amplada sobre l'eix global X, i la longitud sobre l'eix global Y.

4.1.1 Paràmetres d'entrada

Gràcies al procés de disseny base anterior s'han pogut avaluar les possibilitats de variabilitat del disseny i s'han determinat quines són les variables que defineixen l'estructura resultant. Aquestes queden reflectides a la següent taula 4.

Taula 4: Paràmetres d'entrada a l'algoritme

| Paràmetres d'entrada | Eix | Moviment | Unitats | Valor mínim | Valor màxim | Rang |
|-----------------------------|------------|-----------------|----------------|--------------------|--------------------|-------------|
| Inclinació Mínima | Eix Y | rotació | % | 0 | 100 | 100 |
| Profunditat Superior | Eix X | translació | m | 0 | 10 | 10 |
| Profunditat Grada | Eix X | translació | m | 1 | 10 | 9 |
| Profunditat Inferior | Eix X | translació | m | 0 | 5 | 5 |
| Alçada Inferior | Eix Z | translació | m | 0 | 5 | 5 |
| Alçada Superior | Eix Z | translació | m | 2 | 5 | 3 |
| Alçada Coberta | Eix Z | translació | m | 0 | 4 | 4 |
| Longitud de la grada | Eix Y | translació | m | 10 | 40 | 30 |
| Quantitat de pòrtics | Eix Y | adició | unitat | 2 | 40 | 38 |

En primer lloc s'ha parametritzat la superfície total d'ocupació de la construcció. Tant sobre l'eix X (amplada) com sobre l'eix Y (longitud). La magnitud de longitud es veu afectada per un sol paràmetre: Longitud de la grada. En canvi, l'amplada de l'estructura es defineix a

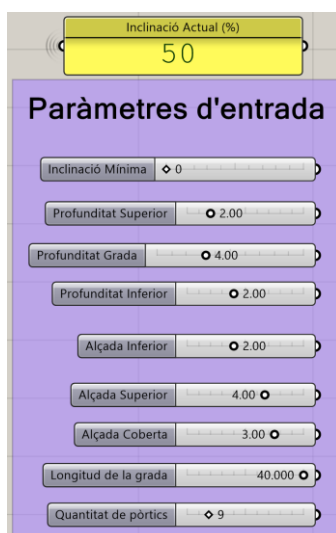
partir d'un conjunt de paràmetres que estructuraven les dimensions el pòrtic sobre l'eix X. S'han introduït tres variables que gestionen l'amplada de cadascuna de les zones del pòrtic: zona de circulació superior, zona inclinada i zona de circulació inferior. A aquests paràmetres se'ls hi ha donat el nom de "Profunditat Superior", "Profunditat Grada" i "Profunditat Inferior" respectivament a cada sector.

En segon lloc s'ha parametrizat l'alçada de la grada mitjançant dues opcions. La primera d'elles és la de definir les dues alçades, superior i inferior, resultant així una inclinació concreta. La segona opció és la de fixar una inclinació mínima de la zona central i amb la dimensió vertical d'una de les dues zones restants definir la resta de l'alçat del pòrtic. A més de definir aquests tres sectors, també s'ha interpretat la possibilitat de modificar la cota de la part posterior de l'estructura on es pot recolzar una futura coberta, no contemplada en aquest projecte. A tots aquests paràmetres verticals se'ls ha anomenat "Alçada Inferior" i "Alçada Superior" respectivament per cadascuna de les zones de circulació, "Inclinació mínima", en percentatge, de la zona de seients i per últim la "Alçada Coberta" on es col·locarà la corretja més elevada.

En tercer lloc s'han definit la quantitat de pòrtics consecutius que es volen construir al llarg de la longitud de la grada sobre l'eix Y global.

Aquestes variables s'han introduït a l'algoritme mitjançant el component "Number Slider" representat en la figura 5. El component utilitzat genera a la seva sortida un nombre que es pot modificar a través d'un control lliscant. Es pot definir la sortida d'aquest element de control mitjançant un valor mínim i màxim o bé el rang de variabilitat i el nombre de decimals que es desitgen. També existeix la possibilitat de limitar la sortida a nombres parells o imparells.

A més, en aquesta part inicial de l'algoritme s'ha incorporat un indicador de la inclinació (%) que esdevé dels paràmetres entrats en el moment concret de la lectura. Pels paràmetres del disseny bàsic la inclinació és del 50%.



| Paràmetre | Valor |
|-----------------------|--------|
| Inclinació Actual (%) | 50 |
| Inclinació Mínima | 0 |
| Profunditat Superior | 2.00 |
| Profunditat Grada | 4.00 |
| Profunditat Inferior | 2.00 |
| Alçada Inferior | 2.00 |
| Alçada Superior | 4.00 |
| Alçada Coberta | 3.00 |
| Longitud de la grada | 40.000 |
| Quantitat de pòrtics | 9 |

Figura 5: Paràmetres d'entrada de l'algoritme.

4.1.2 Restriccions d'alçada i inclinació

Per introduir la ubicació final dels punts que definiran el pòrtic ha sigut necessari, tot primer, estudiar totes les possibilitats d'entrada i preveure on pot fallar l'algorisme.

S'ha programat una rutina com la de la figura 6 que aplica restriccions als paràmetres d'alçada per tal de complir amb la inclinació mínima. Al incorporar dues opcions d'entrada per l'eix vertical, alçades i inclinació, s'ha elaborat aquesta rutina que assegura el compliment de la inclinació mínima sigui quina sigui l'entrada de les alçades. En cas de no voler restringir l'alçada, el valor mínim d'inclinació s'ha de disposar en posició nul·la i definir l'estructura únicament amb els paràmetres d'alçada.

Per aconseguir les restriccions desitjades s'ha calculat la inclinació de la grada a partir dels nombres entrats. Si aquest valor és inferior al de la inclinació mínima estipulada, la rutina calcula el valor que ha de tenir l'alçada superior per complir les demandes de l'usuari i les introdueix a la rutina principal.

És també en aquesta secció on, en funció del valor de l'alçada superior estipulada per la rutina, es calcula l'indicador de la inclinació actual de l'estructura.

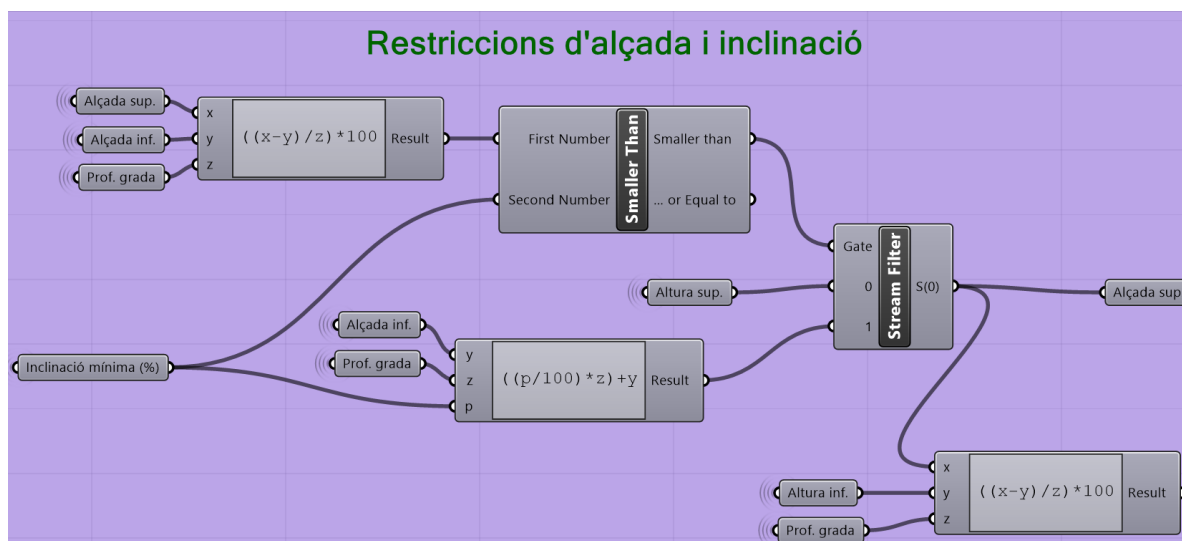


Figura 6: Rutina per la restricció dels paràmetres d'entrada.

4.1.3 Generació del pòrtic

El pòrtic de l'estructura dissenyada preliminarment està formada per quatre punts base, els quatre punts del cordó i un punt superior que determina l'alçada de la coberta. Amb la rutina representada a la figura 7 s'han dibuixat aquests punts que defineixen el pòrtic.

Un punt està definit per la informació referent a les tres coordenades de cada eix que determinen la seva posició en l'espai. Per tant, el programari gestiona els punts com una informació numèrica de tres valors diferents. D'aquesta manera es generen les llistes de punts, és a dir, de coordenades, amb les que s'ha treballat per dibuixar l'estructura.

A partir d'un punt inicial a les coordenades de l'origen, generat amb el component "Construct Point", i el component de translació anomenat "Move" s'han dibuixat les altres referències en funció dels paràmetres d'entrada de l'algorisme: alçades i profunditats. Degut a que amb un sol component "Move" es realitza la translació sobre l'eix Z dels dos punts del sector

superior és necessari el component “Explode Tree”. Aquest component separa la informació d'una sola branca que conté més d'una llista en branques separades d'una sola llista cadascuna. Per tant, s'han pres les coordenades del primer punt del cordó que forma el sector més elevat per dibuixar el punt superior de coberta amb un altre component “Move”, realitzant la translació corresponent en direcció Z.

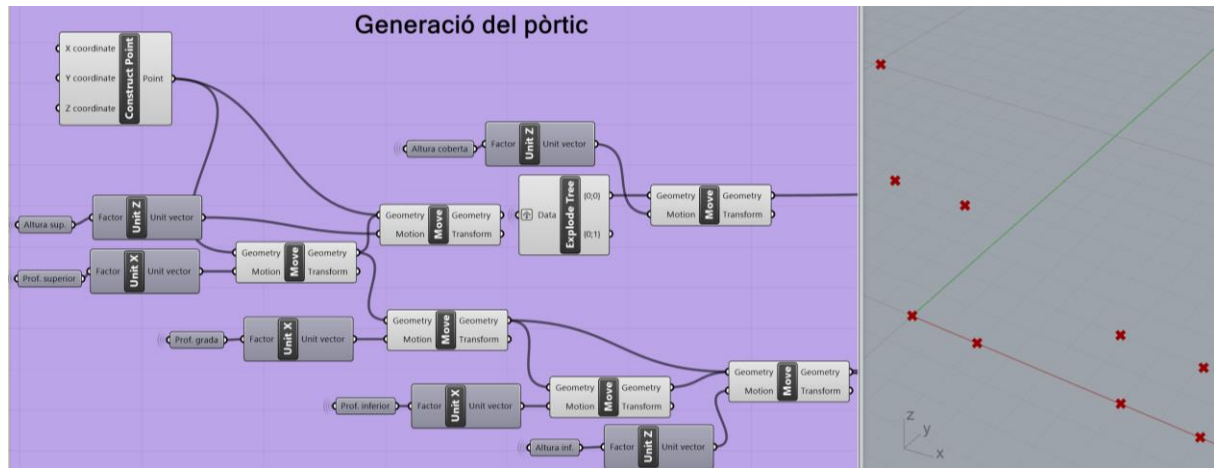


Figura 7: Rutina per la generació dels punts que defineixen el pòrtic.

Amb tots els punts que defineixen el pòrtic dibuixats s'han format les línies d'aquest mateix. En primer lloc, s'ha format la línia que representa el cordó de l'estructura. L'encarregat de fer-ho és el component “PolyLine” que, amb les coordenades de tots els punts que la formen, és capaç de dibuixar una línia contínua.

En segon lloc, ordenant les coordenades amb el component “Entwine”, que permet ajuntar informació en l'ordre desitjat, i tractant dues llistes diferents com els punts base i els punts del cordó, s'han generat les quatre línies que formen les columnes principals del pòrtic mitjançant el component “Line”. Aquest component relaciona els ítems un a un de les dues llistes d'entrada: “Start Point” pels punts base i “End Point” pels punts del cordó.

S'ha executat el mateix procediment per dibuixar les línies que representen les diagonals de les zones superior i inferior. Aquest cop però, les llistes de punts s'han de tractar per tal de seleccionar únicament els dos punts que formen cada diagonal. El component “Shift List” és el que permet esborrar ítems cuers o davanters d'una llista. El nombre d'ítems retallats es determina mitjançant una entrada de text en el born d'entrada “Shift”. Havent tractat les llistes amb aquest component s'ha agafat el primer punt base i el segon punt del cordó per fer la diagonal superior i el quart punt base i el tercer punt del cordó per dibuixar la diagonal inferior.

Per acabar de dibuixar el pòrtic completament, s'ha generat una nova línia des del primer punt del cordó fins al punt superior. Aquesta línia s'ha anomenat columna de coberta.

La rutina que permet aquesta generació queda representada a la figura 8.

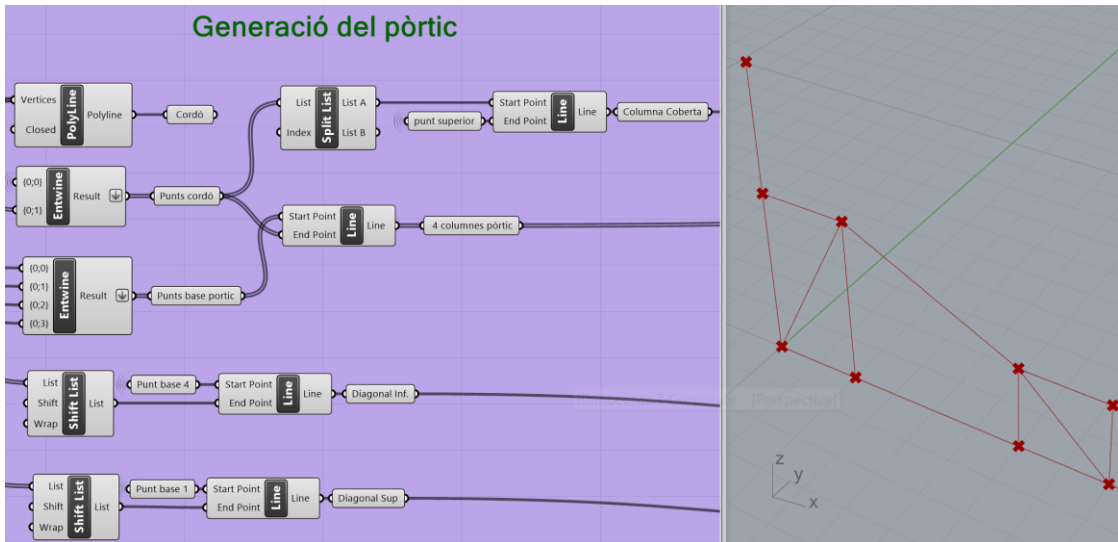


Figura 8: Rutina per la generació de les línies que defineixen el pòrtic.

Per determinar correctament totes les possibilitats del disseny s'ha dut a terme un treball previ de recollida d'informació booleana. S'han detallat diverses variables de cert o fals amb les quals s'ha basat la rutina de generació del disseny al complet. Com es representa a la figura 9, cal saber si, l'alçada inferior i les dues profunditats, inferior i superior, són més gran que zero. En cas que alguna d'aquestes variables sigui falsa és indicador de la superposició de línies del dibuix. Aquest fenomen és important quan es treballa amb aquest programari ja que cada línia de la llista tindrà virtut d'element de l'estructura i el programa no discriminarà. Ubicarà dos elements iguals, un sobre l'altre. Fet que, afectarà al càlcul de l'estructura com per exemple desvirtuant el pes total de l'estructura.

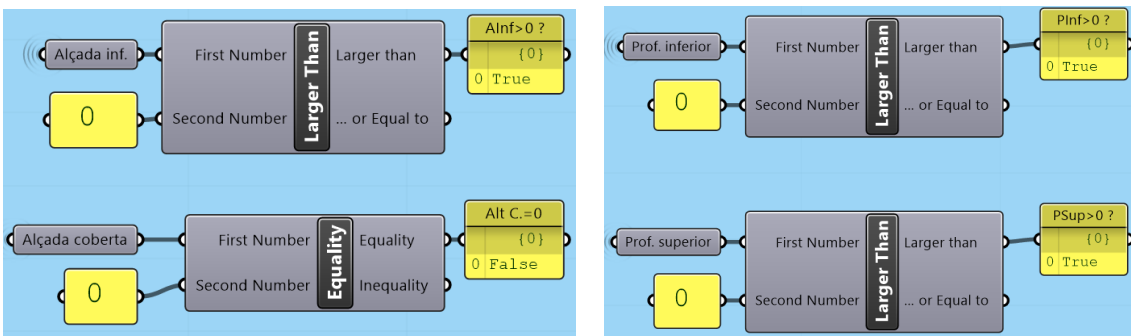


Figura 9: Rutines per obtenir informació booleana.

Per exemple, quan la profunditat superior o inferior és igual a zero, les diagonals es superposen a les columnes. Per tant, per discriminar aquestes diagonals de la resta s'ha programat una rutina com la representada a la figura 10.

El component "Stream Filter" s'utilitza de filtre que deixa avançar una informació o l'altra en funció de la seva entrada al born "Gate". En aquest cas existeixen dues variables que afecten la diagonal inferior i una sola que afecta la superior. Pel que fa al sector inferior, mitjançant una porta lògica, es determina si tant l'alçada com la profunditat del sector són més grans que zero. En cas que una d'aquestes dues variables sigui falsa, el filtre no aportarà informació a la sortida. En canvi, l'alçada del sector superior no serà mai inferior a zero degut a les característiques del paràmetre d'entrada "Alçada Superior" explicades a

l'apartat "4.1.1 Paràmetres d'entrada" d'aquest projecte. Per tant, sense necessitat de portes lògiques, s'ha comprovat la profunditat superior per discriminar les diagonals d'aquest sector.

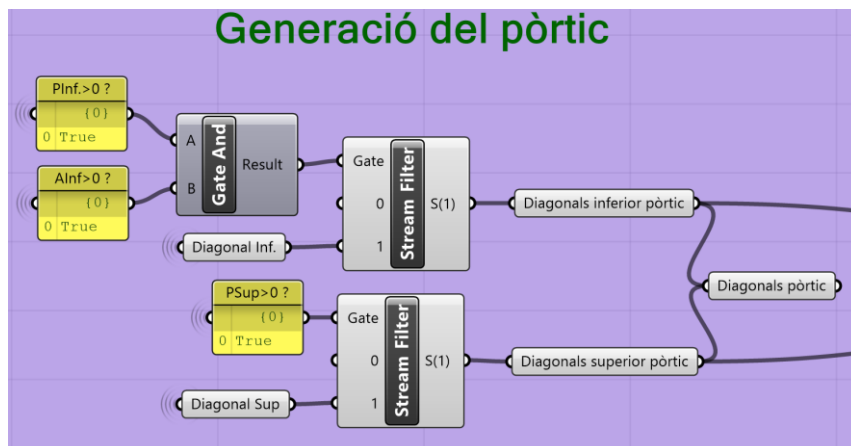


Figura 10: Rutina per la discriminació de les diagonals superposades.

Aquesta superposició també es pot trobar amb les línies que formen les columnes. En aquest cas, les variables que afecten el transcurs de la informació són les mateixes que en el cas de les diagonals, les profunditats superior i inferior i l'alçada inferior. Com es representa a la figura 11, en aquest cas es parteix d'una llista de 4 línies. Les quatre columnes principals del pòrtic, sense tractar la columna de coberta, aquesta es tractarà més endavant en l'algorisme. La llista en qüestió es divideix en dues de diferents mitjançant el component "Split List". Amb les columnes superiors i inferiors separades en dues llistes diferents, s'ha treballat amb components "Stream Filter" per filtrar la informació en funció de les variables tingudes en compte. D'aquesta manera s'ha obtingut una llista anomenada "Columnes pòrtic" que únicament conté les columnes mínimes i necessàries per subjectar els cordons en tot moment, evitant les superposicions.

