



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Simulación MEF en entornos de diseño paramétrico. Aplicación al diseño estructural

Finite Element Analysis in parametric design environments. Application to structural design

Autor

Guillermo Pinilla Gómez

Director

Sergio Puértolas Broto

Titulación del autor

Grado en Ingeniería Mecánica

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2021

Resumen

En este trabajo fin de grado se presenta una metodología de simulación por el Método de los Elementos Finitos (MEF) para entornos de diseño paramétrico ligada al diseño estructural. Para desarrollarla se recurre a un entorno de diseño gráfico de uso general como es el programa Rhinoceros, donde para generar las geometrías parametrizadas se utiliza el entorno Grasshopper, y Karamba 3D para el análisis MEF de la estructura.

Se expone la metodología con tres casos de estudio básicos, que permiten entender y comprobar los resultados en cada uno de los pasos del proceso de generación del modelo y simulación, hasta llegar a la solución óptima de la estructura en base a los requerimientos planteados. Se incorpora en el proceso el uso del módulo Galapagos de Grasshopper que permite optimizar ciertos parámetros a raíz de modificaciones de algunas partes de la geometría en base a algoritmos genéticos. Finalmente, para observar las posibilidades de la metodología planteada mediante el uso combinado de los programas mencionados, se plantea como caso de aplicación el diseño y dimensionado de una cubierta curva conformada con una celosía tridimensional sustentada sobre cuatro pilares, la posición de los pilares se optimizará para disminuir los esfuerzos en la estructura y conseguir una estructura lo más ligera posible.

Se comparan los resultados obtenidos utilizando Karamba 3D con los obtenidos por el programa comercial de uso profesional RFEM para los casos de estudio básico, y así contrastar y comprobar la fiabilidad de los resultados de cálculo obtenidos, y la optimización respecto a la posición de los apoyos para un caso sencillo con solución analítica.

También se desarrollan ciertos aspectos de interés para el uso combinado con otros programas; como el uso y creación de una biblioteca propia de secciones y la exportación de los modelos al programa RFEM.

Además, se incluyen dos anexos, uno de ellos referente al desarrollo del modelo para los casos de estudio básicos en Karamba 3D paso a paso y el otro con una lista de los módulos del programa con explicaciones sobre su funcionalidad, sus entradas y sus salidas.

Índice

1	Introducción	12
1.1	Objeto del proyecto	12
1.2	Rhinoceros (Rhino)	12
1.3	Grasshopper	13
1.4	Karamba 3D	13
2	Metodología y desarrollo de casos.....	15
2.1	Introducción	15
2.2	Caso1.....	16
2.2.1	Introducción	16
2.2.2	Metodología aplicada.....	17
I	Geometría	17
II	Creación de los elementos del modelo	18
III	Ensamblaje y optimización de las secciones	21
IV	Visualización de resultados	22
2.3	Caso 2.....	23
2.3.1	Introducción.....	23
2.3.2	Metodología aplicada.....	24
I	Geometría.....	24
II	Creación de los elementos del modelo.....	25
III	Ensamblaje y optimización de secciones.....	27
IV	Visualización de resultados.....	29
2.4	Caso 3.....	30
2.4.1	Introducción.....	30
2.4.2	Metodología aplicada.....	31
I	Geometría.....	31
II	Creación de los elementos del modelo.....	33
III	Ensamblaje y optimización de secciones.....	36
IV	Visualización de resultados.....	38
2.5	Caso 4.....	39
2.5.1	Introducción.....	39
2.5.2	Metodología aplicada.....	40
I	Geometría.....	40
II	Creación de elementos e introducción de material y secciones.....	42
III	Ensamblaje y optimización de secciones.....	46
IV	Visualización de resultados.....	48
3	Otros aspectos de interés.....	51
3.1	Creación y uso de una biblioteca propia de secciones en Karamba.....	51
3.2	Exportación del modelo desde Karamba 3D a RFEM.....	52
4	Análisis de resultados y comparación con los obtenidos con RFEM.....	55
4.1	Introducción	55
4.2	Opciones de visualización de resultados	55
4.3	Caso 1.....	59
4.4	Caso 2.....	64