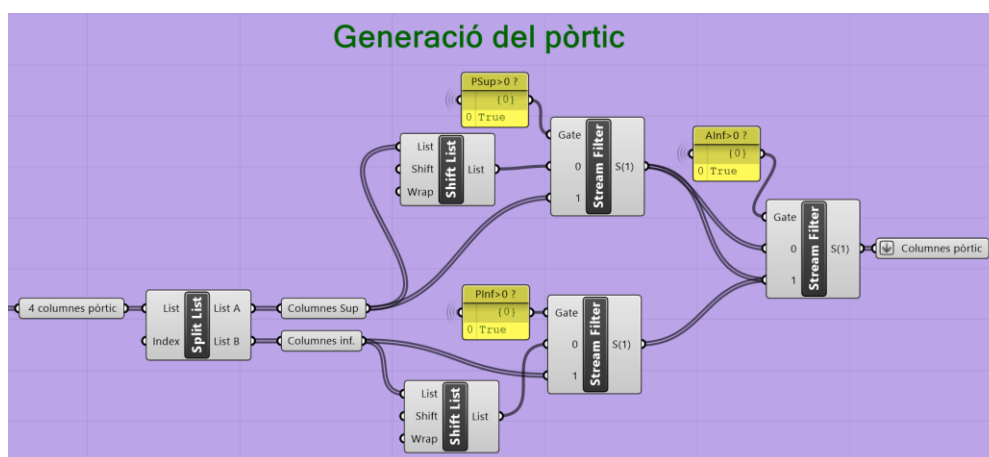


Figura 11: Rutina per la discriminació de les columnes superposades.

Una informació important a tenir en compte és que en aquest algorisme de disseny no s'han implementat rutines per discriminar punts superposats. Els punts no es converteixen en elements del model i per tant no afecten al correcte funcionament del càlcul.

4.1.4 Generació de profunditat

Una vegada s'ha dibuixat el pòrtic correctament en el pla XZ sense superposicions, s'ha fet créixer l'estructura en el sentit de l'eix Y. Com es pot veure a la figura 12, s'han utilitzat tants components "Move" com llistes de punts i línies es volen traslladar. Mitjançant l'entrada "Motion" d'aquest component s'introdueix la informació de quantes vegades s'ha de copiar el pòrtic i a quina distància de separació entre elles. Aquestes dades es generen a partir del component "Series". Aquest extreu una llista de valors d'una longitud igual a la indicada al seu born d'entrada "Count" i separats per una diferència sol·licitada a l'altra entrada "Step". Si no s'indica el valor de començament de la llista, aquesta comença sempre amb un valor de zero per defecte. El pòrtic es trasllada tantes vegades com el paràmetre d'entrada anomenat "Quantitat de pòrtics" indiqui i la distància entre ells s'ha determinat per l'expressió següent:

$$\text{step} = \frac{\text{Longitud de la grada}}{(\text{Quantitat de pòrtics} - 1)} \quad (1)$$

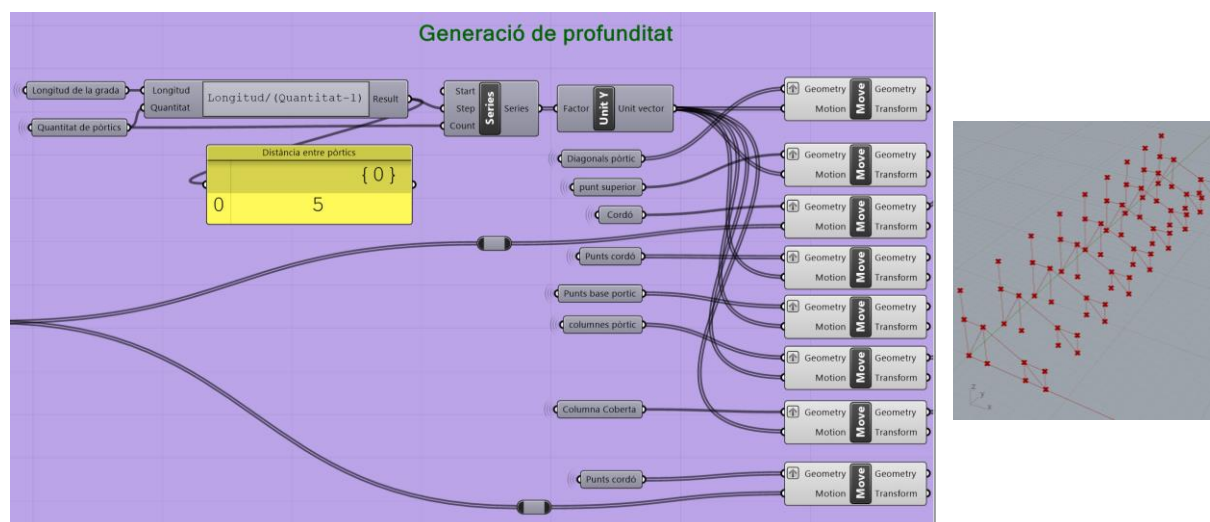


Figura 12: Rutina per la translació dels pòrtics al llarg de la grada.

Els components "Move" que traslladen el cordó i els seus punts estan connectats a una entrada "Motion" diferent. S'ha realitzat una subrutina que torna a calcular la separació entre cordons. Per tant, la distància entre cordons és una variable que també s'ha restringit tal i com es mostra a la figura 13. Aquesta restricció es pot modificar alterant el valor anomenat "Màxima distància entre pòrtics". Aquesta distinció s'ha plantejat degut a la idea estructural del disseny. Com s'ha comentat en els apartats de disseny base, sobre els cordons s'hi recolzaran unes plaques alveolars de formigó prefabricat. Segons el catàleg d'aquestes, en funció del model i de la càrrega que han de suportar es caracteritzen per una longitud màxima. Així doncs, en aquest algoritme també s'ha tingut en compte la possible modificació d'aquest paràmetre per dissenys futurs.

Per realitzar la restricció de distància mínima entre cordons del pòrtic primerament s'ha avaluat i comparat la distància entre pòrtics resultant de la fórmula 1 amb la separació màxima permesa. En cas que la distància sigui superior a la permesa, es genera una nova llista d'informació amb el component "Series" que dona les divisions necessàries per complir

la restricció. Es treballa amb nombres enters ja que el nombre de divisions no es pot fraccionar més enllà de la unitat. Aquesta nova llista de separacions s'ha entrat als components "Move" que traslladen el cordó i els punts d'aquest mateix.

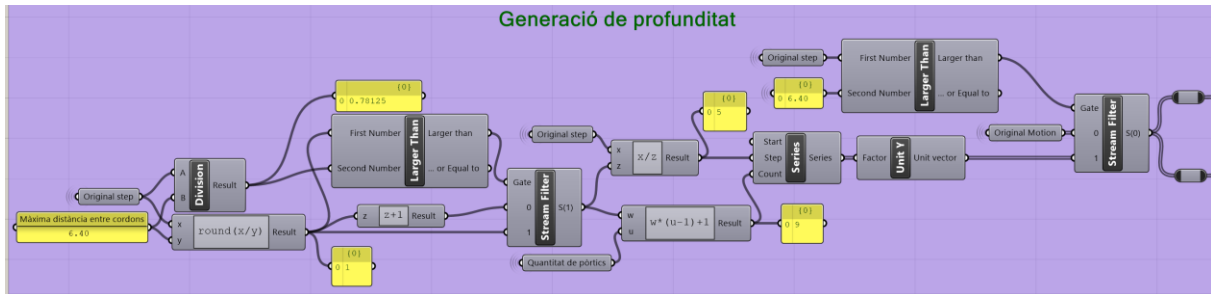


Figura 13: Rutina per la restricció de la distància mínima entre cordons.

Per acabar amb el creixement del disseny sobre l'eix Y s'han ajuntat tots els punts consecutius del pòrtic amb les línies anomenades corretges. Com es veu a la figura 14 s'ha elaborat una rutina que genera i discrimina les superposicions d'aquests elements. La coincidència en l'espai de dues línies d'aquest tipus es pot donar quan alguna de les dues profunditats, superior o inferior, és igual a zero o bé quan l'alçada de la coberta és també de valor nul. D'aquesta manera, s'ha treballat amb els components "Shift List" per generar les llistes que interessin i amb el component "Stream Filter" per filtrar la informació que avança per l'algorisme. Per completar les llistes de corretges s'han generat les línies que les formen mitjançant el component "Line SDL". Aquest component crea una línia contínua des d'un punt d'inici fins a una longitud indicada. Per tant, al començament d'aquesta rutina s'han ordenat els punts del pla ZX a traslladar en una sola llista mitjançant el component "Entwine". Primer el superior i tot seguit la llista de punts del cordó. El paràmetre "Longitud de la grada" és el que s'ha utilitzat per introduir la longitud de les corretges.

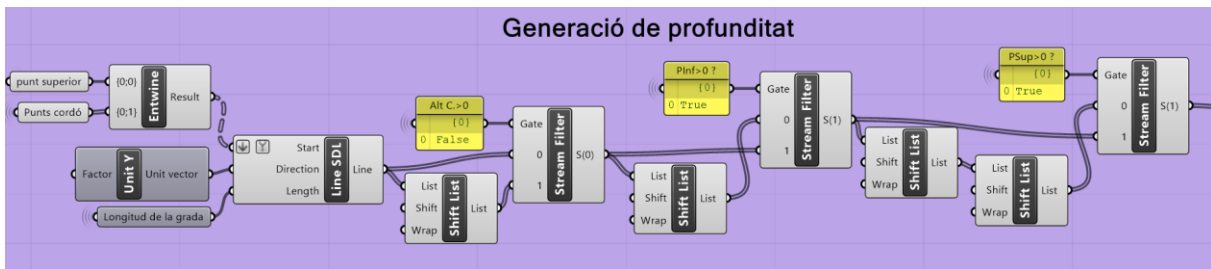


Figura 14: Rutina per la generació de les corretges.

La rutina representada a la figura 15 és la que separa les línies contínues de corretja en diferents segments i obté el dibuix del que seran les corretges realment al model de càlcul. Per fer-ho s'ha utilitzat el component "Divide Curve". Aquest, divideix una línia o corba en tants segments iguals com el valor que s'especifiqui al seu born d'entrada "Count". Per deixar parametritzat aquest valor s'ha agafat la llista "Series", que prové de la rutina on s'estableix la distància entre cordons (figura 13) i s'ha comprovat la longitud de la llista mitjançant el component "List Length". S'ha restat la unitat a la quantitat d'ítems que conté aquesta llista per assegurar-se que sempre es divideix la corba en tants segments com separacions hi ha entre cordons. La sortida del component "Divide Curve" és una llista dels punts que defineixen aquests segments. Per tant, amb aquesta llista s'han relacionat els punts consecutius (el primer amb el segon, el segon amb el tercer, el tercer amb el quart...)

mitjançant el component “Relative Item”. Amb aquest component es generen dues branques o llistes diferents, una comença amb el primer punt de la llista d'entrada i la segona comença pel segon. Si s'aplica un “Graft ↑” a cada llista, cada una d'elles es ramifica tantes vegades com nombre d'ítems existeixen al seu interior. Per tant, al aplicar el component “Merge” sobre aquestes dues ramificacions, els ítems de cadascuna de les branques es fusiona amb la mateixa branca de l'altra llista. Així s'ha aconseguit la relació que es pretenia: ajuntar el punt inicial i final de cada segment en una llista per separat. Amb el component “Split List” s'aconsegueixen finalment les dues llistes de coordenades que serveixen d'entrada al component “Line” que genera cada un dels segments que s'acabaran esdevenint les corretges del model.

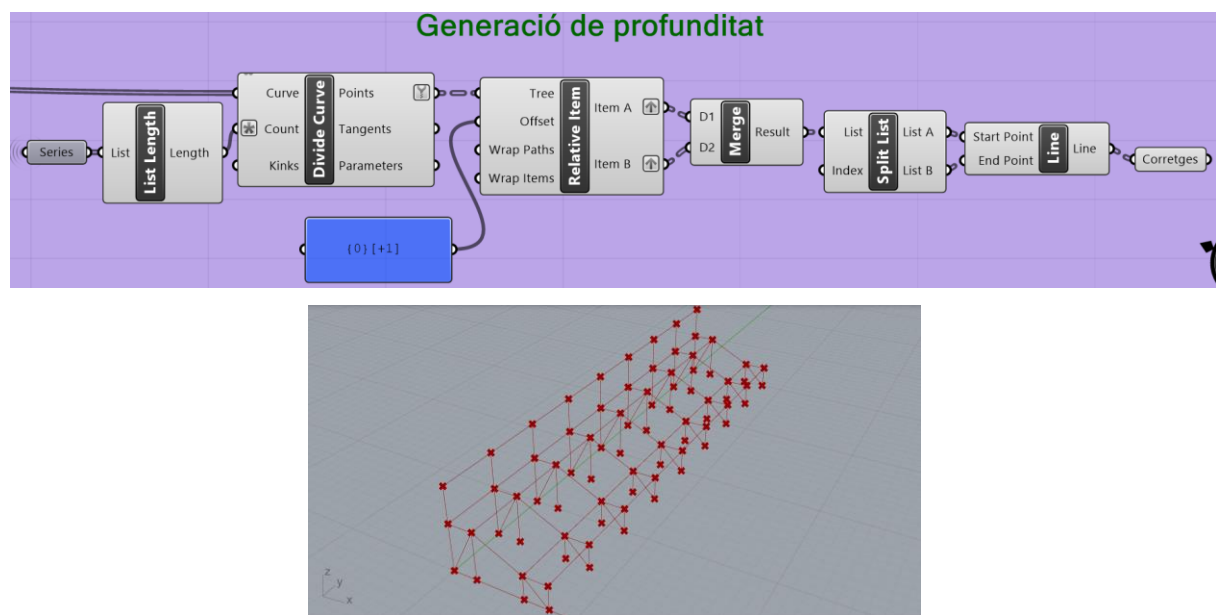


Figura 15: Rutina per la separació en trams de les corretges.

L'última acció que s'ha portat a terme pel que fa a la generació de profunditat no té cap relació amb el creixement del disseny en direcció l'eix Y però sí que serà important a tenir en compte a l'hora d'aplicar les càrregues. És, un altre cop, la divisió de línies en diferents segments per tal que acabin esdevenint elements independents del model. En aquest cas, es tracta de la divisió del cordó dels pòrtics en tres segments diferents: superior, inclinat i inferior. La rutina de la figura 16 mostra com s'ha procedit en aquest cas. S'ha utilitzat el component “Explode”. L'entrada “Curve” d'aquest component és un llistat de polilínies, una per cada cordó, provinent del component “Move” de la figura 12. Aquestes polilínies estan formades per tres segments i quatre vèrtex. Doncs el component en qüestió és capaç de retornar, a aquesta entrada, un arbre amb tantes ramificacions com polilínies han entrat. Cada ramificació està formada per una llista dels tres segments o pels quatre vèrtex que formen la polilínia d'entrada, en funció del born de sortida. Com que es vol obtenir una llista dels segments similars de cada cordó, s'utilitza el component “Flip Matrix” el qual transforma les columnes de dades en files i genera tres llistes de tants ítems com polilínies han entrat a la rutina. Amb un “Explode Tree” s'ha separat cadascuna de les branques de l'arbre generat i s'ha obtingut la informació dels segments de cordó en funció de la seva ubicació: Cordons superiors, cordons inclinats i cordons inferiors.

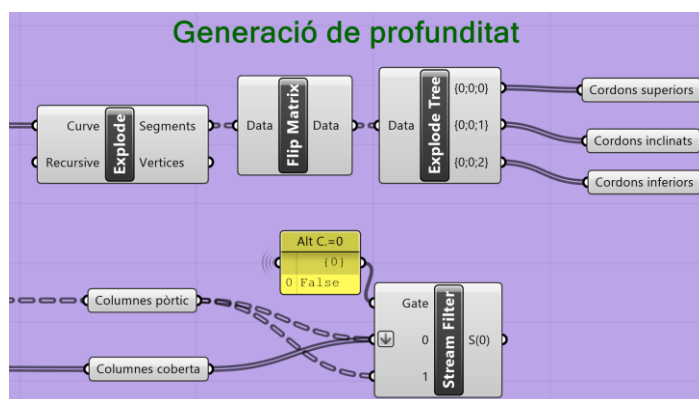


Figura 16: Rutina per la separació en trams dels cordons.

4.1.5 Creus de Sant Andreu

Una vegada ja s'ha definit el pòrtic, traslladat tantes vegades com sol·licita l'usuari i enllaçat tots ells amb les corretges, s'ha culminat el dibuix paramètric afegint-hi les creus de Sant Andreu. Com s'explica al procés del disseny base, aquestes creus estan ubicades entre els dos primers i dos últims pòrtics. Aquests elements actuen d'estabilitzadors quan l'estructura vol rotar sobre l'eix X, principalment degut a la força lateral del vent.

Per dibuixar aquestes línies de forma paramètrica, tot primer s'han seleccionat els punts que les formaran seguint la rutina de la figura 17. S'ha partit de dues llistes: els punts base i els punts del cordó. Els ítems d'aquestes dues branques estan ordenats de tal manera que primer es llisten tots aquells punts on la coordenada X és zero i s'incrementa la coordenada Y. És a dir, si el disseny té nou pòrtics, els nou primers punts base de la branca seran els que formen part de les columnes posteriors de l'estructura. La branca de punts del cordó es defineix de la mateixa manera però amb la diferència que la coordenada Z dels punts sempre és diferent de zero. Per tant, amb el component "Split List" s'han seleccionat els dos primers ítems de cada llista: punts base i punts del cordó. El born "Índex" és una entrada numèrica d'un nombre enter a partir del qual el component dividirà la llista en dos: "List A" i "List B". Si en aquest born d'entrada s'hi especifica un dos, la "List A" estarà formada pels dos primers ítems de la llista original i la "List B" la formaran resta de punts. D'aquesta manera ja s'obtenen els quatre punts que formaran la creu de Sant Andreu posterior, els dos primers punts de cadascuna de les branques originals.

Per la creu anterior s'han agafat els últims dos punts de cada branca original. En aquest cas però, si l'entrada "Índex" del segon component "Split List" no és variable, l'algoritme no treballarà bé quan es canviïn els paràmetres d'entrada ja que la longitud d'aquestes branques diferirà en cada cas. Per tant, aquesta informació s'ha d'enllaçar amb les variables del disseny. Perquè la rutina sempre obtingui la solució correcta s'ha entrat una expressió al born "Índex" que depèn del nombre de punts base i la quantitat de pòrtics del disseny. Fent la multiplicació d'aquestes dues variables obtenim la quantitat total d'ítems que formen les branques originals. Com que es volen obtenir els dos últims punts de cada llista es sostrauen mitjançant la "List B".

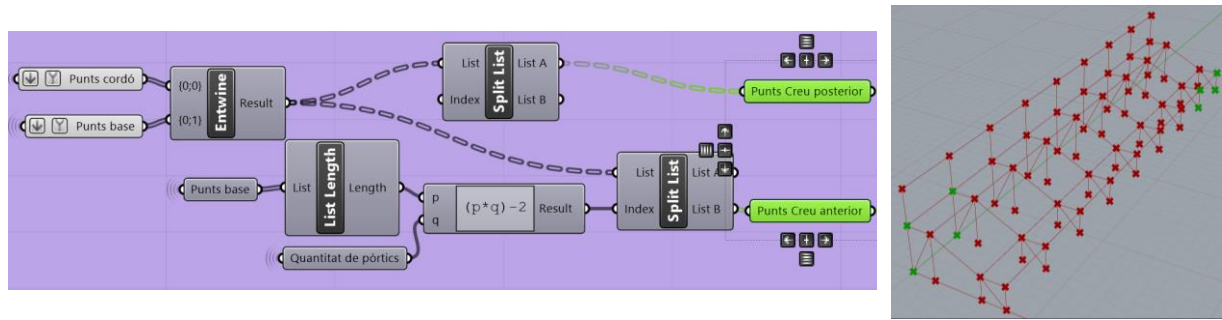


Figura 17: Rutina per la selecció dels punts que formen les creus de Sant Andreu.

Amb els punts que formen les línies de cada creu, posterior i anterior, s'ha elaborat la rutina de la figura 18 per representar-les i traslladar-les a la posició indicada.

Crear les línies a partir dels "Punts Creu posterior" i "Punts Creu anterior" s'ha executat amb el component "Line" ja esmentat anteriorment en la resta de rutines. Abans, perquè s'enllacin els punts adequats s'ha aplicat un "Reverse" als dos primer punts. Sense aquesta acció, degut a l'ordre que mantenen els punts en les branques d'entrada d'aquesta rutina, es formarien línies verticals superposant-se a les columnes. Així doncs, s'ha enllaçat el punt superior corresponent amb el punt base de la seva diagonal.

Després d'obtenir dues branques anomenades "Creu posterior" i "Creu anterior", cadascuna d'elles formada per les dues línies que esdevenen una creu de Sant Andreu, cal traslladar-les a l'altre costat de l'estructura en direcció a l'eix Y. Aquest moviment s'ha realitzat, un altre cop, amb el component "Move". El moviment de translació de línies en qüestió, també depèn de les variables d'entrada de l'algoritme. Concretament s'ha utilitzat una expressió que depèn de la quantitat de pòrtics dibuixats i la distància entre ells. Cal fixar-se en que la creu anterior s'ha de traslladar en el sentit negatiu de l'eix. És per això que a l'entrada "Motion" del segon component "Move" s'ha utilitzat la mateixa expressió canviada de signe. Ajuntant les dues creus de cada façana de l'estructura en una mateixa branca s'han aconseguit dues llistes més anomenades "2 Creus posteriors" i "2 Creus anteriors".

En el cas que el nombre de pòrtics tan sols sigui de dues unitats, les creus dissenyades inicialment no s'hauran de traslladar. És per això que s'aplica un filtre amb la condició que si el nombre de pòrtics és igual a 2, tan sols deixa passar les dues primeres branques: "Creu posterior" i "Creu anterior".

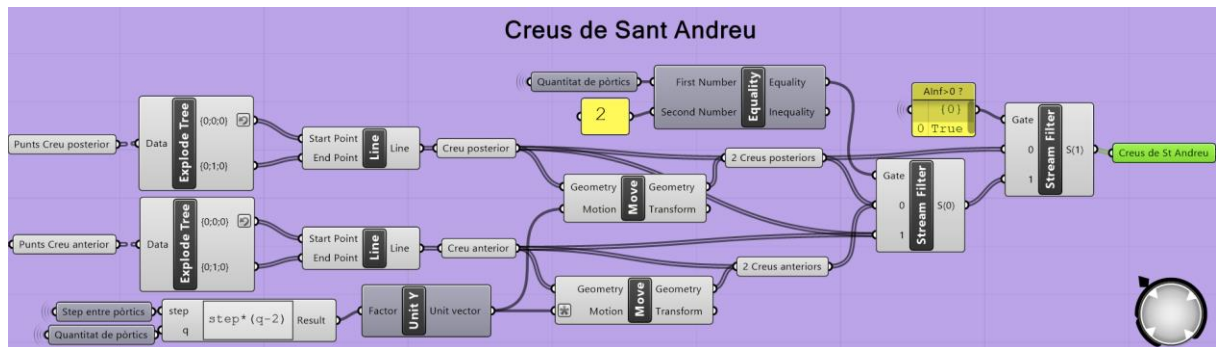
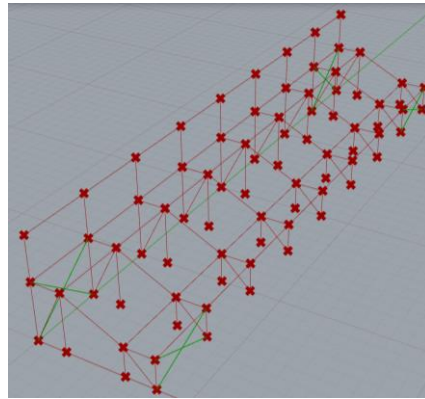


Figura 18: Rutina per la generació de les creus de Sant Andreu.

Una vegada s'han generat tots els elements que formen la branca "Creus de St Andreu" s'ha avaluat la possibilitat de superposició de línies no desitjades. Com ja s'ha comentat al principi d'aquest apartat, la funció d'estabilització de les creus és compartida amb les diagonals. És per això que les branques de diagonals i creus de Sant Andreu es tracten com elements similars i es fusionen tots en una única branca anomenada "Diagonals". A la rutina que es mostra a la figura 19 s'ha comprovat si dins de cadascuna de les llistes de diagonals existeix algun paràmetre nul. Aquest paràmetre nul és el que indica la línia suprimida degut a la superposició amb les columnes en qüestió. Una vegada s'obté aquesta informació booleana, de cert o fals, es gestiona per filtrar el disseny. Si les dues llistes contenen nombres nuls, és a dir, la profunditat inferior i la superior són iguals a zero, la rutina només permet dibuixar les creus de St. Andreu. En canvi, en el cas en que només una de les llistes contingui línies per dibuixar, el filtre deixa passar tota la informació. Si part d'aquesta informació és nul·la el programa no la dibuixa ni la gestiona. No passa el mateix si la totalitat d'una llista és de caràcter nul, el programa entra en error. És per aquest motiu que s'ha introduït aquest últim filtre.

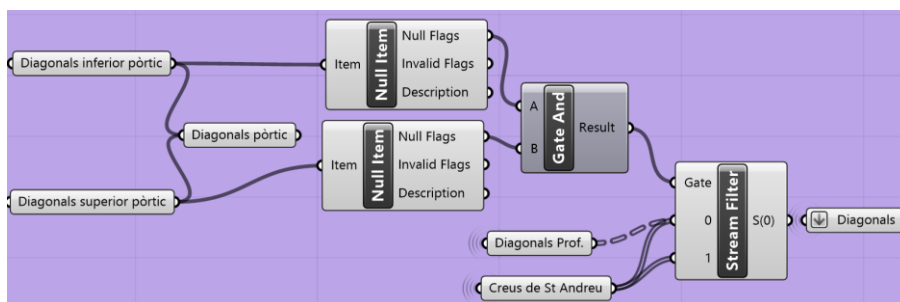


Figura 19: Rutina per discriminar les diagonals i creus de Sant Andreu.

4.1.6 Paràmetres de Sortida

Tot el procés descrit en els apartats anteriors ha permès obtenir un disseny que depèn de les dades que prefereix l'usuari. Aquest algoritme, així com té uns paràmetres d'entrada també disposa d'uns paràmetres de sortida que serviran per introduir propietats a l'estructura i comprovar el seu comportament. Tal i com es pot veure a la figura 20, els paràmetres de sortida resumeixen en un nombre total de nou branques d'informació la totalitat del disseny paramètric que s'ha elaborat a partir de les rutines mostrades. Aquestes branques estan resumides a la taula 5.

Taula 5: Resum de paràmetres de sortida.

| Paràmetre de sortida | Descripció |
|-----------------------------|---|
| Cordons superiors | Conjunt dels segments del cordó que formen el sector superior de la grada. |
| Cordons inclinats | Conjunt dels segments del cordó que formen el sector inclinat de la grada. |
| Cordons inferiors | Conjunt dels segments del cordó que formen el sector inferior de la grada. |
| Columnes | Grup de línies verticals que uneixen els punts base amb els del cordó i el grup de punts superior de coberta. |
| Diagonals | Línies d'arriostament de cada pòrtic i creus de Sant Andreu. |
| Corretges | Conjunt de segments que uneixen els pòrtics entre punts del cordó i el superior de coberta. |
| Punts superiors | Llistat de coordenades on s'ubiquen els punts més elevats del pòrtic |
| Punts del cordó | Llistat de coordenades que formen el conjunt de segments cordó i dibuixen el perfil del pòrtic. |
| Punts base | Llistat de coordenades on l'estructura està en contacte amb el sòl. |

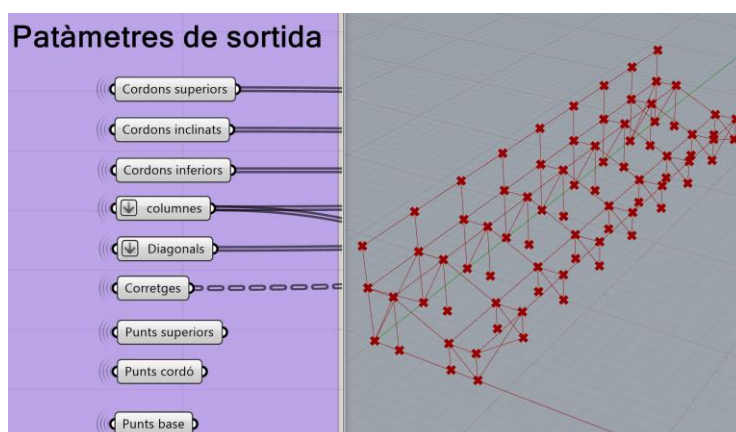


Figura 20: Paràmetres de sortida de l'algoritme parametritzat.

4.2 Càlcul paramètric de l'estructura

El disseny paramètric elaborat s'avalua amb l'extensió de "Grasshopper" anomenada "Karamba3D". Aquest "plug-in" proporciona nous components a la programació paramètrica que permeten realitzar el càlcul de l'estructura simultàniament al canvi de variables. És una extensió molt potent que s'ha utilitzat en aquest projecte per determinar els resultats del disseny.

El càlcul paramètric de l'estructura consta de diferents parts:

En primer lloc, s'ha de definir el model de càlcul a partir del disseny paramètric obtingut de l'algoritme de disseny. Així doncs, el gran gruix d'aquest algoritme de càlcul consisteix en definir els elements i les seves unions a partir dels paràmetres de sortida del disseny.

En segon lloc, s'han definit les càrregues contemplades al càlcul. Aquestes s'han enllaçat a nous paràmetres d'entrada variables, en forma de "Number Slider", amb els quals es pot incidir en el valor de càrrega establert.

Per últim, s'han incorporat els components necessaris per l'anàlisi i la visualització desitjada del model calculat. El model paramètric en aquest projecte vol ser similar al disseny bàsic elaborat amb el programari de càlcul estructural "Diamonds" amb l'objectiu de comprovar el correcte funcionament del procés de disseny emprat.

4.2.1 Elaboració del model de càlcul

El model s'ha generat únicament amb un component de "Karamba3D" anomenat "Assemble Model". La figura 21 representa la rutina que s'ha implementat prèviament a l'entrada d'aquest component. Per començar, s'ha ordenat tota la informació de sortida de l'algoritme de disseny amb el bloc "Entwine". L'ordre amb el que s'han ordenat les branques és important ja que aquest arbre s'ha introduït en el component "Line to Beam" que crea un element per cada línia d'entrada i per tant, interpreta les branques d'entrada com a elements diferents. Aquest bloc també sol·licita un identificador per cadascun dels elements, el qual s'introdueix a partir d'un panell, i un color, que serà necessari per la visualització del model. A més, per comprovar que el model es genera correctament, s'ha incorporat el càlcul de l'allargada de cadascuna de les branques d'entrada amb el component "List Length". És una manera de comprovar, per exemple, si el nombre de columnes entrades al model és correcte.

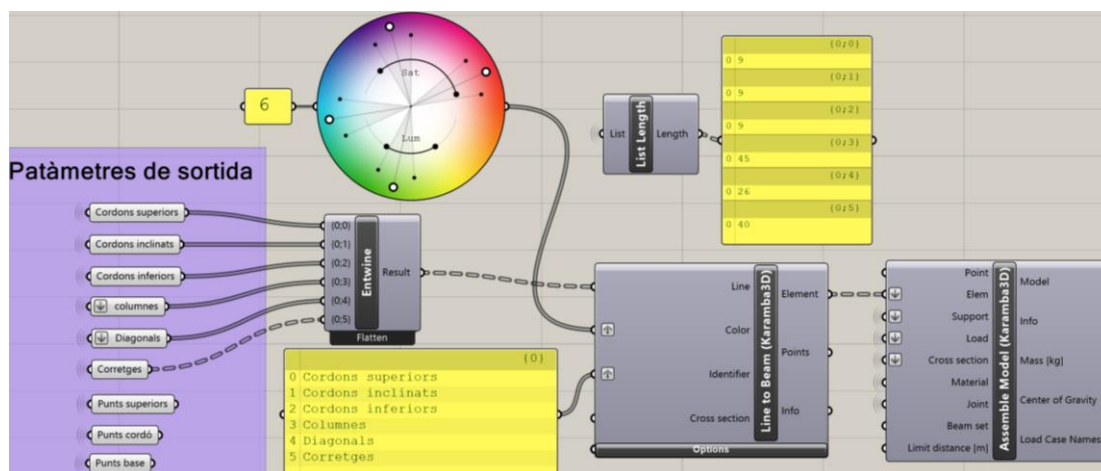


Figura 21: Rutina per la generació del model de càlcul.

4.2.1.1 Material i Secció transversal dels elements:

Per definir els elements del model s'ha introduït el material i la secció dels perfils metàl·lics al component "Assemble Model" mitjançant la rutina de la figura 22.

El "Karamba3D" disposa d'una biblioteca extensa tant de seccions de perfils metàl·lics com de materials usats habitualment en la construcció. Tot i així, permet la introducció d'altres materials mitjançant l'entrada de les seves propietats amb components que no s'han utilitzat en aquest projecte. Concretament s'han utilitzat els components "Material Selector" i "Cross Section Range Selector". Aquests blocs permeten seleccionar un material o secció transversal de la biblioteca existent mitjançant un conjunt de filtres.

Pel que fa a la biblioteca de materials es filtra per família i nom. Al model que s'ha calculat s'estableix un acer S275 per tots els elements. En canvi, la biblioteca de seccions és més extensa i es classifica primerament en països, tot seguit per la forma del perfil i per últim amb el nom de la família. Per tant, aquest selector no proporciona directament la secció transversal desitjada sinó que extreu un primer llistat amb tots els perfils d'aquella família resultant d'aplicar tots els filtres establerts. És amb el component "Cross Section Selector" que s'ha determinat la secció transversal concreta per cada element d'entrada específic. La llista d'elements a determinar i el nom de les seccions escollides s'introdueixen al component en forma de text mitjançant un panell. Per indicar les seccions transversals dels elements s'ha utilitzat aquesta mateixa rutina dues vegades, una pels cordons i l'altra per la resta d'elements, ja que els perfils corresponen a diferent família. El resum de seccions i materials determinats en el model de càlcul es representen a la taula 6. Tota aquesta informació es concentra en un "Relay" concret per material i un altre per secció transversal que, seguidament, s'han connectat al born d'entrada del component "Assemble Model" corresponent a cadascuna de les informacions.

Taula 6: Resum secció transversal i material de cada element.

| Paràmetres de sortida | Secció | Material |
|------------------------------|---------------|-----------------|
| Cordons superiors | HEB 200 | S275 |
| Cordons inclinats | HEB 200 | S275 |
| Cordons inferiors | HEB 200 | S275 |
| Columnes | IPE 400 | S275 |
| Diagonals | IPE 360 | S275 |
| Corretges | IPE 360 | S275 |

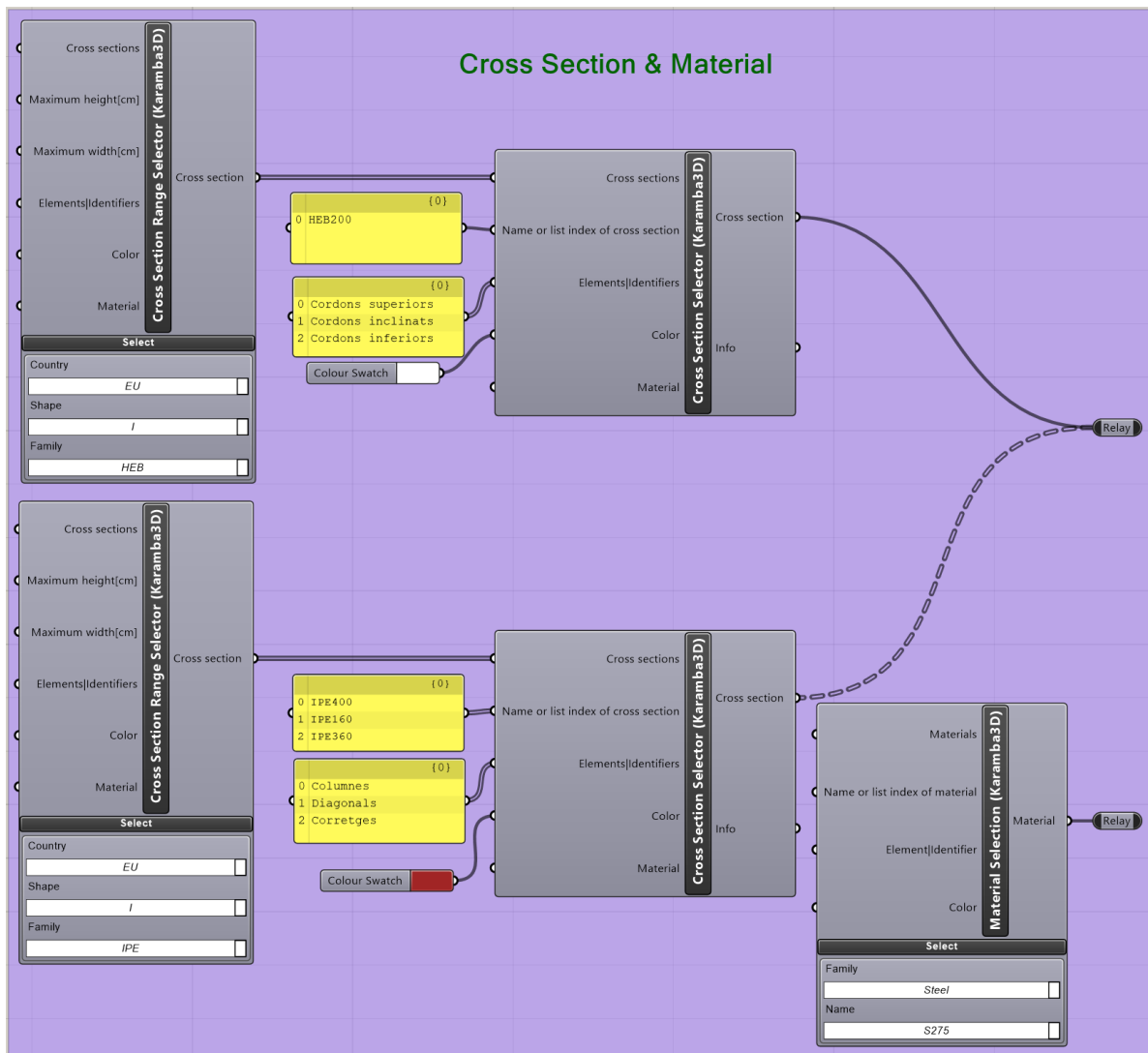


Figura 22: Rutina per determinar les seccions i material dels elements.

4.2.1.2 Suports i unions de l'estructura:

Els suports de l'estructura i les unions entre elements també s'estableixen en aquest component principal de generació d'un model.