4.5	Caso 3.....	68
5	Conclusiones.....	72
6	Bibliografía.....	74
1	Anexos	76
1.1	Anexo 1. Modelado guiado.....	76
1.1.1	Primeros pasos.....	76
1.1.2	Funciones del ratón y teclas.....	78
1.1.3	Entorno de trabajo	79
1.1.4	Creación de archivos y búsqueda de módulos.....	79
1.1.5	Caso 1.....	81
1.1.6	Caso 2.....	91
1.1.7	Caso 3.....	102
1.1.8	Caso 4.....	117
1.2	Anexo 2. Módulos utilizados.....	137

Índice de figuras

Figura 1 Logo Rhinoceros. Fuente:[4]	12
Figura 2 Logo Grasshopper. Fuente:[6].....	13
Figura 3 Logo Karamba 3D. Fuente:[2]	13
Figura 4 Esquema Caso 1. Pórtico plano a dos aguas.	16
Figura 5 Script del Caso 1 con partes diferenciadas.	17
Figura 6 Geometría del Caso 1.....	17
Figura 7 Creación de elementos del modelo del Caso 1.	18
Figura 8 Creación de barras y apoyos del Caso 1.....	19
Figura 9 Creación de cargas del Caso 1.....	20
Figura 10 Selección de material y secciones del Caso 1.....	21
Figura 11 Ensamblaje y optimización de secciones del Caso1.....	21
Figura 12 Visualización de resultados del Caso1.....	22
Figura 13 Esquema Caso 2. Viga biapoyada con extremos en voladizo.....	23
Figura 14 Script del Caso 2 con partes diferenciadas.	24
Figura 15 Geometría del Caso 2.....	24
Figura 16 Creación de los elementos del modelo.....	25
Figura 17 Creación de barras y apoyos del Caso2.....	25
Figura 18 Creación de cargas del Caso2.....	26
Figura 19 Selección de material y secciones del Caso 2.....	26
Figura 20 Ensamblaje y optimización de secciones del Caso 2.	27
Figura 21 Conexiones de Galapagos.	27
Figura 22 Options del menú de Galapagos del caso 2.	28
Figura 23 Inicio de la optimización mediante Galapagos del caso 2.....	28
Figura 24 Resultado de la optimización del caso 2.	29
Figura 25 Posición de los apoyos tras la optimización con Galapagos.....	29
Figura 26 Visualización de resultados del Caso 2.....	29
Figura 27 Esquema Caso 3 Pórtico rígido con optimización en la posición de los pilares intermedios.....	30
Figura 28 Script del Caso 3 con partes diferenciadas.	31
Figura 29 Geometría del Caso 3.....	31
Figura 30 Creación de los elementos del modelo del Caso 3.....	33
Figura 31 Creación de barras y apoyos del Caso 3.....	34
Figura 32 Creación de cargas del caso 3.	35
Figura 33 Selección de material y secciones.....	36
Figura 34 Ensamblaje y optimización de secciones del Caso 3.	36
Figura 35 Conexión de Galapagos del caso 3.	37
Figura 36 Resultados de la optimización de Galapagos del caso 3.	37
Figura 37 Resultados en la optimización de los pilares.....	38
Figura 38 Visualización de resultados del Caso 3.....	38
Figura 39 Esquema caso 4.....	39
Figura 40 Script del Caso 4 con partes diferenciadas.	40
Figura 41 Geometría del caso 4.	40
Figura 42 Creación de los elementos y selección de material y secciones del caso 4. ..	43
Figura 43 Creación de barras y apoyos del caso 4.	44
Figura 44 Creación de cargas del caso 4.	44
Figura 45 Selección de material y secciones del caso 4.	45