La rutina de la figura 23 representa la definició dels suports de l'estructura paramètrica. Com s'ha definit al disseny base, els suports més externs del pòrtic han de ser rígids i els altres dos suports interiors són recolzaments simples, permeten la rotació en els tres eixos de l'espai. Aquesta diferència s'ha aplicat mitjançant el component "Support". El bloc utilitzat permet modificar les condicions del suport que queden lliures desmarcant les caselles corresponents. Consta de tres caselles de translació i tres caselles de rotació, una per cada eix. La casella desmarcada indica que el suport allibera aquest tipus de moviment en aquesta direcció concreta. El fet que s'hagin de contemplar dos tipus de suport, fa que aquest component s'utilitzi dues vegades. Pels suports externs s'han marcat totes les condicions i per tant queden totalment restringits. En canvi pels suports interns s'han desmarcat les rotacions en els tres eixos, llavors, representa un recolzament simple.

Per indicar a quin punt del model s'ha d'aplicar aquesta condició, el component tan sols necessita les coordenades dels suports. En aquest cas, s'ha introduït la llista de "Punts

base”, una de les sortides paramètriques de l'algoritme de disseny. Aquest arbre de punts conté tantes branques com suports té el pòrtic. Dins de cada branca hi ha el llistat de punts que corresponen a una coordenada X concreta. Tot i que el pòrtic pot ser modificat mitjançant els paràmetres d'entrada establerts, l'ordre de la llista d'aquests punts no canviarà. Ja que no s'ha implementat una rutina per discriminar els punts superposats, seguiran existint quatre punts base encara que ocupin unes mateixes coordenades. Per tant, sempre serà un arbre de quatre branques amb tants punts a cada branca com nombre de pòrtics tingui el disseny. Les quatre branques s'enumeren del zero al tres, per tant, mitjançant el component “Tree Branch” s'introdueixen les branques zero i tres al bloc “Support” més restringit. Aquestes dues branques sempre contindran els punts base exteriors de cada pòrtic i per tant formaran par de la llista de suports rígids.

Per altra banda, les branques que s'han d'introduir com a suports simples sí que diferiran en funció dels paràmetres d'entrada. És per aquest motiu que s'ha generat una subrutina que determina quina forma té el pòrtic. La sortida d'aquesta subrutina s'ha anomenat “Tipologia de pòrtic” i s'utilitza com a porta d'entrada a un filtre que decideix quina de les branques de l'arbre de punts base passa al component “Support” i es converteix en un suport simple.

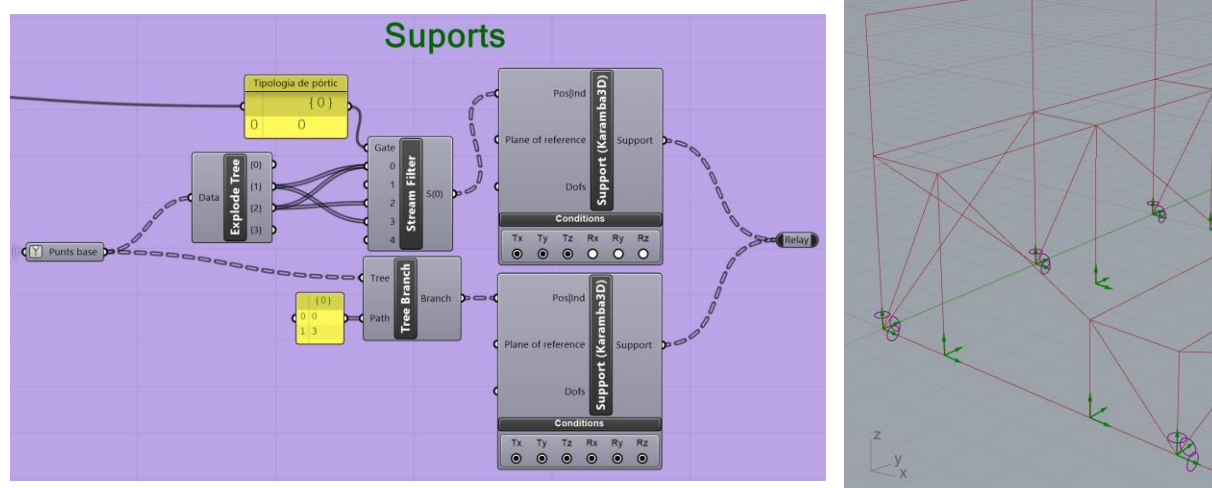


Figura 23: Rutina per determinar els suports de l'estructura.

La subrutina que determina la tipologia del pòrtic és la que es pot veure a la figura 24. Per començar s'ha donat valor de 1 i -1 a les variables booleanes sobre la igualtat a zero de les profunditats inferior i superior. Cada profunditat s'avalua per separat però seguint el mateix procediment: Si la profunditat és igual a zero, per tant “True”, el bloc “Stream Filter” del principi extreu un 1. En canvi, si la profunditat és diferent de zero, per tant “False”, el component en qüestió extreu un -1. Els dos resultats d'aquests dos processos avaluats, es gestionen matemàticament de tal manera que a la sortida de l'últim filtre de la rutina resulti un nombre diferent per cadascuna de les tipologies de pòrtic possibles. S'ha determinat valor numèric que aquest sigui l'entrada a la porta que gestiona el filtre de la rutina de la figura 23.

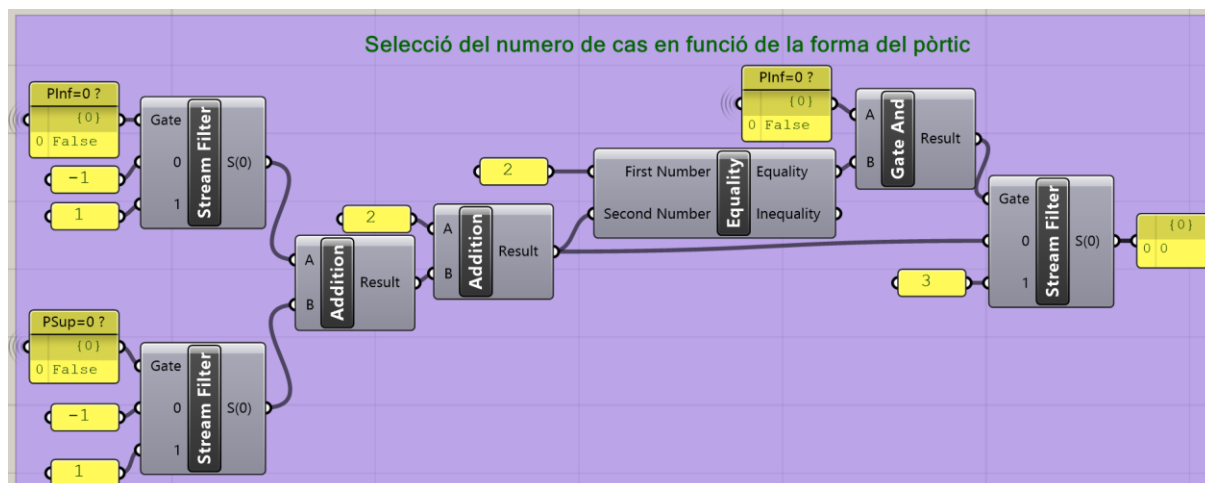


Figura 24: Rutina per la discriminació de la tipologia de pòrtic.

Les tipologies de pòrtic s’han classificat com es planteja a la taula 7. Com que el nombre de variables és dos, profunditat superior i inferior, el nombre de pòrtics possibles és de quatre. Cada tipus de pòrtic ve determinat pel nombre total de suports que el componen i si formen part de l’extrem del pòrtic o es troben entre dos suports més, per tant són interiors.

Taula 7: Classificació dels tipus de pòrtic segons la rutina de suports.

| Tipus de pòrtic | Recolzaments (Exteriors/Interiors) | Profunditat igual a zero | | Sortida de la rutina |
|-----------------|---------------------------------------|--------------------------|----------|----------------------|
| | | Superior | Inferior | |
| 1 | 4 (2/2) | - | - | 0 |
| 2 | 3 (2/1) | X | - | 2 |
| 3 | 3 (2/1) | - | X | 3 |
| 4 | 2 (2/0) | X | X | 4 |

Seguidament als suports, s’han establert les unions entre els elements. Per defecte, el càlcul de “Karamba3D” interpreta com a rígides totes aquelles unions entre elements que no es defineixen explícitament. És per això que per ser fidels al disseny base realitzat amb el “Diamonds”, tan sols s’ha determinat la unió de les diagonals. Per fer-ho s’ha utilitzat el component “Beam-Joints” de “Karamba3D”. Igual que amb els suports, apareixen caselles per marcar i desmarcar en funció de les propietats que s’hi volen aplicar. En aquest cas, però, tan sols s’han de marcar aquelles caselles corresponents als moviments i direccions que es volen alliberar. Es poden tractar per separat el punt d’inici i el punt final de l’element. La ubicació d’aquests punts dependrà de com s’ha dibuixat la línia que, en aquest cas, ha esdevingut un element anomenat “Diagonal”. Així doncs, com s’ha establert al disseny base, tant sols s’han alliberat les rotacions de totes les diagonals en els seus eixos locals y’ i z’ amb el component de la figura 25. La resta d’unions de l’estructura s’han interpretat com a rígides per defecte.

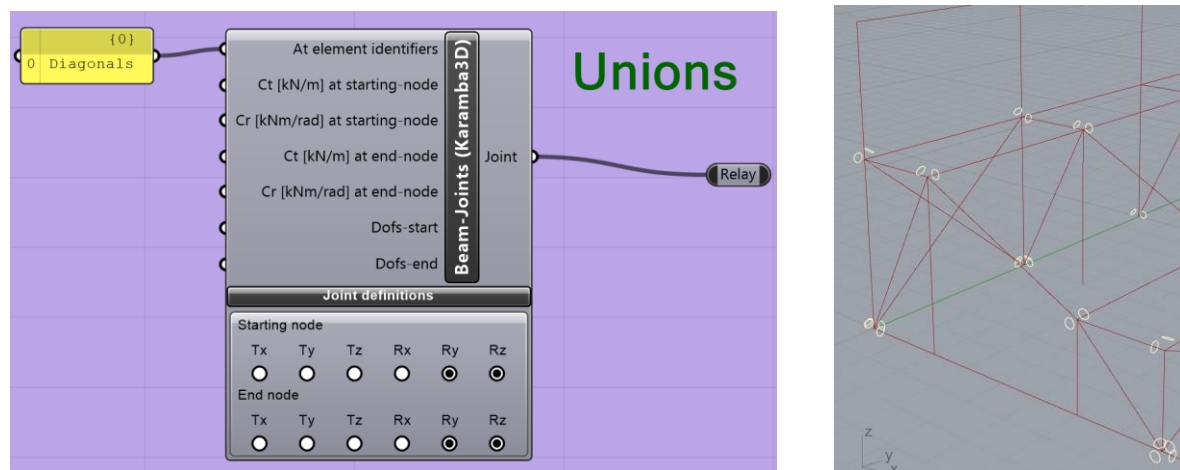


Figura 25: Rutina per determinació de les unions.

4.2.2 Càrregues del model

Al model de càlcul s'hi incorporen les càrregues de l'estructura de la mateixa manera, amb un born d'entrada al component "Assemble Model". Aquestes es defineixen amb els seus blocs corresponents en funció de les característiques concretes. Les sol·licitacions entrades corresponen a les mateixes que s'han tingut en compte a l'avaluació amb el programari de càlcul d'estructures del model bàsic: El pes propi de l'estructura, el pes de les plaques alveolars suportades pels cordons, la sobrecàrrega d'ús estipulada per la normativa corresponent, la càrrega estimada dels seients i per últim dues càrregues de vent independents. Aquestes sol·licitacions s'estructuren dins l'algoritme en dos casos de càrrega diferents: "LoadCase0" i "LoadCase1". El resum de càrregues aplicades al disseny paramètric i els seus valors estan estipulats a la taula 8.

Com també s'ha establert en el disseny base, s'han aplicat càrregues superficials per facilitar la seva entrada a l'algoritme. Aquestes superfícies d'aplicació s'anomenen malles i han sigut generades prèviament ja que s'estableixen com una de les entrades al component que defineix la càrrega. Concretament, s'ha elaborat una rutina pels tres tipus de malla diferents anomenades: malla principal, lateral i posterior.

Taula 8: Resum càrregues del model paramètric.

| Grup de càrrega | Malla | Cas de Càrrega | | Valor (kN/m ²) |
|-------------------|-----------|----------------|---|----------------------------|
| | | 0 | 1 | |
| Pes propi | - | X | X | - |
| Plaques alveolars | Principal | X | X | 3,63 |
| Sobrecàrrega d'ús | Principal | X | X | 5 |
| Seients | Principal | X | X | 0,5 |
| Vent lateral | Lateral | | X | 0,728 |
| Vent posterior | Posterior | X | | 0,728 |

Una malla esta formada per un conjunt de punts ordenats i col·locats de tal manera que estableixen un grup de plans anomenats "Faces". Per generar-los a través de l'algoritme s'ha utilitzat el component "Construct Mesh". Als borns d'entrada d'aquest bloc s'estableixen els vèrtex que la defineixen la malla i les cares o plans que formen.

La malla principal és aquella on s'apliquen totes les càrregues verticals. Físicament està definida pels cordons i les corretges que uneixen els pòrtics. La rutina que la genera és la representada a la figura 26. Els punts a partir dels quals parteix aquesta seqüència s'han anomenat "Punts de subjecció". Aquesta llista està formada per totes les coordenades que on s'uneixen els segments de cordó de cada pòrtic al llarg de la grada. Com es comenta en altres apartats, aquestes estan ordenades d'una manera lineal. De tal manera que primer es llisten tots aquells punts on la coordenada X és zero i s'incrementa la coordenada Y successivament tantes vegades com segments tingui el cordó. És a dir, si el disseny té nou pòrtics, els nou primers punts de la branca seran els que formen part de la columna posterior de l'estructura. És per aquest motiu que s'utilitza el component "Relative Item", necessari per ordenar la branca de punts en ramificacions de quatre punts que posteriorment definiran cada "Face" o pla de la malla. Aquest component ve seguit del bloc "Merge", encarregat de barrejar una a una les llistes d'entrada al seus borns. El procés es repeteix dues vegades. Primer s'uneixen els dos punts consecutius de cada fila i posteriorment les dues parelles de punts paral·leles. D'aquesta manera s'obtenen llistes separades en branques independents dels quatre punts que formaran cada "Face" de la malla. Per últim, al component "Construct Mesh" s'hi ha adjuntat la comanda que indica l'ordre amb el que s'han de relacionar els punts de la branca. Es relacionen en el sentit horari i la comanda corresponent és: Q(0;1;3;2). El component "Trim Tree" s'ha utilitzat per ajuntar en una sola llista cadascuna de les malles generades pel component anterior. A efectes de càlcul s'ha reconstruït cadascuna de les malles amb triangulacions mitjançant els últims dos blocs de la rutina esmentada: "TriRemesh" i "Mjoin". Aquesta seqüència es repeteix en cadascuna de les rutines que construeixen les diferents malles que s'han elaborat i serveix per ajustar-se al model de càlcul del "Diamonds" amb el que s'ha comparat.

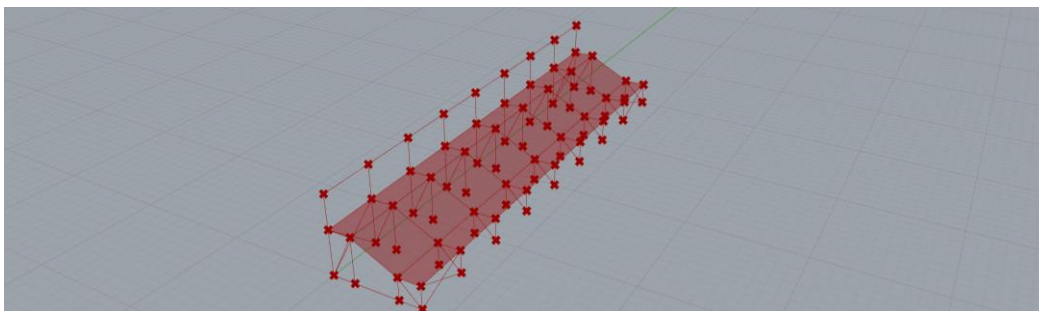
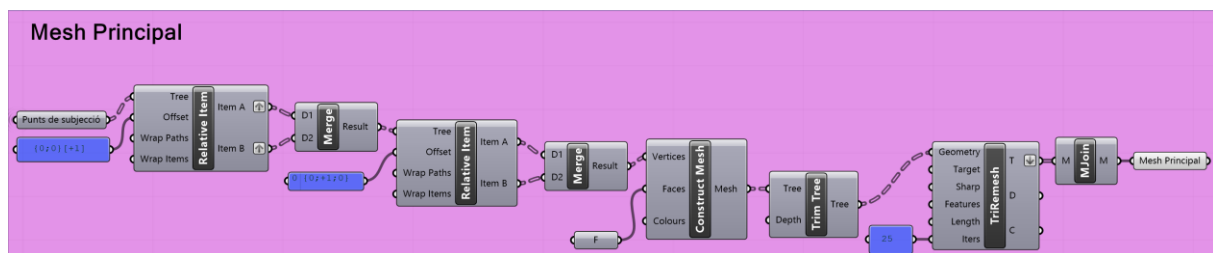


Figura 26: Rutina per generar la malla principal.

La malla posterior és aquella que està ubicada al pla YZ de l'estructura. La rutina que s'ha utilitzat per generar-la és la representada a la figura 27. En aquesta, el procés d'entrada al component "Construct Mesh" parteix de les coordenades dels punts superiors de coberta i la primera branca de l'arbre anomenat "punts base", aquells on la seva coordenada X és igual a zero. Aquets punts, ordenats en grups de quatre, són els que formen el conjunt de plans anomenats "Faces" que constitueixen la malla posterior. En aquest cas, el primer component "Merge" ja emparella dos punts de les llistes de partida en una ramificació diferent. Concretament, els que disposen de la mateixa coordenada Y. Una vegada emparellats els punts verticalment, s'han utilitzat els blocs "Relative Item" i "Merge" per enllaçar en una mateixa ramificació cada parella de punts consecutiva. D'aquesta manera s'ha obtingut la llista de quatre punts necessària per adjuntar a l'entrada "Vertices" del component "Construct Mesh". Igual que amb l'anterior, s'ha indicat l'ordre de relació entre els punts de cada "Face".

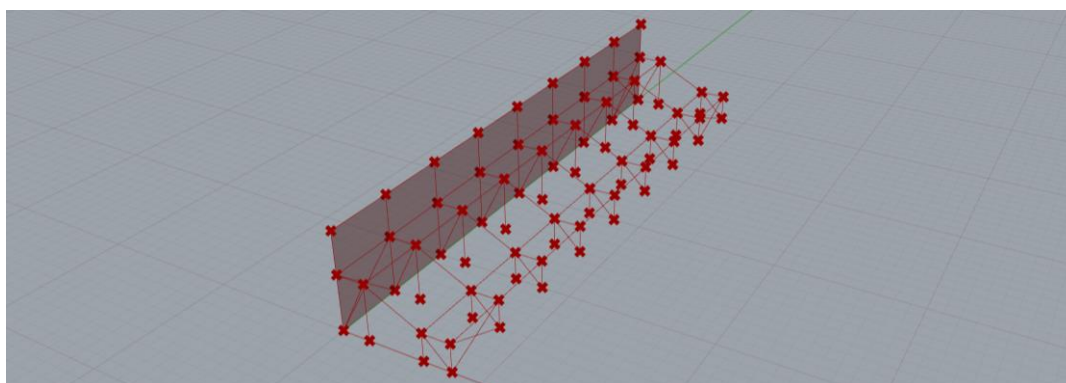
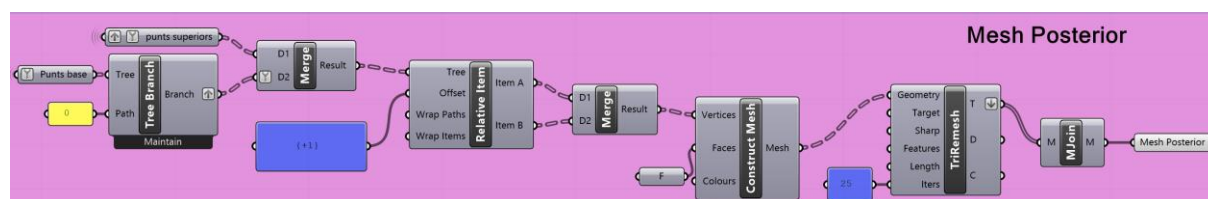


Figura 27: Rutina per generar la malla posterior.

Per últim, la malla lateral és la que conté la superfície descrita pel perfil del primer pòrtic. Continguda en el pla XZ, la rutina que la genera és la que es pot veure a la figura 28. Partint de les branques "Punts base pòrtic" i "Punts cordó" s'han enllaçat verticalment les parelles de punts que comparteixen la mateixa coordenada X amb el primer component "Merge". Per relacionar les parelles consecutives s'ha utilitzat el component "Relative Item" seguit d'un nou bloc "Merge". S'ha generat una branca de punts que conté les ramificacions adequades per obtenir els plans anomenats "Faces" de la malla lateral.

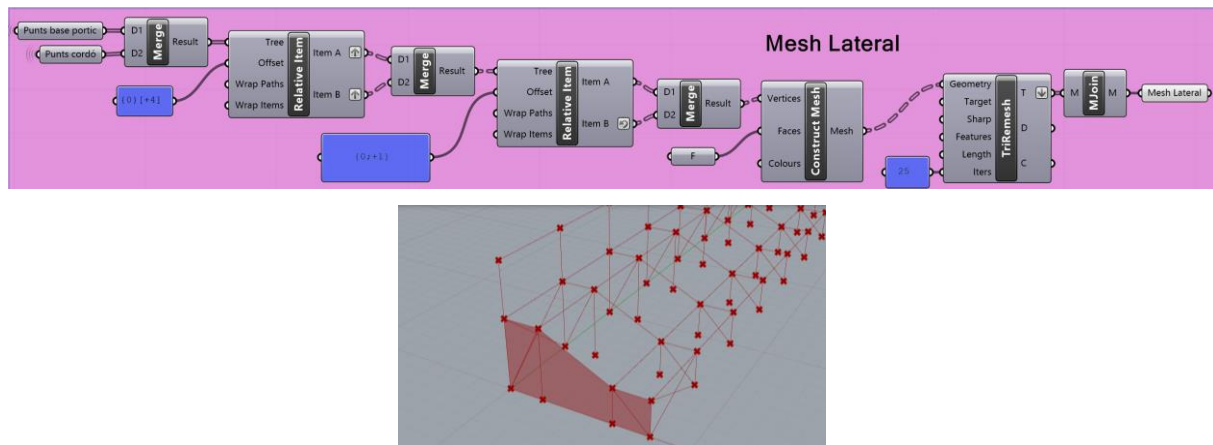


Figura 28: Rutina per generar la malla lateral.

Els valors de càrrega són més paràmetres sobre els quals depèn l'algoritme. El control d'aquestes variables enriqueix el procés ja que permet la possibilitat de calcular el model en les condicions desitjades per cadascun dels casos. La ubicació de la construcció pot afectar el valor de càrrega de vent, els seients poden estimar-se d'un material més pesat fet que augmentaria la seva càrrega de pes propi o fins i tot es poden contemplar canvis més significatius que afectin al procés constructiu i les càrregues aplicades sobre els cordons. Així doncs, l'entrada de càrregues a l'algoritme mostrada a la figura 29, s'inicia amb diversos components "Number Slider" que permeten seleccionar el valor de cadascuna de les càrregues, en quilonewtons, amb una barra lliscant independent.

Figura 29: Controls d'entrada per als valors de la càrrega.

El valor de cada càrrega és la que constitueix l'entrada principal al component que genera la força aplicada a l'estructura. Al tractar-se únicament de càrregues superficials, el bloc utilitzat per modelitzar cada càrrega és el mateix: "Loads" de "Karamba3D". Els components que esdevenen les sol·licitacions repetides als dos casos de càrrega s'han inserit dins l'algoritme tantes vegades com "LoadCase" s'estableixen. A cada component de càrrega "Loads" s'especifica el vector de força al born "Vector", la malla sobre la qual s'aplica al born "Mesh" i per últim, els elements sobre els que es carrega la força al born "Elements". Aquest bloc, disposa de tres menús desplegable que ajuden a definir la càrrega desitjada mitjançant la modificació de diverses característiques com poden ser els eixos sobre els que s'estableix la l'orientació, el sistema d'aplicació de la càrrega i el tipus de sol·licitació desitjat. Per tant, tal i com es mostra a la figura 30, les càrregues verticals s'apliquen sobre la malla principal, concretament sobre cadascun dels segments que formen els cordons del pòrtic.

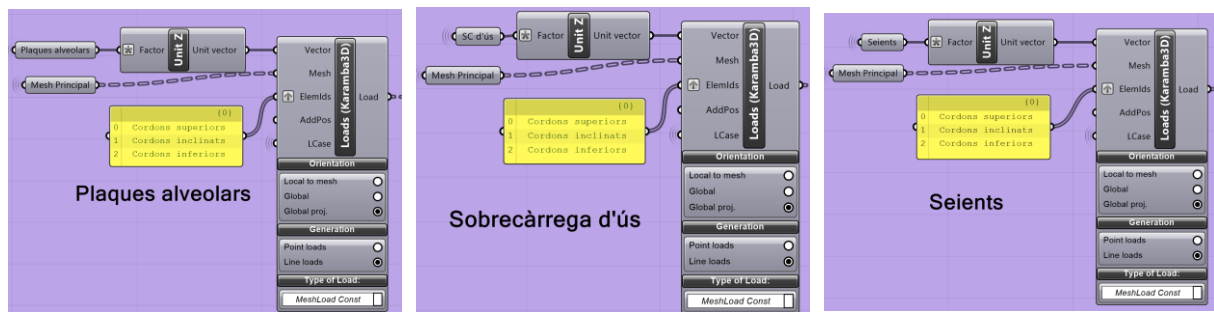


Figura 30: Rutines de generació de càrregues sobre la malla principal.

Com es pot veure, per les càrregues de vent representades a la figura 31 s'ha aplicat el mateix procediment de generació que amb les anteriors. En aquest cas, però, al vector de vent posterior s'ha indicat una direcció X i al del vent lateral una direcció Y. Cadascuna de les càrregues s'ha aplicat a la malla corresponent i sobre els elements desitjats. Pel "Vent Posterior", els elements sol·licitats són les columnes i corretges que formen part de la "Mesh Posterior". En canvi, pel "Vent Lateral" es sol·liciten els tres segments de cordó i les columnes que constitueixen la "Mesh Lateral".

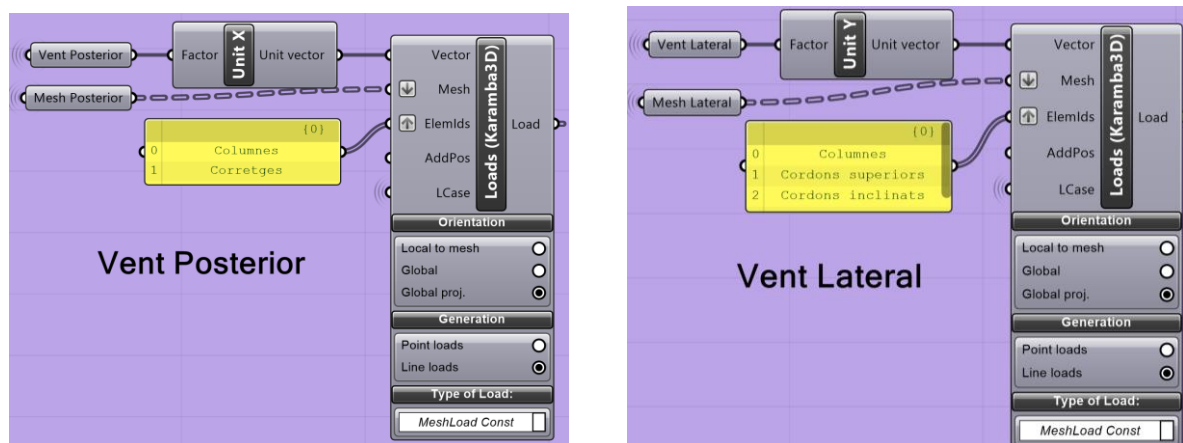


Figura 31: Rutines de generació de càrregues de vent.

4.2.3 Visualització del model

Per visualitzar el model dissenyat que esdevé de la sortida del bloc "Assemble Model" s'utilitzen els blocs que es poden veure a la figura 32, concretament els anomenats "Model View" i "Beam View". Enllaçant aquests tres components que s'acaben d'esmentar ja es pot visualitzar el disseny de l'estructura a la plataforma de "Rhino". No obstant, a la figura en qüestió, hi apareix el bloc "Analyze" de "Karamba3D". Aquest bloc precedeix a la visualització ja que aporta la informació referent al càlcul de l'estructura. Sense aquest element, simplement es representa el dibuix dels diferents perfils metàl·lics en la seva posició estipulada.

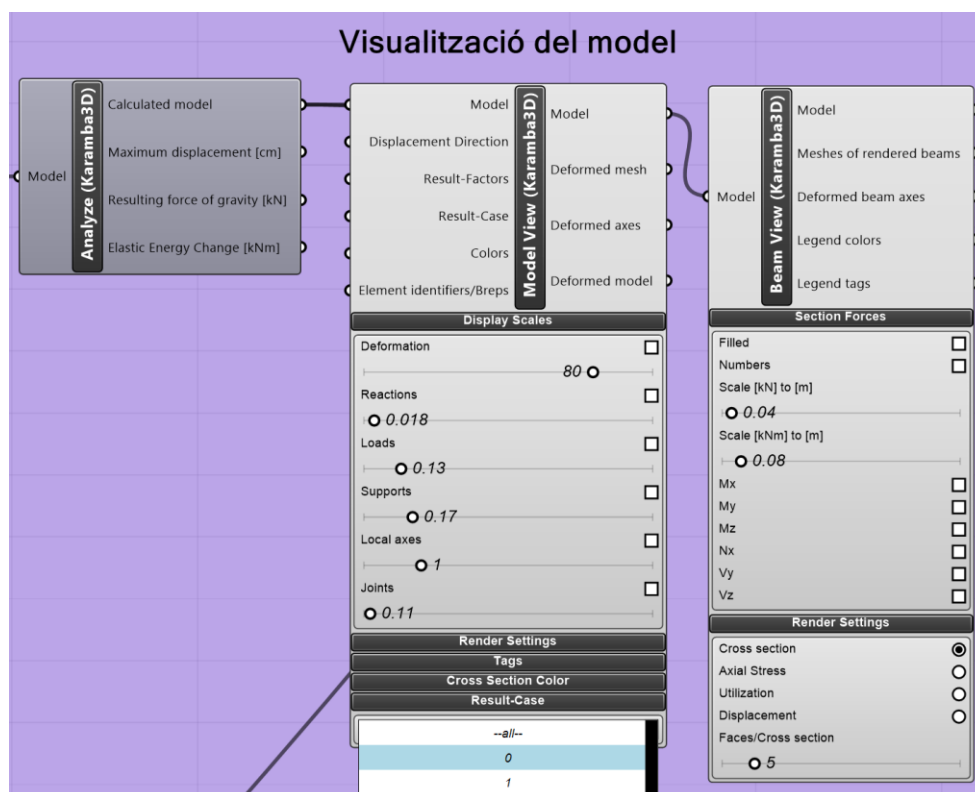


Figura 32: Components de visualització del model.

Per una banda, mitjançant el bloc “Model View” es pot filtrar la informació que es vol representar a partir de diferents criteris. Existeix la possibilitat de mostrar el color per elements o seccions, representar l'enumeració d'elements i altres característiques del renderitzat. Els més utilitzats en aquest projecte són:

- “Display Scales”, per visualitzar els diferents paràmetres segons si la seva casella està marcada o no i determinar amb quina magnitud percentual es volen mostrar.
- “Result-Case” per seleccionar, a través d'un desplegable, amb quin dels dos casos de càrrega es volen visualitzar els resultats.

Per exemple, es poden representar les càrregues del “Load Case” en qüestió. A la figura 33 mostra com s'ha determinat la visualització del cas de càrrega “all”. És a dir, es representen totes les càrregues del model.

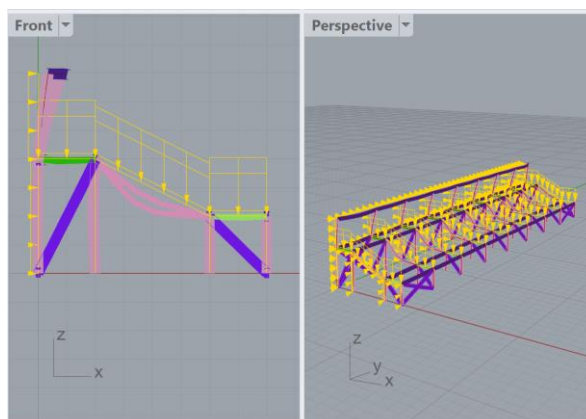


Figura 33: Visualització de càrregues del model.

Per altra banda, gràcies al component “Beam View” es mostren les seccions dels diferents elements. Igual que amb el bloc anterior, es pot filtrar la informació a visualitzar mitjançant el marcatge de diferents caselles. És possible visualitzar els diagrames d'esforços de cada element, “Section Forces” i expressar els resultats amb diferents possibilitats de renderitzat. “Render Settings”. En aquest cas s'ha utilitzat la casella de “Cross section” per veure cada perfil metàl·lic d'un color diferent i la casella “Utilització” per veure els trams més crítics de l'estructura. La diferència entre aquestes dues representacions es representa a la Figura 34.

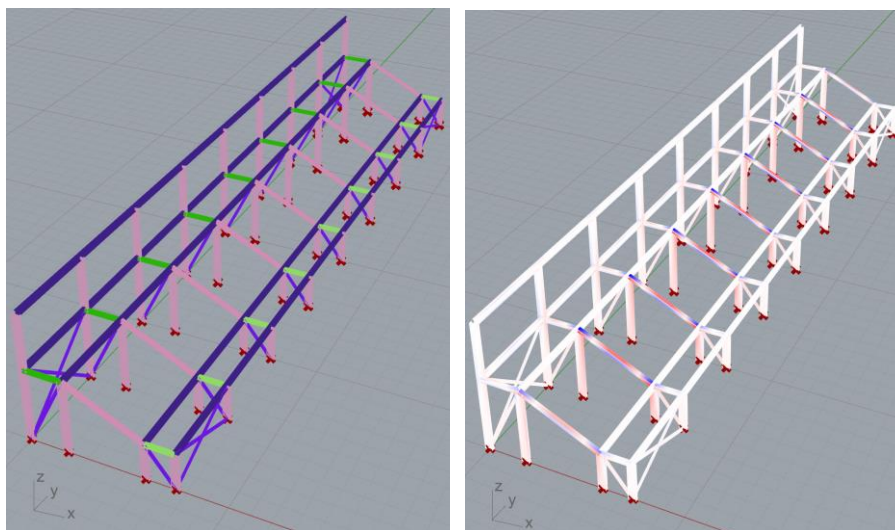


Figura 34: Diferents tipologies de visualització. Per seccions (esquerre), per utilització (dreta).

4.3 Possibilitats de l'algoritme

El concepte de disseny paramètric és l'evolució del disseny tradicional. La gran virtut que proposa és la possibilitat de provar una família bastant extensa de solucions possibles en un interval de temps molt reduït. Aquesta evolució ha permès aconseguir optimitzar el procés de disseny en dos aspectes bàsics: Reducció de temps i estalvi de material.

Aquesta metodologia de treball és excel·lent per aquells que dissenyen una tipologia específica d'estructures. Amb la inversió de temps necessària per elaborar un algoritme ja s'estalvia molta feina d'iteració en el disseny de cadascun dels projectes d'una mateixa família. A més, aquest algoritme pot experimentar un procés evolutiu on s'hi poden afegir complements que cada vegada facilitin més la feina de modelar nous projectes.

Per altra banda, el disseny paramètric també és molt efectiu pel que fa a estalvis de material. Per aquesta raó, es disposa d'algoritmes molt potents d'iteracions successives, com poden ser els de “Karamba3D” que es mostren en aquest projecte, i d'algoritmes encara molt més potents com els algoritmes genètics, que permeten avaluar les diferents possibilitats i trobar una solució òptima respecte els criteris estipulats.

Tots aquests processos, requereixen d'una estructura paramètrica per ser aplicats en aquest camp de la construcció. És per això que cal remarcar el valor d'aquest projecte destacant el fet de que no solament s'ha dissenyat una estructura, sinó que s'ha volgut demostrar que aquesta manera de disseny és la que permet introduir les eines matemàtiques adequades al camp de la construcció per poder aconseguir uns resultats de disseny òptims.

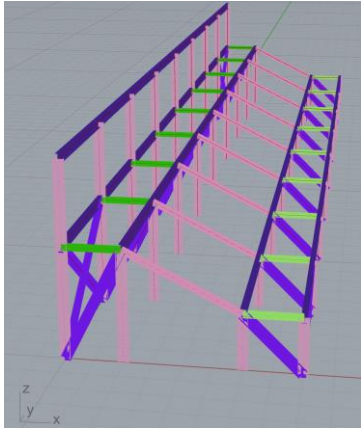
4.3.1 Canvi de paràmetres i interoperabilitat

Gràcies a les rutines explicades en aquest document s'ha aconseguit el model i càlcul d'una estructura metàl·lica com la que es mostra a les figures següents.

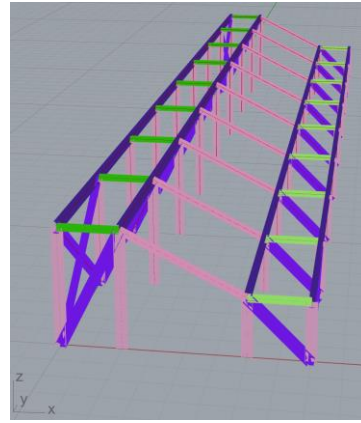
Mitjançant uns paràmetres d'entrada a l'algoritme com els de la figura 5, que determinen les dimensions de l'estructura i uns altres que determinen el valor de les càrregues, com els de la figura 29, es poden elaborar diferents solucions d'una mateixa família d'estructures en qüestió de segons. A la figura 35 tan sols es representen alguns dels exemples de dissenys que es poden determinar a través de les variables contemplades. Es pot considerar un model amb corretja per coberta d'alçada variable (figura 35.1) o sense tenir-la en compte (figura 35.2).

Les profunditats dels sectors de pas pel públic també es poden modificar. S'han dissenyat dos sectors independents per cobrir les necessitats i requeriments de les possibles peticions. Com s'ha comentat en el procés explicatiu del funcionament de l'algoritme, quan un d'aquets sectors no es té en compte, la mateixa estructura s'adapta per contemplar únicament els elements necessaris tal i com es veu a les figures 35.3 i 35.4.