Figura 46 Creación de grupos de elementos.	46
Figura 47 Ensamblaje del modelo y optimización de secciones del caso 4.	47
Figura 48 Resultados de la optimización en Galapagos.	48
Figura 49 Resultado posición pilares.	48
Figura 50 Visualización de resultados del caso 4.	48
Figura 51 Estructura según colores de los grupos.	49
Figura 52 Esfuerzos axiles (Nx). Detalle de uno de los pilares.	49
Figura 53 Deformada de la estructura.	50
Figura 54 Creación de la sección IPE 80.	51
Figura 55 Ejemplo biblioteca sección IPE 80.	51
Figura 56 Ejemplo biblioteca Serie IPE.	52
Figura 57 Lectura de tabla de secciones desde archivo .csv.	52
Figura 58 Lectura de tabla de secciones desde archivo .bin.	52
Figura 59 Utilización del módulo Export To DStv.	53
Figura 60 Ventana Select file path to file for export.	53
Figura 61 Caso 4 con RFEM.	54
Figura 62 Módulos ModelView, BeamView y Legend.	55
Figura 63 Opciones de Display Scales del módulo ModelView.	56
Figura 64 Opciones de Render Settings del módulo ModelView.	56
Figura 65 Length/Segment mal ajustado.	57
Figura 66 Length/Segment bien ajustado.	57
Figura 67 Opciones de Tags del módulo ModelView.	57
Figura 68 Opciones de Colours del módulo ModelView.	58
Figura 69 Opciones de Result Case del módulo ModelView.	58
Figura 70 Opciones de Section Forces del módulo BeamView.	59
Figura 71 Opciones de Render Settings del módulo BeamView.	59
Figura 72 Reacciones del caso 1 obtenidas mediante Karamba 3D.	60
Figura 73 Reacciones del caso 1 obtenidas mediante RFEM.	60
Figura 74 Diagrama My del caso 1 obtenido mediante Karamba 3D.	61
Figura 75 Diagrama My del caso 1 obtenido mediante RFEM.	61
Figura 76 Diagrama Nx del caso 1 obtenido mediante Karamba 3D.	62
Figura 77 Diagrama Nx del caso 1 obtenido mediante RFEM.	62
Figura 78 Diagrama Vz del caso 1 obtenido mediante Karamba 3D.	63
Figura 79 Diagrama Vz del caso 1 obtenido mediante RFEM.	63
Figura 80 Reacciones del caso 2 obtenidas mediante Karamba 3D.	64
Figura 81 Reacciones del caso 2 obtenidas mediante RFEM.	64
Figura 82 Diagrama My del caso 1 obtenido mediante Karamba 3D.	65
Figura 83 Diagrama My del caso 1 obtenido mediante RFEM.	65
Figura 84 Diagrama Vz del caso 2 obtenido mediante Karamba 3D.	65
Figura 85 Diagrama Vz del caso 2 obtenido mediante RFEM.	66
Figura 86 Equilibrio de fuerzas.	66
Figura 87 Condición 1.	67
Figura 88 Condición 2.	67
Figura 89 Resultados de la posición de los apoyos del caso 2 obtenidos con Galapagos.	68
Figura 90 Reacciones del caso 3 obtenidas mediante Karamba 3D.	68
Figura 91 Reacciones del caso 3 obtenidas mediante RFEM.	69