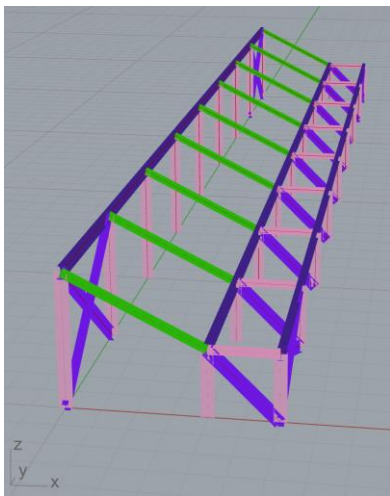
La profunditat del sector inclinat també és graduable. D'aquesta manera es pot obtenir la inclinació desitjada a partir de dos mètodes (figura 35.5). En primer lloc es poden modificar les alçades dels sectors rectes fins que l'indicador d'inclinació expressi el valor desitjat. El segon mètode consisteix en establir una inclinació mínima sobre la qual l'algoritme haurà de treballar per generar el model estructural. Si aquesta té un valor de zero i les alçades de cada sector s'estableixen en valors iguals, es pot modelar i calcular una tarima recta com la de la figura 35.6. En aquestes dues últimes figures també s'observa com el nombre de pòrtics i longitud de la grada són variables.



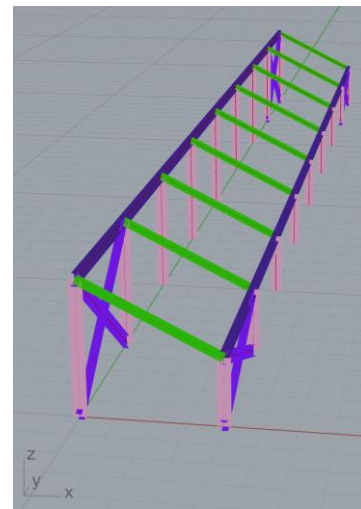
35.1 Model equivalent al disseny bàsic.



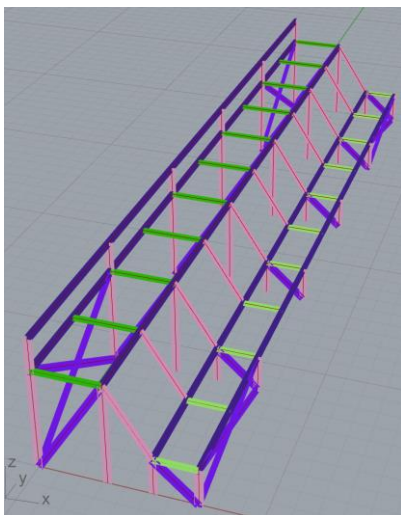
35.2 Model sense columnes de coberta.



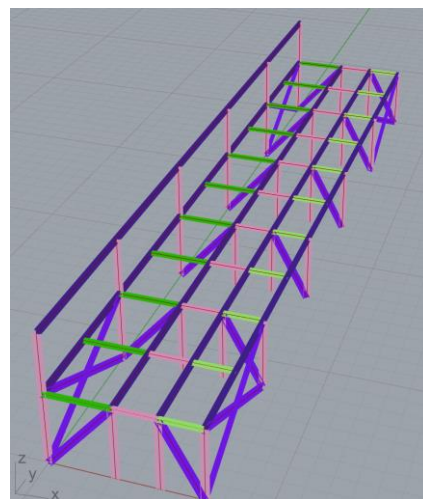
35.3 Model sense sector superior.



35.4 Model només amb sector inclinat.



35.5 Model amb inclinació variable.



35.6 Model amb grada recta.

Figura 35: Exemples de dissenys paramètrics per la graderia metàl·lica

L'elaboració d'un algoritme com el que s'ha projectat aporta una gran varietat d'oportunitats gràcies a la interoperabilitat entre diferents programaris i el "Grasshopper", software que s'ha utilitzat per establir les rutines de generació.

Per mostrar breument el potencial de la metodologia de treball estudiada, s'ha exportat des de l'algoritme, l'estructura equivalent al disseny bàsic al programari de disseny estructural "Tekla Structures". El resultat global d'aquest procés queda representat a la figura 36.

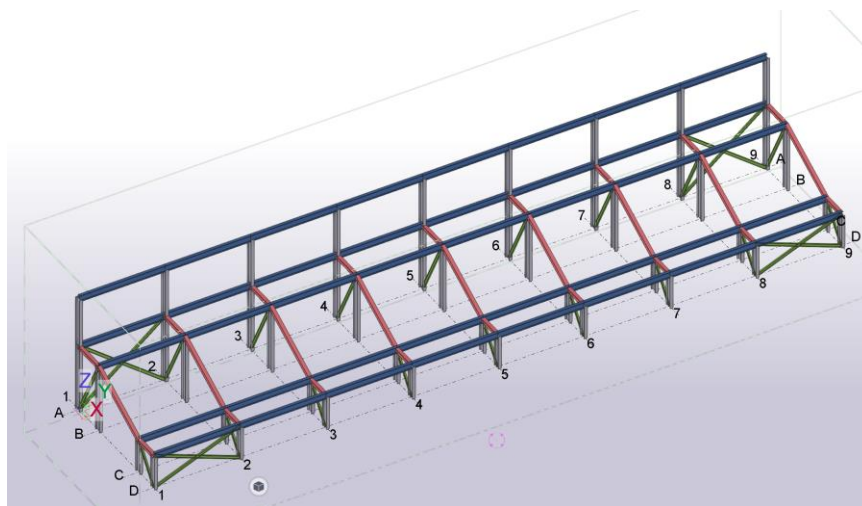


Figura 36: Model de TEKLA exportat des de l'algoritme.

Com es pot veure, s'ha generat cadascun dels elements que formen l'estructura de manera automàtica a través de la implementació d'una nova rutina dins l'algoritme. A més, la interoperabilitat entre aquests dos programaris permet enllaçar els dos models de tal manera que si es realitzen canvis al "Grasshopper" el model de "Tekla" s'actualitza simultàniament.

Per posar un exemple, s'ha representat a la figura 37 la rutina utilitzada per exportar els elements anomenats cordons. El component principal, el que realment es comunica amb el programari extern, és el bloc anomenat "Beam". Aquest component s'ha incorporat a través de la instal·lació d'una extensió per "Grasshopper" proporcionada pels creadors de "Tekla". A través de diversos inputs, acaba comunicant al model de "Tekla" les característiques i particularitats de l'element a generar. Com s'observa al lateral de la figura 37, "Tekla" rep la informació bàsica com el nom de l'element, perfil metàl·lic, material i classe. Gràcies a la rutina que s'ha definit, aquestes característiques bàsiques i d'altres, com la posició de l'element respecte l'eix, es poden modificar de manera intuïtiva i ràpida a través de l'algoritme amb la finalitat de plantejar el model desitjat a "Tekla" de manera automàtica, sense haver d'intervenir sobre aquest programari extern.

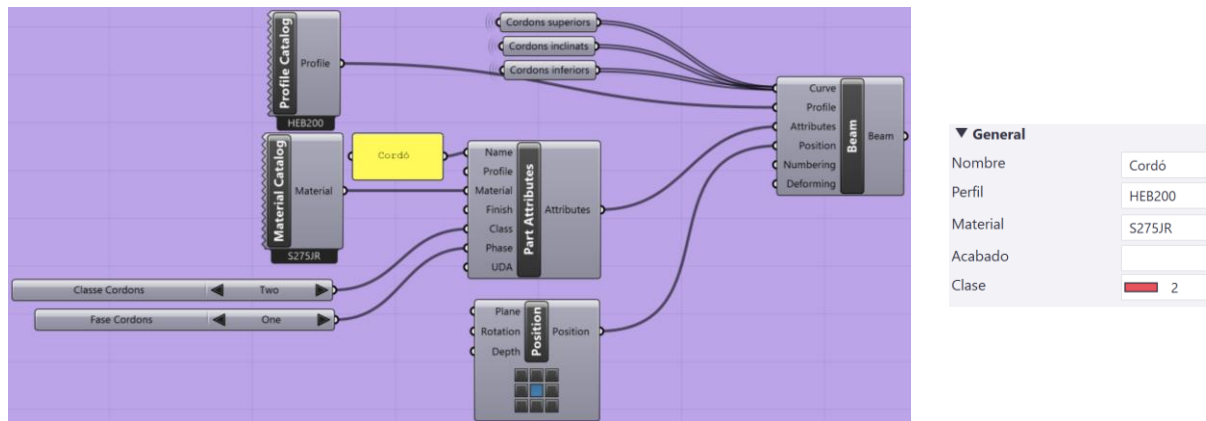


Figura 37: Rutina per definir elements dins del TEKLA.

El programari de disseny "Tekla" es caracteritza pel seu potencial en dibuix en tres dimensions i la seva biblioteca d'unions i ancoratges. És una eina molt útil per dissenyar models i processos constructius amb una gran quantitat d'informació. Per exemple, entre moltes altres funcions, és capaç d'ordenar els elements i instal·lacions per fases de construcció de tal manera que permet detectar errors i incongruències del procés abans de portar-lo a la realitat.

Amb les possibilitats que ofereix el "Tekla Structures" i seguint amb les capacitats de l'algoritme, s'ha treballat sobre una altra tipologia de rutines que permeten definir les unions entre els elements tot aprofitant el potencial esmentat. A la figura 38 s'ha representat una rutina per generar la unió d'ancoratge a la base de cada columna de l'estructura.

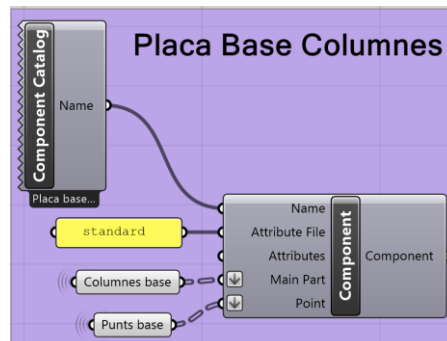
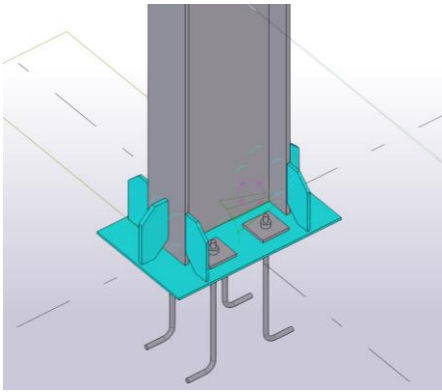
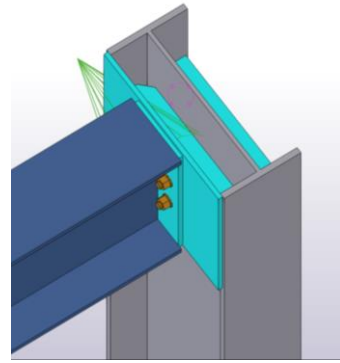


Figura 38: Rutina per definir unions del TEKLA.

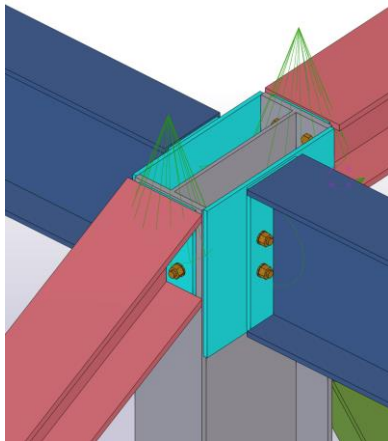
Amb el bloc anomenat "Component" s'exporta al programari extern una de les components del catàleg de "Tekla" amb la possibilitat de definir-la i modificar-la a través dels mateixos paràmetres de "Grasshopper". No només permet realitzar canvis instantanis sobre el model sinó que al aplicar-se en totes aquelles ubicacions on s'indica, amb una sola rutina és possible introduir tot el conjunt d'ancoratges a cada base dels pilars existents. De la mateixa manera que la resta d'actualitzacions, en aquest cas, si els paràmetres dimensionals de l'algoritme es modifiquen i el nombre de columnes varia, les components de placa base de les columnes també s'adapten al nou model sense requeriments de cap modificació. Els exemples de les unions dissenyades pel model d'exemple es representen a la figura 39.



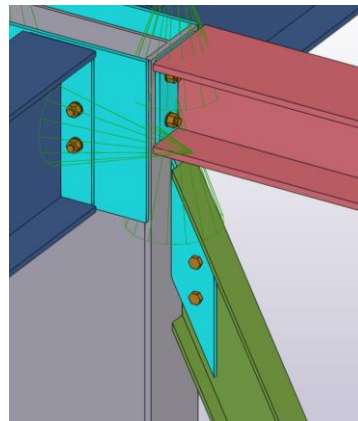
39.1 Unió Placa Base



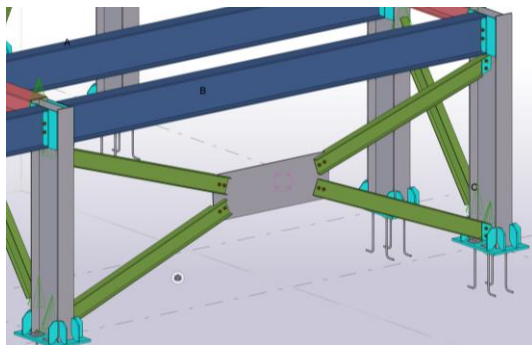
39.2 Unió Corretja-Columna



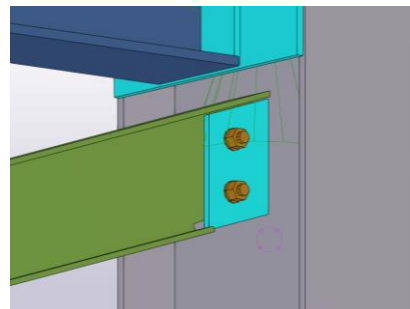
39.3 Unions entre pilars i cordons



39.4 Unió Pilar-Diagonal



39.5 Unió Creu de St. Andreu



39.6 Unió Pilar-Creu de St. Andreu

Figura 39: Exemples de les possibles unions que s'han definit al model de Tekla.

4.4 Optimització de l'estructura

L'altra virtut de l'algorisme que es vol destacar en aquest projecte és la possibilitat d'optimitzar els perfils metàl·lics en funció de la utilització dels elements o el desplaçament màxim desitjat. Aquesta s'ha portat a terme mitjançant la rutina representada a la figura 40.

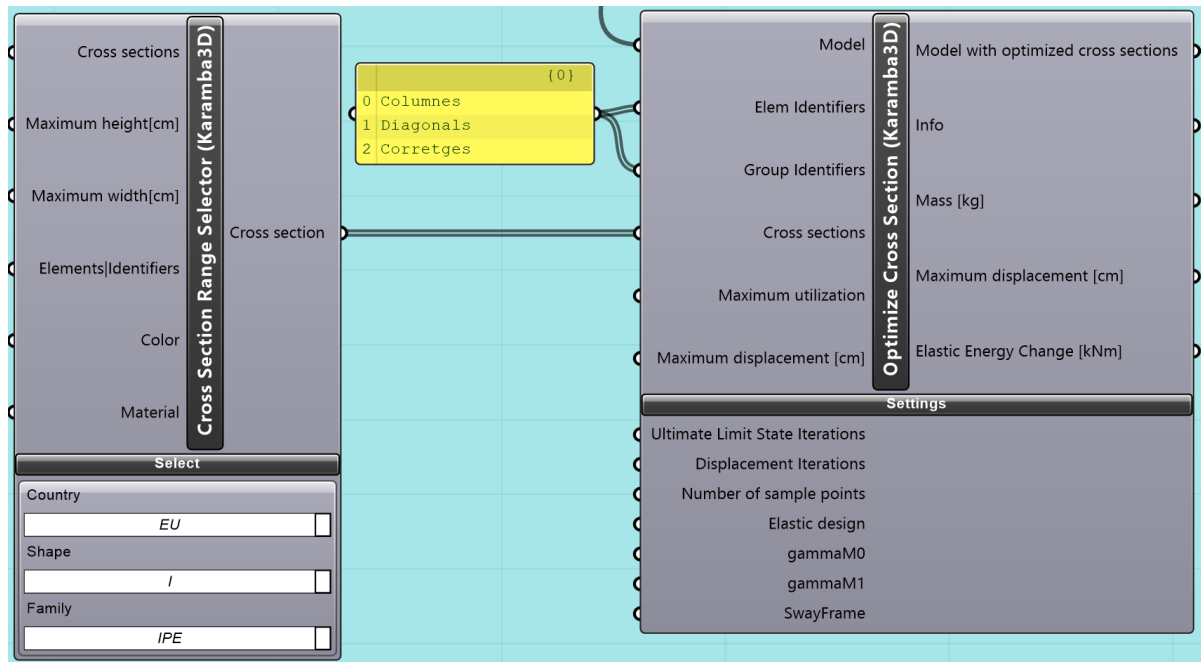


Figura 40: Rutina utilitzada per optimitzar el model.

Concretament, el bloc que compila el procés d'optimització és el "Optimize Cross Section" de "Karamba3D". Sobre aquest bloc s'ha aportat la informació necessària per optimitzar la secció transversal dels elements indicats.

En primer lloc, s'han entrat totes les dades que defineixen el model. Els elements a optimitzar que s'han contemplat són les columnnes, les diagonals i les corretges. Els cordons no s'han incorporat a la optimització ja que la mesura del perfil es veu restringida per factors externs com la necessitat de recolzar les plaques alveolars. Per tant, aquesta secció s'ha mantingut invariable amb una HEB200.

En segon lloc, cal indicar el catàleg de perfils sobre els quals la rutina ha de generar les iteracions. En aquest cas, s'ha introduït tot el catàleg de seccions IPE que ofereix el component "Cross Section Range Selector" de "Karamba3D".

Les dues condicions possibles d'optimització són la màxima utilització dels elements i el desplaçament màxim. En aquest exemple s'ha determinat una utilització màxima dels elements del 100% i el desplaçament no s'ha tingut en compte. Per tant, aquesta rutina comprova de manera iterativa els perfils metàl·lics òptims pels que no es supera la màxima utilització en cap dels elements estipulats a l'entrada del bloc.

Els resultats i comparació amb el model estàndard, equivalent al disseny bàsic, es veuen representat a les dades de la figura 41.

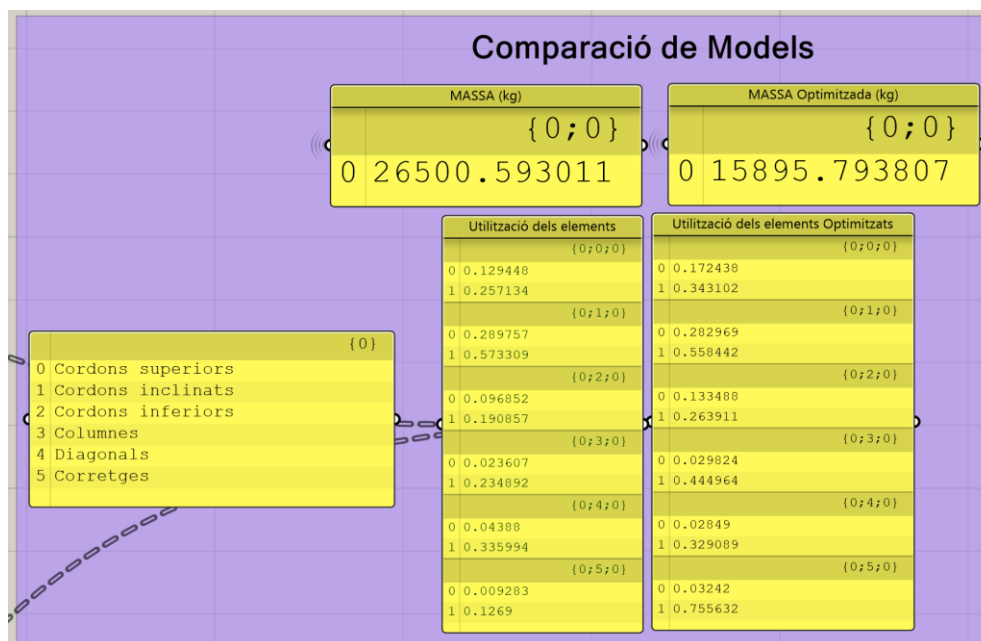


Figura 41: Comparació de resultats entre el model estàndard i l'optimitzat.