Figura 92 Diagrama My del caso 3 obtenido mediante Karamba 3D.....	69
Figura 93 Diagrama My del caso 3 obtenido mediante RFEM.....	70
Figura 94 Diagrama Nx del caso 3 obtenido mediante Karamba 3D.	70
Figura 95 Diagrama Nx del caso 3 obtenido mediante RFEM.....	70
Figura 96 Diagrama Vz del caso 3 obtenido mediante Karamba 3D.....	71
Figura 97 Diagrama Vz del caso 3 obtenido mediante RFEM.	71
Figura 98 Acceso a Grasshopper desde barra de comandos.	76
Figura 99 Acceso a Grasshopper desde herramientas.....	76
Figura 100 Ventana de Grasshopper.	77
Figura 101 Ventanas de Rhinoceros y Grasshopper.	77
Figura 102 Ampliación de una de las vistas de la ventana de Rhinoceros.....	78
Figura 103 Ventana de Rhinoceros con la vista Perspectiva ampliada y ventana de Grasshopper.....	78
Figura 104 Entorno de trabajo.....	79
Figura 105 Acceso a módulo Loads desde barra de módulos.....	80
Figura 106 Acceso a módulo Loads desde buscador.....	80
Figura 107 Creación de un documento nuevo.....	81
Figura 108 Creación del punto origen del caso 1.....	81
Figura 109 Introducción de coordenadas del punto origen.....	82
Figura 110 Creación del punto (0,0,4) y (6,0,0).....	82
Figura 111 Creación del punto (6,0,4).....	83
Figura 112 Creación del punto de la cumbre.....	83
Figura 113 Creación de las líneas de la geometría.....	84
Figura 114 Creación de barras del caso 1.	84
Figura 115 Creación de apoyos del caso 1.	84
Figura 116 Creación de la carga de gravedad del caso 1.	85
Figura 117 Creación de cargas puntuales del caso 1.	86
Figura 118 Creación de la carga uniforme lineal del caso 1.....	86
Figura 119 Selección del material del caso 1.	87
Figura 120 Selección de las secciones del caso 1.....	87
Figura 121 Creación de la serie de selección de secciones del caso 1.	88
Figura 122 Ensamblaje del modelo del caso 1.	88
Figura 123 Optimización de las secciones del caso 1.....	89
Figura 124 Creación de la condición de desplazamiento para la optimización de las secciones del caso 1.....	89
Figura 125 Visualización del modelo del caso 1.....	90
Figura 126 Renderización de las barras del caso 1.	90
Figura 127 Visualización de resultados del caso 1.	91
Figura 128 Creación del punto origen del caso 2.....	91
Figura 129 Introducción de coordenadas del punto origen del caso 2.....	92
Figura 130 Creación del punto final de la barra (7,0,0) del caso 2.....	92
Figura 131 Configuración del Gene Pool del caso 2.....	92
Figura 132 Creación de los puntos de los apoyos.....	93
Figura 133 Creación de las líneas de la geometría del caso 2.....	93
Figura 134 Creación de barras del caso 2.	93
Figura 135 Creación de apoyos del caso 2.	94
Figura 136 Creación de la carga de gravedad del caso 2.	94

Figura 137 Creación de la carga uniforme lineal del caso 2.....	95
Figura 138 Selección del material del caso 2.	95
Figura 139 Selección de las secciones del caso 2.....	96
Figura 140 Creación de la serie de selección de secciones del caso 2.	96
Figura 141 Ensamblaje del modelo del caso 2.	97
Figura 142 Optimización de las secciones del caso 2.....	97
Figura 143 Creación de la condición de desplazamiento para la optimización de las secciones del caso 2.	98
Figura 144 Visualización del modelo del caso 2.....	98
Figura 145 Renderización de las barras del caso 2.	99
Figura 146 Visualización de resultados del caso 2.	99
Figura 147 Conexión de Galapagos en el caso 2.	100
Figura 148 Options del menú de Galapagos del caso 2.	100
Figura 149 Inicio de la optimización mediante Galapagos del caso 2.....	101
Figura 150 Resultados de la optimización de Galapagos del caso 2.	101
Figura 151 Resultado de la optimización de los apoyos.	101
Figura 152 Creación del punto origen del caso 3.....	102
Figura 153 Introducción de coordenadas del punto origen del caso 3.....	102
Figura 154 Configuración del Gene Pool del caso 3.....	103
Figura 155 Creación del dominio donde esta la puerta.	103
Figura 156 Script para borrar valores que se encuentren dentro del dominio.....	104
Figura 157 Creación de los puntos correspondientes a la cabeza de los pilares.	104
Figura 158 Creación de los puntos correspondientes a la base de los pilares.....	105
Figura 159 Creación de las líneas correspondientes a los pilares.....	105
Figura 160 Creación de los puntos de aplicación de las cargas puntuales.....	106
Figura 161 Organización y unión de todos los puntos correspondientes a las vigas..	106
Figura 162 Creación de la expresión del módulo Length (Lng).	107
Figura 163 Creación de la lista de puntos correspondiente a los puntos iniciales de las vigas.	107
Figura 164 Creación de la lista de puntos correspondiente a los puntos finales de las vigas.	107
Figura 165 Creación de las líneas correspondientes a las vigas.....	108
Figura 166 Creación de barras del caso 3.	108
Figura 167 Introducción de texto en la entrada Id del módulo Line to Beam.	108
Figura 168 Creación de apoyos del caso 3.	109
Figura 169 Creación de la carga de gravedad del caso 3.	109
Figura 170 Creación de cargas puntuales del caso 3.	110
Figura 171 Creación de la carga uniforme lineal del caso 3.....	110
Figura 172 Selección del material del caso 3.	111
Figura 173 Selección de las secciones del caso 3.....	111
Figura 174 Creación de la serie de selección de secciones del caso 2.	112
Figura 175 Ensamblaje del modelo del caso 3.	112
Figura 176 Optimización de las secciones del caso 3.....	113
Figura 177 Creación de la condición de desplazamiento para la optimización de las secciones del caso 3.	113
Figura 178 Introducción de expresión para pasar de m a cm en entrada MaxDisp.....	114
Figura 179 Visualización del modelo del caso 3.....	114

Figura 180 Renderización de las barras del caso 3.	115
Figura 181 Visualización de resultados del caso 3.	115
Figura 182 Conexión de Galapagos en el caso 3.	116
Figura 183 Options del menú de Galapagos del caso 3.	116
Figura 184 Inicio de la optimización mediante Galapagos del caso 3.	116
Figura 185 Resultados de la optimización de Galapagos del caso 3.	117
Figura 186 Resultados en la optimización de los pilares.	117
Figura 187 Curva de puntos de control.	118
Figura 188 Mostrar puntos de control.	118
Figura 189 Creación de las 2 curvas base de la cubierta.	119
Figura 190 introducción de curvas en Grasshopper.	119
Figura 191 Curvas introducidas en Grasshopper.	120
Figura 192 Creación de superficie a partir de dos curvas.	120
Figura 193 División de la superficie en pequeñas superficies.	121
Figura 194 Deconstrucción de las superficies.	121
Figura 195 Creación de líneas correspondientes a la parte superior de la cubierta.	121
Figura 196 Creación de vértices de la parte inferior de la cubierta.	122
Figura 197 Configuración del módulo Path Mapper.	122
Figura 198 Creación de las líneas correspondientes a la parte inferior de la cubierta.	123
Figura 199 Creación de las líneas correspondientes a la parte intermedia de la cubierta.	123
Figura 200 Creación del plano auxiliar.	124
Figura 201 Creación de las líneas auxiliares.	125
Figura 202 Configuración del Gene Pool.	125
Figura 203 Creación de las líneas pertenecientes a los pilares.	126
Figura 204 Creación de barras del caso 4.	126
Figura 205 Introducción de texto en la entrada Id del módulo Line to Beam del caso 4.	127
Figura 206 Creación de apoyos del caso 4.	127
Figura 207 Creación de la carga de gravedad del caso 4.	128
Figura 208 Creación de la carga de malla constante del caso 4.	128
Figura 209 Creación de la carga de malla constante del caso 4 ampliada.	129
Figura 210 Selección de material del caso 4.	129
Figura 211 Selección de las secciones del caso 4.	130
Figura 212 Creación de grupos.	131
Figura 213 Introducción de nombre de grupo.	131
Figura 214 Ensamblaje del modelo del caso 4.	132
Figura 215 Optimización de las secciones del caso 4.	132
Figura 216 Introducción de grupos al módulo Optimize Cross Section.	133
Figura 217 Visualización del modelo del caso 4.	133
Figura 218 Renderización de las barras del caso 4.	134
Figura 219 Visualización de resultados del caso 4.	134
Figura 220 Exportación del modelo a RFEM.	135
Figura 221 Options del menú de Galapagos del caso 4.	135
Figura 222 Inicio de la optimización mediante Galapagos del caso 4.	136
Figura 223 Resultados de la optimización de Galapagos del caso 4.	136
Figura 224 Resultados en la optimización de los pilares del caso 4.	136