A l'esquerra d'aquesta figura podem trobar l'ordre i índex de cadascun dels elements que es representen a les llistes contigües. A aquestes dues llistes s'hi pot veure el valor d'utilització mínim i màxim de cadascun dels tipus d'element de l'estructura. La llista de l'esquerra contempla els perfils equivalents al disseny bàsic, pels quals s'ha avaluat el càlcul de l'estructura, i les altres dades corresponen als resultats obtinguts després d'optimitzar els perfils de Columnes, Diagonals i Corretges.

Com es pot veure, en el primer cas és als cordons inclinats on es troba la màxima utilització dels elements amb un 57%, tal i com es podia observar a la figura 34 de l'apartat "4.2.3 Visualització del model" on es mostra, en color vermell, que la utilització màxima es troba al centre dels segments cordons inclinats. En canvi, un cop optimitzat, el model presenta una utilització màxima sobre les corretges d'un 75%.

A més, també s'ha comparat la massa que comporta aquesta estructura en ambdós casos. En el cas del disseny bàsic es contemplen uns 26.500 kg d'acer. En canvi, amb l'estructura optimitzada la massa es redueix fins a 15.895 kg. Aquesta segona magnitud és gairebé un 60% de la primera. Per tant, s'ha optimitzat l'estructura en un 40%.

Així doncs, s'han trobat les seccions mínimes per les que l'estructura suporta les càrregues. A la figura 42 es poden veure els perfils metàl·lics establerts al disseny bàsic, a la llista de l'esquerra i a la llista de la dreta, les seccions que han resultat de l'optimització.

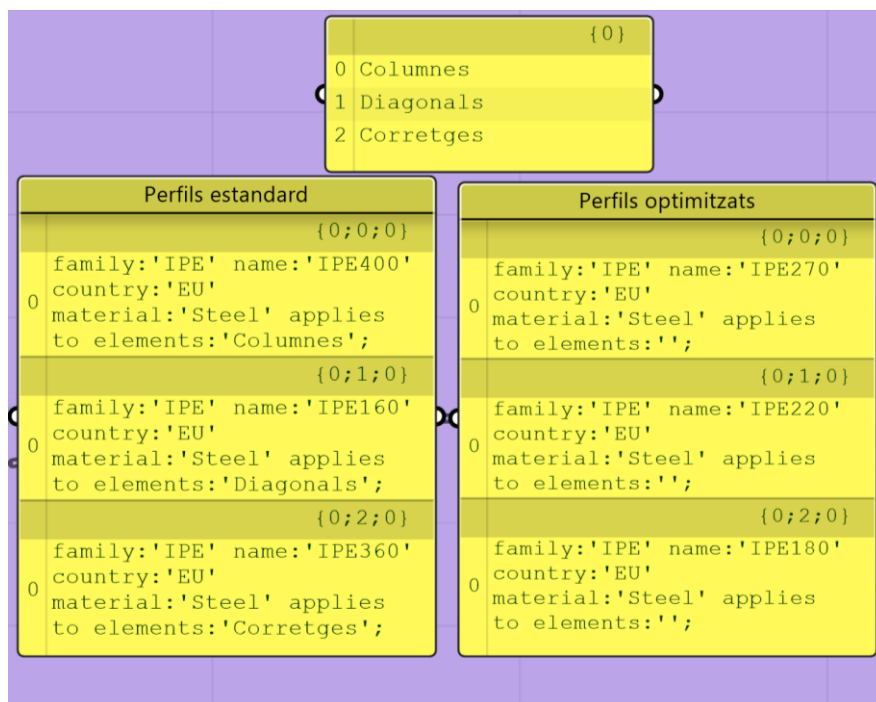


Figura 42: Comparació de perfils metàl·lics entre el model estàndard i l'optimitzat

5 Validació del càlcul

Per discernir si el càlcul simultani programat amb el “Grasshopper” és acceptable, s’han comparat els resultats entre el càlcul del disseny bàsic, modelat amb el programari “Diamonds”, i el càlcul realitzat pel “Karamba3D” del model paramètric que representa el mateix disseny que l’estàndard establert.

Per tal d’aparellar al màxim la comparació, les dues metodologies de càlcul s’han adaptat de tal manera que les característiques que els defineixen siguin semblants. El càlcul amb el “Karamba3D” no permet generar automàticament les combinacions de càrrega així com ho fa el programari de càlcul d’estructures utilitzat. És necessari generar cadascuna de les combinacions de càrrega programant l’expressió matemàtica que multiplica els valors de cada càrrega pels factors de majoració desitjats. Aquesta operació també és possible parametritzar-la. No obstant, per facilitar la validació s’han introduït totes les càrregues amb un factor de majoració igual a la unitat dins d’un mateix cas de càrrega i s’ha generat un estat de cargues equivalent dins el programari de càlcul estructural “Diamonds”. Aquesta combinació de càrregues és la que es mostra a la figura 43.

| Grupo de carga | Nombre | Peso propio | Viento lateral -Z (0,728 kN/m ²) | Viento posterior +X (0,728 kN/m ²) | Seients (0,5 kN/m ²) | Plaquas alveolares 15cm (3,63 kN/m ²) | sobrecarga C: reunión C5 (5 kN/m ²) |
|----------------|---|-------------|--|--|----------------------------------|---|---|
| 1 | Peso propio | 1,00 x 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 2 | Viento lateral -Z (0,728 kN/m ²) | 0,00 | 1,00 x 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 3 | Viento posterior +X (0,728 kN/m ²) | 0,00 | 0,00 | 1,00 x 1,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 4 | Seients (0,5 kN/m ²) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 x 1,00 | 0,00 | 0,00 |
| 5 | Plaquas alveolares 15cm (3,63 kN/m ²) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 x 1,00 | 0,00 |
| 6 | sobrecarga C: reunión C5 (5 kN/m ²) | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 x 1,00 |
| 7 | TOTAL | 1,00 x 1,00 | 1,00 x 1,00 | 1,00 x 1,00 | 1,00 x 1,00 | 1,00 x 1,00 | 1,00 x 1,00 |

Figura 43: Combinació de càrrega TOTAL.

Amb aquesta combinació de càrregues, s'han comparat els valors de les reaccions de l'estructura, obtinguts amb els dos mètodes de càlcul per separat.

En primer lloc, a la taula 9 es representa l'informe de reaccions que es generen als punts base de l'estructura extret del programari "Diamonds". Aquest informe ordena les dades fent referència a una numeració dels punts corresponent al procés de disseny efectuat a l'hora de dibuixar l'estructura en aquest programari. És per això que, previ a l'exportació de l'informe, s'ha determinat una etiqueta per cada punt base corresponent a l'índex de la llista de resultats del "Karamba3D". Concretament, s'han enumerat una totalitat de trenta-sis punts, en un rang del zero al trenta-cinc, utilitzant les seves coordenades de posició com a criteri. D'aquesta manera s'ha facilitat el tractament de les dades per realitzar la comparació desitjada.

Tot i que l'informe proporciona informació detallada de totes les reaccions originades, per aquesta validació s'ha tractat únicament la força vertical. Llavors, és important fixar-se en el sentit i definició dels eixos en cadascun dels models calculats. Segons els eixos globals del programari "Diamonds", l'eix que correspon a l'alçada de l'estructura, per nomenclatura, és el que porta la lletra "Y". És un vector positiu en sentit ascendent. Per tant, els valors de força més grans que zero corresponen a un sentit ascendent i per contra, les forces de valor negatiu són reaccions descendents. Així doncs, en aquest cas s'ha realitzat la comparació amb els valors corresponents a la força "Fy" que fan referència a la component vertical de la reacció en cada punt base.

Taula 9: Informe de reaccions resultants, càlcul del disseny bàsic amb Diamonds.

| punto número | Etiqueta | reacción F _x (kN) | reacción F _y (kN) | reacción F _z (kN) | reacción M _x (kNm) | reacción M _y (kNm) | reacción M _z (kNm) |
|--------------|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 0 | 4,8 | 30,0 | 0,9 | 0,8 | 0,0 | -1,2 |
| 5 | 18 | -11,2 | 79,4 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 8 | 27 | -9,6 | 24,5 | 0,8 | 0,1 | 0,0 | 1,4 |
| 9 | 1 | 9,7 | 60,8 | 3,9 | 0,1 | 0,0 | -3,3 |
| 10 | 2 | 9,6 | 57,4 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | -2,9 |
| 11 | 3 | 9,6 | 57,3 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | -3,0 |
| 12 | 4 | 9,6 | 57,3 | 0,0 | 0,1 | 0,0 | -3,0 |
| 25 | 19 | -22,2 | 155,2 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 26 | 20 | -22,1 | 155,2 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 27 | 21 | -22,1 | 155,2 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 28 | 22 | -22,1 | 155,2 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 37 | 28 | -20,5 | 50,7 | 1,5 | 0,1 | 0,0 | 3,4 |
| 38 | 29 | -20,0 | 48,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 3,2 |
| 39 | 30 | -20,0 | 48,3 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 3,2 |
| 40 | 31 | -20,0 | 48,3 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 3,2 |
| 41 | 10 | 7,0 | 132,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 42 | 12 | 7,0 | 132,7 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 43 | 9 | 3,6 | 68,6 | 2,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 44 | 11 | 7,0 | 132,9 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 45 | 13 | 7,0 | 132,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 66 | 5 | 9,6 | 57,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -3,0 |
| 67 | 6 | 9,6 | 57,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | -2,9 |
| 68 | 7 | 9,8 | 55,9 | -0,6 | 0,0 | 0,0 | -3,3 |
| 69 | 8 | 5,0 | 35,1 | 3,6 | 0,1 | 0,0 | -1,3 |
| 70 | 23 | -22,1 | 155,2 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 71 | 24 | -22,1 | 155,2 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 72 | 25 | -22,2 | 155,1 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 73 | 26 | -11,2 | 79,5 | 0,3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 74 | 32 | -20,0 | 48,3 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 3,2 |
| 75 | 33 | -19,9 | 48,1 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 3,2 |
| 76 | 34 | -20,6 | 49,3 | 0,4 | 0,0 | 0,0 | 3,5 |
| 77 | 35 | -9,5 | 25,8 | 1,8 | 0,2 | 0,0 | 1,3 |
| 78 | 14 | 7,0 | 132,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 79 | 15 | 7,0 | 132,8 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 80 | 16 | 7,0 | 133,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| 81 | 17 | 3,6 | 68,3 | 0,1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |

Per altra banda s'han extret els resultats del càlcul parametritzat. És un càlcul que s'actualitza simultàniament als canvis que s'introdueixin a l'algoritme. Per aquest motiu, amb l'objectiu de validar el càlcul esdevé de vital importància assegurar-se d'obtenir una similitud adequada entre aquest model de càlcul i el que s'ha generat amb el programari "Diamonds". Per tant, s'ha controlat exhaustivament el disseny paramètric pel que fa a dimensions, definició d'unions i elaboració de la combinació de càrregues contemplada. Amb tot això s'han extret els resultats representats a la figura 44.

En aquesta figura s'hi mostren tres llistes de dades. Començant per l'esquerra, s'han representat les tres components dels vectors que defineixen les reaccions de cada punt base. A la llista central s'ha filtrat la primera llista i únicament s'hi mostren les components verticals de la força. Per últim, a la dreta, s'han llistat les coordenades de posició dels punts base amb les quals s'ha organitzat l'ordre de les dades. Al "Rhino", els eixos de coordenades es defineixen amb una nomenclatura diferent a la del programari "Diamonds". En aquest cas, l'eix que dona alçada al disseny és el "Z". Per tant, les forces verticals que

s'han agafat per realitzar la comparació són les corresponents a la coordenada "Z" del vector de força. Com es pot veure, el primer ítem de la llista, amb l'índex zero, és aquella reacció vertical de l'origen de coordenades. Les dades evolucionen sobre l'eix "Y" fins que s'arriba a la longitud total de la graderia.

| Reaccions (X,Y,Z) als suports de l'estructura (kN) LCO {0;0;0} | Reaccions Z als suports de l'estructura (kN) {0;0;0} | Posició del Punt {0;0;0} |
|---|---|---|
| 0 {4.445549,-0.648121,31.287972} | 0 31.287972 | 0 World XY |
| 1 {8.832339,-3.755621,62.191288} | 1 62.191288 | 1 0(0.00,5.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 2 {8.752192,-0.029604,59.132408} | 2 59.132408 | 2 0(0.00,10.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 3 {8.751818,-0.026946,59.052139} | 3 59.052139 | 3 0(0.00,15.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 4 {8.753393,-0.02443,59.058155} | 4 59.058155 | 4 0(0.00,20.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 5 {8.75441,-0.020347,59.073392} | 5 59.073392 | 5 0(0.00,25.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 6 {8.73699,-0.017513,59.026683} | 6 59.026683 | 6 0(0.00,30.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 7 {8.894983,0.783158,57.759726} | 7 57.759726 | 7 0(0.00,35.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 8 {4.452448,-3.725431,36.050562} | 8 36.050562 | 8 0(0.00,40.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 9 {3.454048,-2.327739,65.276575} | 9 65.276575 | 9 0(2.00,0.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 10 {6.695641,-0.024861,125.949696} | 10 125.949696 | 10 0(2.00,5.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 11 {6.732259,-0.043039,126.420345} | 11 126.420345 | 11 0(2.00,10.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 12 {6.72794,-0.037482,126.233334} | 12 126.233334 | 12 0(2.00,15.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 13 {6.728587,-0.037746,126.278082} | 13 126.278082 | 13 0(2.00,20.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 14 {6.727969,-0.037068,126.267217} | 14 126.267217 | 14 0(2.00,25.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 15 {6.732081,-0.036707,126.249465} | 15 126.249465 | 15 0(2.00,30.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 16 {6.70507,-0.037546,126.604215} | 16 126.604215 | 16 0(2.00,35.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 17 {3.440413,-0.078072,65.136074} | 17 65.136074 | 17 0(2.00,40.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 18 {-10.391378,-1.153196,75.288733} | 18 75.288733 | 18 0(6.00,0.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 19 {-20.619375,-0.177015,146.552654} | 19 146.552654 | 19 0(6.00,5.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 20 {-20.588528,-0.159062,146.651078} | 20 146.651078 | 20 0(6.00,10.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 21 {-20.590545,-0.151626,146.649604} | 21 146.649604 | 21 0(6.00,15.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 22 {-20.590502,-0.143842,146.646597} | 22 146.646597 | 22 0(6.00,20.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 23 {-20.590754,-0.137812,146.649352} | 23 146.649352 | 23 0(6.00,25.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 24 {-20.587004,-0.134582,146.665696} | 24 146.665696 | 24 0(6.00,30.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 25 {-20.63254,-0.127121,146.521212} | 25 146.521212 | 25 0(6.00,35.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 26 {-10.412014,-0.246222,75.145119} | 26 75.145119 | 26 0(6.00,40.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 27 {-9.783964,-0.551007,25.722566} | 27 25.722566 | 27 0(7.50,0.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 28 {-20.866495,-1.420217,52.61256} | 28 52.61256 | 28 0(7.50,5.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 29 {-20.337131,-0.064769,50.256588} | 29 50.256588 | 29 0(7.50,10.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 30 {-20.38066,-0.074144,50.365169} | 30 50.365169 | 30 0(7.50,15.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 31 {-20.376203,-0.070559,50.345416} | 31 50.345416 | 31 0(7.50,20.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 32 {-20.382381,-0.062096,50.370768} | 32 50.370768 | 32 0(7.50,25.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 33 {-20.324303,-0.059178,50.238623} | 33 50.238623 | 33 0(7.50,30.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 34 {-20.93497,-0.173059,51.441864} | 34 51.441864 | 34 0(7.50,35.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |
| 35 {-9.769383,-1.71338,26.831864} | 35 26.831864 | 35 0(7.50,40.00,0.00) Z(0.00,0.00,1.00) |

Figura 44: Resultats del càlcul amb Karamba3D per la validació.

Amb les dades recopilades que descriuen el resultat de cadascun dels càlculs s'ha realitzat una comparació com la de la taula 10. S'han ordenat els valors de reacció vertical corresponents a cadascun dels nodes estudiats i s'ha procedit a avaluar la diferència entre els dos models de càlcul. S'ha obtingut una diferència màxima d'uns 8,6 kN de força el qual implica un error no superior al 6% dels resultats obtinguts amb el "Karamba3D" respecte als del "Diamonds".

Aquestes diferències s'atribueixen al fet de que el programari paramètric disposa d'un model de càlcul no tant desenvolupat com el del programari "Diamonds", especialitzat en càlcul d'estructures. Tot i que aquest segon mètode és el més utilitzat i adient per realitzar un càlcul exhaustiu, de moment, el "Karamba3D" és l'eina que es pot utilitzar amb algorismes paramètric a través de "Grasshopper". D'aquesta manera, segons el criteri d'aquets projecte, el mètode de càlcul paramètric queda validat.

Taula 10: Comparació de reaccions i validació del càlcul.

| Etiqueta | REACCIONS | | DIFERÈNCIA | |
|-----------------|-----------|------------|------------|-----|
| | DIAMONDS | KARAMBA 3D | (kN) | (%) |
| <i>Unitats:</i> | (kN) | (kN) | (kN) | (%) |
| 0 | 30 | 31,3 | -1,3 | -4% |
| 1 | 60,8 | 62,2 | -1,4 | -2% |
| 2 | 57,4 | 59,1 | -1,7 | -3% |
| 3 | 57,3 | 59,1 | -1,8 | -3% |
| 4 | 57,3 | 59,1 | -1,8 | -3% |
| 5 | 57,3 | 59,1 | -1,8 | -3% |
| 6 | 57,3 | 59,0 | -1,7 | -3% |
| 7 | 55,9 | 57,8 | -1,9 | -3% |
| 8 | 35,1 | 36,1 | -1,0 | -3% |
| 9 | 68,6 | 65,3 | 3,3 | 5% |
| 10 | 132,5 | 125,9 | 6,6 | 5% |
| 11 | 132,9 | 126,4 | 6,5 | 5% |
| 12 | 132,7 | 126,2 | 6,5 | 5% |
| 13 | 132,8 | 126,3 | 6,5 | 5% |
| 14 | 132,8 | 126,3 | 6,5 | 5% |
| 15 | 132,8 | 126,2 | 6,6 | 5% |
| 16 | 133,1 | 126,6 | 6,5 | 5% |
| 17 | 68,3 | 65,1 | 3,2 | 5% |
| 18 | 79,4 | 75,3 | 4,1 | 5% |
| 19 | 155,2 | 146,6 | 8,6 | 6% |
| 20 | 155,2 | 146,7 | 8,5 | 6% |
| 21 | 155,2 | 146,6 | 8,6 | 6% |
| 22 | 155,2 | 146,6 | 8,6 | 6% |
| 23 | 155,2 | 146,6 | 8,6 | 6% |
| 24 | 155,2 | 146,7 | 8,5 | 5% |
| 25 | 155,1 | 146,5 | 8,6 | 6% |
| 26 | 79,5 | 75,1 | 4,4 | 5% |
| 27 | 24,5 | 25,7 | -1,2 | -5% |
| 28 | 50,7 | 52,6 | -1,9 | -4% |
| 29 | 48,1 | 50,3 | -2,2 | -4% |
| 30 | 48,3 | 50,4 | -2,1 | -4% |
| 31 | 48,3 | 50,3 | -2,0 | -4% |
| 32 | 48,3 | 50,4 | -2,1 | -4% |
| 33 | 48,1 | 50,2 | -2,1 | -4% |
| 34 | 49,3 | 51,4 | -2,1 | -4% |
| 35 | 25,8 | 26,8 | -1,0 | -4% |

6 Plànols

Aquest projecte es basa en l'elaboració d'un algoritme que permet obtenir el disseny i càlcul de diverses solucions d'estructures d'una mateixa família de manera eficient i còmode. El cost d'aquesta feina es considera com una amortització sobre cadascuna de les solucions que es plantejaran en el futur utilitzant l'eina projectada. És per això, que per avaluar el projecte s'exposen les dades d'exemple sobre una de les possibles solucions estructurals que s'extreuen de l'algoritme i el possible estalvi, tant econòmic com d'hores de feina, que pot esdevenir la utilització d'aquesta metodologia paramètrica.