Figura 225 Módulo Area.	137
Figura 226 Módulo Construct Domain.....	137
Figura 227 Módulo Cull Index.	138
Figura 228 Módulo Cull Pattern.....	138
Figura 229 Módulo Curve.	138
Figura 230 Módulo Divide Domain2.	138
Figura 231 Módulo Division.	139
Figura 232 Módulo Deconstruct Brep.....	139
Figura 233 Módulo Equality.....	139
Figura 234 Módulo Explode.	140
Figura 235 Módulo Flip Matrix.....	140
Figura 236 Módulo Gene Pool.	141
Figura 237 Menú del Gene Pool.....	141
Figura 238 Módulo Includes.	141
Figura 239 Módulo Isotrim.	142
Figura 240 Módulo Legend.	142
Figura 241 Módulo Length.....	142
Figura 242 Módulo Line.	143
Figura 243 Módulo Line SDL.	143
Figura 244 Módulo List Item.	144
Figura 245 Módulo List Length.	144
Figura 246 Módulo Loft.....	144
Figura 247 Módulo Merge.	145
Figura 248 Módulo Mesh Surface.....	145
Figura 249 Módulo Move.....	145
Figura 250 Módulo Multiplication.	146
Figura 251 Módulo Slider.....	146
Figura 252 Menú del Slider.....	146
Figura 253 Módulo Panel como entrada.....	147
Figura 254 Módulo Panel como salida.....	147
Figura 255 Módulo Path Mapper.....	147
Figura 256 Módulo Plane Surface.....	147
Figura 257 Módulo Point.	148
Figura 258 Módulo PolyLine.	148
Figura 259 Módulo Radians.	148
Figura 260 Módulo Series.	148
Figura 261 Módulo Shift List.	149
Figura 262 Módulo Sine.	149
Figura 263 Módulo Short List.....	149
Figura 264 Módulo Sort Points.	150
Figura 265 Módulo Surface / Line.....	150
Figura 266 Módulo Tangent.....	151
Figura 267 Módulo Unit X.	151
Figura 268 Módulo Unit Y.	151
Figura 269 Módulo Unit Z.	151
Figura 270 Módulo Vector XYZ.	151
Figura 271 Módulo Assemble model.	152

Figura 272 Módulo Beam Resultant Forces.	152
Figura 273 Módulo BeamView.....	153
Figura 274 Módulo Cross Section Range Selector.	154
Figura 275 Módulo Cross Section Selector.	154
Figura 276 Módulo Disassemble.....	155
Figura 277 Módulo Export Model to DStV.....	155
Figura 278 Módulo Line to Beam.....	156
Figura 279 Módulo Loads Gravity.....	157
Figura 280 Módulo Loads Point.....	157
Figura 281 Módulo Loads Uniform Line.....	158
Figura 282 Módulo Loads MeshLoad Const.....	158
Figura 283 Módulo Material Selection.....	159
Figura 284 Módulo Model View.....	160
Figura 285 Módulo Optimize Cross Section.....	160
Figura 286 Módulo Read Cross Section Table from File.....	161
Figura 287 Módulo Read Material Table from File.....	161
Figura 288 Módulo Support.....	162
Figura 289 Módulo Utilization.....	162

1 Introducción

1.1 Objeto del proyecto

En este trabajo se quiere obtener una metodología de simulación MEF para entornos de diseño paramétrico ligada al diseño estructural. Esta metodología se implementa utilizando el programa Rhinoceros con el módulo Grasshopper, más el complemento Karamba 3D.

Se expondrá la metodología con unos casos de estudio básicos y se expondrá también la utilización del módulo Galapagos de Grasshopper que permitirá optimizar ciertos parámetros a raíz de modificaciones de algunas partes de la geometría. Para observar las posibilidades de este programa se aplicará la metodología a un caso de estudio de una cubierta curva donde se optimizarán los apoyos de esta para disminuir el momento al que esta sometida la estructura.

Se compararán los resultados obtenidos con Karamba 3D con los obtenidos con el programa RFEM, para comprobar su fiabilidad y las optimizaciones realizadas en los distintos casos de estudio.

También se desarrollarán ciertos aspectos de interés para el uso de Karamba y se obtendrán las conclusiones pertinentes de este proyecto.

1.2 Rhinoceros (Rhino)

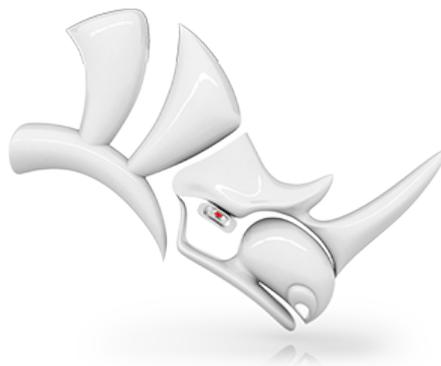


Figura 1 Logo Rhinoceros. Fuente:[4]

Rhinoceros 3D, también conocido como Rhino es un software comercial gráfico de diseño asistido por ordenador (CAD) creado por Robert McNeel & Associates. Se basa en la geometría NURBS (Non-Uniform Rational Basis Splines), este software de modelado de superficies se usa comúnmente para arquitectura, prototipos, ingeniería, joyería y diseño industrial, gráfico, naval y automotriz.

El software fue creado por Robert McNeel & Associates, una empresa con sede en Barcelona dedicada a ventas, formación, marketing y soporte para software en Europa,

Características interesantes de Rhino son que tiene ilimitadas herramientas para modelaje 3D de forma libre, siendo capaz casi de modelar cualquier forma imaginable. Además, tiene una gran precisión para el modelado, diseño y análisis de productos de diferentes índoles.

Por último, resaltar la compatibilidad con la mayoría de los programas de diseño, dibujo, CAM, ingeniería, análisis, renderizado, animación e ilustración, así como la rapidez del software incluso en un ordenador portátil común.

1.3 Grasshopper



Figura 2 Logo Grasshopper. Fuente:[6]

Grasshopper es un editor de programación visual desarrollado por David Rutten en Robert McNeel & Associates. Como complemento para Rhino3D, Grasshopper se integra con el entorno de modelado robusto y versátil utilizado por profesionales creativos en una amplia gama de campos, que incluyen arquitectura, ingeniería, diseño de productos y más. En conjunto, Grasshopper y Rhino ofrecen la oportunidad de definir un control paramétrico preciso sobre los modelos, la capacidad de explorar flujos de trabajo de diseño generativo y una plataforma para desarrollar lógica de programación de alto nivel, todo dentro de una interfaz gráfica intuitiva.

1.4 Karamba 3D



Figura 3 Logo Karamba 3D. Fuente:[2]

Karamba 3D es una herramienta paramétrica de ingeniería estructural que proporciona un análisis preciso de cerchas espaciales, pórticos y superficies espaciales.

El software está completamente integrado en el entorno de diseño paramétrico de Grasshopper para la herramienta de diseño 3D Rhinoceros. Esto facilita la combinación de modelos geométricos parametrizados, cálculos de elementos finitos y algoritmos de optimización como Galapagos.

Este programa es un programa de elementos finitos que permite su integración en el flujo de trabajo de Grasshopper, basado en la programación de scripts utilizando módulos de funciones en un entorno gráfico, lo cual hace más amigable su programación. Lo que facilita su uso desde la fase inicial de diseño, de manera que la

capacidad resistente de los elementos estructurales está presente de forma interactiva en todas las fases del proyecto.

2 Metodología y desarrollo de casos

2.1 Introducción

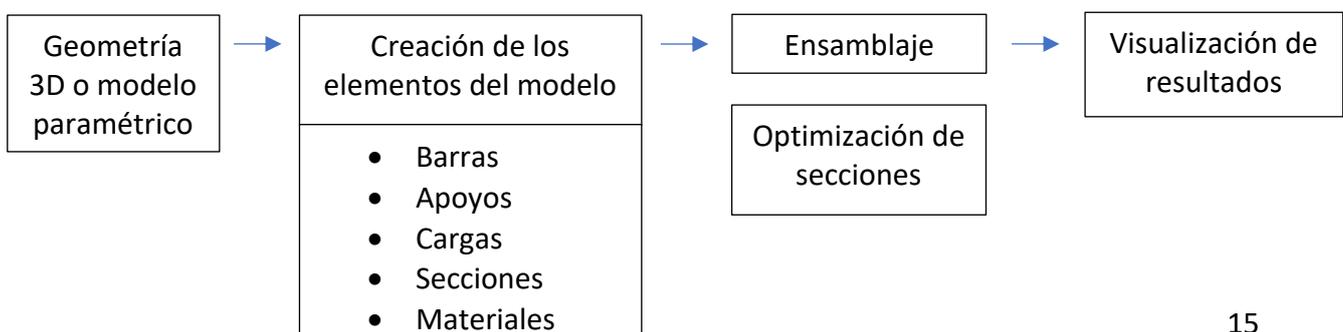
Se desarrolla una metodología a partir de cuatro casos de estudio, tres de ellos simples para desarrollar y comprobar la metodología y uno de aplicación práctica más complejo para que se vean las posibilidades que tiene el programa a la hora del diseño temprano de estructuras.