Gràcies a la interoperabilitat entre els programaris de disseny i càlcul d'estructures, existeix la possibilitat d'extreure diversos informes de manera senzilla i ràpida sobre l'estructura que s'ha projectat amb l'algoritme.

Una de les possibilitats és la d'enllaçar l'algoritme generat amb l'eina de "Grasshopper" amb el programari de disseny BIM "Tekla Structures". Existeix una extensió per l'eina de programació de l'algoritme que permet dissenyar rutines d'enllaç i generació d'un model a "Tekla". Per tant, un model enllaçat a l'algoritme, és un model que es genera simultàniament a l'execució d'aquest. Així doncs, cada vegada que s'ingressa un canvi en qualsevol rutina o paràmetre, aquest model de "Tekla" també s'actualitza.

Aquesta és una més de les possibilitats que caracteritzen el potencial del procés de disseny estudiat en aquest projecte. Una vegada aconseguit el model al programari "Tekla" es poden generar i exportar els plànols i informes desitjats.

Per mostrar els possibles resultats del procediment a seguir per una possible solució s'ha extret un exemple de plànol general de l'estructura utilitzant l'algoritme elaborat en aquest projecte. Consultar l'Annex A: Plànols.

7 Avaluació econòmica

També s'ha exportat, com exemple, un informe d'amidaments del disseny bàsic mitjançant el model paramètric i l'enllaç d'aquest al programari "Tekla Structures". És un informe detallat de tots els perfils, plaques i cargols que són necessaris per l'execució de l'estructura. Amb aquest informe es pot realitzar una avaluació econòmica del que costarà la construcció de cada disseny plantejat en pocs minuts. En el cas de l'estructura estàndard dissenyada s'ha calculat un cost estimat de 52.197,66 € .

Per tal d'avaluar d'alguna manera les capacitats esmentades que ofereix el disseny paramètric respecte el disseny convencional, s'ha volgut calcular l'estalvi resultant entre la construcció i disseny de l'estructura estàndard, dissenyada amb "Diamonds" de bon principi, i la possible optimització d'aquesta, obtinguda gràcies a les rutines d'optimització de "Karamba3D". Segons els càlculs contemplats en aquest projecte, s'ha estimat un estalvi de 19.088,64 € .

Per veure el detall d'aquests informes i càlculs, consultar l'Annex B: Amidaments i Pressupost.

8 Conclusions

Per concloure el projecte es pot afirmar que s'han assolit els objectius establerts. S'ha elaborat un algoritme que genera el disseny d'una estructura metàl·lica i elabora un càlcul simultani als canvis paramètrics establerts. Els resultats d'aquest s'han validat amb la comparació del disseny i càlcul convencionals obtenint una desviació acceptable. El potencial de la metodologia emprada ha quedat demostrat mitjançant diversos exemples mostrats en aquest projecte i efectuats amb aquesta mateixa intenció. Els avantatges de l'aprofitament de la capacitat computacional que ofereixen les màquines d'avui en dia en l'àmbit del disseny estructural ha quedat reflectit amb les dades obtingudes. Les possibilitats que ofereix la interoperabilitat entre els diversos programaris de construcció esmentats resulta en una millora de l'eficiència dels processos de disseny i càlcul així com una reducció d'errors significativa.

La informació, coneixement i resultats obtinguts amb la realització d'aquest projecte han confirmat el motiu per el qual l'evolució del disseny estructural va encaminat cap a una metodologia de disseny paramètric.

9 Relació de Documents

Aquest projecte està format per un únic document: DOC1-Memòria i Annexos

10 Bibliografia

- [1] CONSTRUSOFT. Curs Online – “Parametrización del Cálculo de Estructuras y Modelos BIM”
- [2] Andrew Payne & Rajaa Issa. Manual de Grasshopper, Segunda Edición – Per versió 0.6.0007. Any 2009
- [3] The official guide to using Karamba3D 2.2.0.
Disponible a: <https://manual.karamba3d.com/>
- [4] Preisinger, C. (2013), *Linking Structure and Parametric Geometry*. Architectural Design, 83: 110-113 DOI: 10.1002/ad.1564
- [5] Prefabricats Planas. Catàleg tècnic - Prefabricats de formigó.
- [6] Documento Básico SE-AE – Seguridad Estructural, Acciones en la Edificación. Abril 2009

Annex A : Plànols

Gràcies a la interoperabilitat entre els programaris de disseny i càlcul d'estructures, existeix la possibilitat d'extreure diversos informes de manera senzilla i ràpida sobre l'estructura que s'ha projectat amb l'algoritme. Un dels documents exportats és el plànol general de l'estructura que fa referència al disseny bàsic. S'ha adjuntat al final d'aquest document la figura 45 per mostrar l'aparença final d'un exemple.

Amb l'exhibició d'aquesta figura es pretén demostrar breument una més de les possibilitats que ofereix el procés de disseny paramètric. Concretament la de extreure plànols ja establerts anteriorment de qualsevol de les solucions projectades. És a dir, si al document del programari "Tekla Structures" enllaçat a l'algoritme s'hi defineixen les característiques d'un o més plànols, ja siguin genèrics o de detall, i els paràmetres de l'algoritme s'ajusten per donar una nova solució, els documents en qüestió s'actualitzaran de manera simultània al processament de la informació de l'algoritme. Per tant, en qüestió de minuts es disposarà de tots aquells documents establerts anteriorment però, aquest cop, fent referència a la nova solució projectada.

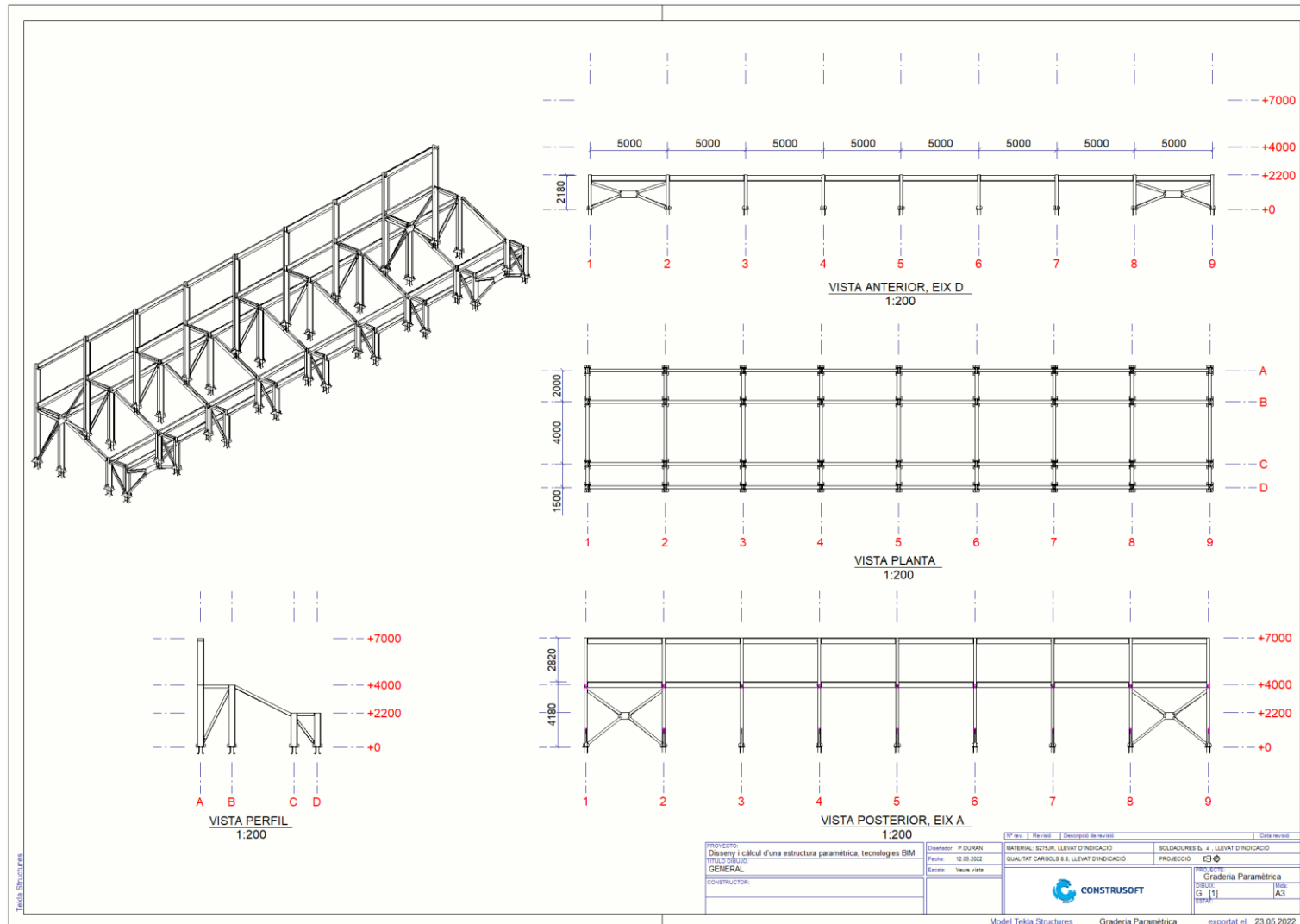


Figura 45: Plànol general del disseny bàsic de l'estructura paramètrica

Annex B : Amidaments i Pressupost

Gràcies a la interoperabilitat entre els programaris de disseny i càlcul d'estructures, existeix la possibilitat d'extreure diversos informes de manera senzilla i ràpida sobre l'estructura que s'ha projectat amb l'algoritme. D'aquesta manera es pot fer una estimació del cost d'execució de cadascuna de les solucions plantejades en qüestió de minuts i permet realitzar una comparació econòmica entre elles.

En aquest cas, per mostrar un exemple, s'ha extret l'informe de materials i l'informe de cargoleria del disseny base plantejat en aquest projecte. Al primer d'aquests dos s'hi pot trobar un valor de la massa de l'estructura en quilograms bastant ajustat: vint-i-vuit mil nou-cents noranta-vuit coma set quilograms. Per tant, amb les dades que aporten aquests dos informes, adjuntats al final d'aquest mateix annex, es pot dur a terme una estimació econòmica de l'estructura dissenyada mitjançant l'algoritme.

Concretament, per calcular l'estimació del pressupost d'execució de l'estructura, s'ha utilitzat la massa determinada per l'informe de materials i s'ha multiplicat per un preu d'euros el quilogram. Aquest preu s'ha determinat per diferents factors. Principalment, el factor més determinant és el de la matèria primera utilitzada. Actualment el preu de l'acer s'aproxima als 1,40 €/kg i per tant s'ha utilitzat aquest valor per calcular l'estimació. Per altra banda, existeixen tots els costos de fabricació, muntatge i hores d'oficina. En aquest temps d'oficina s'hi considera la part proporcional de l'amortització de les hores invertides en l'elaboració de l'algoritme plantejat en aquest projecte. En aquest cas, s'ha considerat un suplement de 0,40€/kg per fer referència als factors esmentats. Per tant, en conjunt s'ha considerat un preu de 1,80 €/kg.

En total, el cost estimat de l'estructura estàndard dissenyada per donar exemple del funcionament i capacitats de l'algoritme seria el calculat a la fórmula següent:

$$28.998,7 \text{ kg} \times (1,40 + 0,40) \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 52.197,66 \text{ €} \quad (2)$$

El cost total que s'ha considerat per l'execució del disseny base és de cinquanta-dos mil cent noranta-set coma seixanta-sis euros.

S'ha comparat el cost de l'estructura amb la possible optimització determinada en aquest projecte com a exemple de possibilitats que permet l'algoritme, utilitzant el mateix factor de cost. La massa interpretada pel càlcul de "Karamba3D" no té en compte el material i components que formen part de les unions inserides posteriorment amb el programari "Tekla Structures". És per això que s'ha realitzat una comparació de costos entre les dues masses obtingudes a l'algoritme. Tal i com s'han representat a la figura 41 de l'apartat "4.4 Optimització de l'estructura", els seus valors són: vint-i-sis mil cinc-cents coma cinquanta-nou quilograms pel disseny base i quinze mil vuit-cents noranta-cinc coma setanta-nou quilograms d'acer pel que fa al disseny optimitzat pel "Karamba 3D". Així doncs, els càlculs corresponents a l'avaluació econòmica realitzada són els següents:

- Costos d'execució del disseny base:

$$26.500,59 \text{ kg} \times (1,40 + 0,40) \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 47.701,06 \text{ €} \quad (3)$$

- Costos d'execució del disseny optimitzat:

$$15.895,79 \text{ kg} \times (1,40 + 0,40) \frac{\text{€}}{\text{kg}} = 28.612,42 \text{ €} \quad (4)$$

- Estalvi:

$$47.701,6\text{€} - 28.612,42 \text{ €} = 19.088,64 \text{ €} \quad (5)$$

Per tant, l'estimació de l'estalvi obtingut amb l'optimització d'aquesta estructura gràcies al potencial del procés de disseny paramètric utilitzat ha estat de dinou mil vuitanta-vuit coma seixanta-quatre euros.

TEKLA STRUCTURES LISTA MATERIAL

| Modelo: | Graderio Algoritmo | | | | | |
|------------------|--------------------|----------|--------|--------------|------------------------|-----------|
| Proyecto: | número proyecto | | | | | |
| Fecha: | 25.05.2022 | | | | | |
| Hora: | 15:18:56 | | | | | |
| Perfil | Parte | Material | Número | Longitud *** | Área (m ²) | Peso (kg) |
| D16 | PS4 | S275JR | 144 | 578 | 0.0 | 0.8 |
| Subtotal: | | | | 83270 | 4.1 | 118.1 |
| HEB200 | b1 | S275JR | 9 | 1078 | 1.2 | 66.1 |
| HEB200 | b2 | S275JR | 9 | 1578 | 1.8 | 96.7 |
| HEB200 | b10 | S275JR | 9 | 4106 | 4.7 | 251.7 |
| Subtotal: | | | | 60858 | 70.0 | 3730.1 |
| IPE160 | b3 | S275JR | 9 | 3808 | 2.4 | 60.1 |
| IPE160 | b4 | S275JR | 2 | 2794 | 1.7 | 44.1 |
| IPE160 | b5 | S275JR | 2 | 2794 | 1.7 | 44.1 |
| IPE160 | b6 | S275JR | 2 | 2096 | 1.3 | 33.1 |
| IPE160 | b7 | S275JR | 1 | 2098 | 1.3 | 33.1 |
| IPE160 | b8 | S275JR | 1 | 2093 | 1.3 | 33.0 |
| IPE160 | b9 | S275JR | 9 | 1957 | 1.2 | 30.9 |
| IPE160 | b11 | S275JR | 1 | 2148 | 1.3 | 33.9 |
| IPE160 | b12 | S275JR | 1 | 2146 | 1.3 | 33.8 |
| IPE160 | b13 | S275JR | 2 | 2912 | 1.8 | 45.9 |
| IPE160 | b14 | S275JR | 2 | 2912 | 1.8 | 45.9 |
| IPE160 | b15 | S275JR | 1 | 2144 | 1.3 | 33.8 |
| IPE160 | b16 | S275JR | 1 | 2141 | 1.3 | 33.8 |
| Subtotal: | | | | 91672 | 57.1 | 1445.7 |
| IPE360 | Concrete1 | S275JR | 40 | 4778 | 6.5 | 272.7 |
| Subtotal: | | | | 191120 | 258.6 | 10907.1 |
| IPE400 | c1 | S275JR | 9 | 2180 | 3.2 | 144.6 |
| IPE400 | c2 | S275JR | 9 | 2180 | 3.2 | 144.6 |
| IPE400 | c3 | S275JR | 9 | 6980 | 10.2 | 463.0 |
| IPE400 | c4 | S275JR | 9 | 3980 | 5.8 | 264.0 |
| Subtotal: | | | | 137880 | 202.3 | 9145.9 |
| PD32*8 | PS1 | S275JR | 288 | 8 | 0.0 | 0.0 |
| PD32*8 | PS3 | S275JR | 288 | 16 | 0.0 | 0.1 |
| Subtotal: | | | | 6912 | 1.1 | 31.3 |
| PL10*80 | P18 | S275JR | 8 | 369 | 0.1 | 2.3 |
| Subtotal: | | | | 2952 | 0.5 | 18.1 |
| PL10*100 | P9 | S275JR | 18 | 347 | 0.1 | 1.7 |
| PL10*100 | P10 | S275JR | 18 | 459 | 0.1 | 2.0 |
| PL10*100 | P11 | S275JR | 4 | 252 | 0.0 | 1.4 |
| PL10*100 | P12 | S275JR | 4 | 195 | 0.0 | 1.2 |
| PL10*100 | P13 | S275JR | 4 | 187 | 0.0 | 1.2 |
| PL10*100 | P16 | S275JR | 144 | 200 | 0.0 | 1.4 |
| PL10*100 | P17 | S275JR | 4 | 239 | 0.0 | 1.3 |
| PL10*100 | PS2 | S275JR | 144 | 100 | 0.0 | 0.8 |
| Subtotal: | | | | 61194 | 11.9 | 398.0 |

| | | | | | | |
|-----------|-----|--------|-----|-------|-------------------------|--------------|
| PL10*150 | P6 | S275JR | 80 | 350 | 0.1 | 4.1 |
| PL10*150 | P7 | S275JR | 36 | 190 | 0.1 | 2.2 |
| PL10*150 | P8 | S275JR | 18 | 214 | 0.1 | 2.5 |
| Subtotal: | | | | 38690 | 12.8 | 455.6 |
| PL10*360 | P5 | S275JR | 80 | 390 | 0.3 | 11.0 |
| Subtotal: | | | | 31200 | 23.7 | 881.7 |
| PL12*438 | P1 | S275JR | 1 | 1310 | 1.1 | 52.2 |
| PL12*460 | P2 | S275JR | 1 | 804 | 0.7 | 32.0 |
| PL12*460 | P3 | S275JR | 1 | 803 | 0.7 | 31.9 |
| Subtotal: | | | | 1606 | 1.4 | 63.9 |
| PL15*100 | P15 | S275JR | 144 | 200 | 0.0 | 2.1 |
| Subtotal: | | | | 28800 | 6.2 | 296.7 |
| PL20*400 | P14 | S275JR | 36 | 620 | 0.5 | 38.9 |
| Subtotal: | | | | 22320 | 19.3 | 1401.7 |
| Total: | | | | | 671.4 (m ²) | 28998.7 (kg) |

TEKLA STRUCTURES LISTA TORNILLOS

| Modelo: | Graderio Algoritmo | | | |
|------------------|--------------------|----------|--------|--|
| Proyecto: | número proyecto | | | |
| Fecha: | 25.05.2022 | | | |
| Hora: | 15:19:34 | | | |
| Nombre | Tipo | Material | Número | |
| TORNILLO_M16*40 | 4017 | 8.8 | 136 | |
| TORNILLO_M16*45 | 4017 | 8.8 | 320 | |
| TORNILLO_M16*50 | 4017 | 8.8 | 216 | |
| TUERCA_M16 | 4032 | | 672 | |
| ARANDELA_M16 | 7089 | | 672 | |

Powered by