Los casos que se analizarán son los siguientes:

- Caso 1: en este primer caso se estudiará un pórtico a dos aguas, en el que se introducirán y desarrollarán los principales pasos a desarrollar durante la metodología.
- Caso 2: en este caso se desarrollará un problema típico de resistencia de materiales en el que se tiene una barra simple con dos apoyos y se quiere buscar la posición de estos apoyos para la cual el momento es mínimo. Esto servirá para introducir el módulo Galapagos de Grasshopper, un optimizador con algoritmos genéticos.
- Caso 3: se presenta un pórtico plano coincidente con una fachada en la que hay una determinada posición de huecos. Se trata de buscar la posición óptima de los pilares intermedios, pero atendiendo a las restricciones geométricas predeterminadas.
- Caso 4: muestra una cubierta con forma ondulada sustentada por cuatro pilares con posición libre e indeterminada a priori, se utilizará Galapagos para optimizar la posición de estos pilares y se mostrará que la metodología también es válida para casos generales de aplicación.

La metodología consta de cuatro partes principales:

- **Geometría**: En esta parte se desarrolla la geometría del modelo que se quiere estudiar con los distintos módulos de Grasshopper o bien con una geometría de Rhino.
- **Creación de los elementos del modelo**: se crean los elementos que componen el modelo a partir de la geometría tales como barras y apoyos y se introducen los materiales y secciones.
- **Ensamblaje y optimización de las secciones**: se ensamblan los diferentes componentes del modelo y este se hace pasar por la optimización de las secciones que se configura con las restricciones que se desean.
- **Visualización de resultados**: se hace pasar el modelo por los diferentes módulos de visualización, el modelo se muestra renderizado en la interfaz de Rhino.



Se procede a desarrollar la metodología a partir de los casos expuestos.

2.2 Caso1

2.2.1 Introducción

En este caso se quiere analizar un pórtico a dos aguas, con el que se quiere desarrollar un programa básico para la compresión de la metodología.

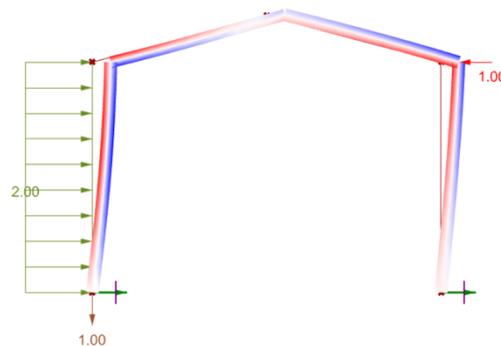


Figura 4 Esquema Caso 1. Pórtico plano a dos aguas.

Lo primero que se debe hacer es tener claros los parámetros geométricos, las condiciones de contorno del modelo a desarrollar y otras restricciones.

Geometría	Altura de los pilares: 4 m Pendiente de la cubierta: 15
Material	Acero S235
Secciones	Perfiles IPE
Cargas	Carga puntual de -1 kN en la cabeza del pilar derecho Carga distribuida de 2kN/m en el pilar izquierdo
Apoyos	Translaciones impedidas en X, Y y Z Rotaciones impedidas en X
Otros	Máxima deformación $\frac{d}{300}$ [m]

Con esto ya se puede desarrollar la metodología expuesta anteriormente con sus respectivas partes. Se procede a explicar la metodología con este caso.

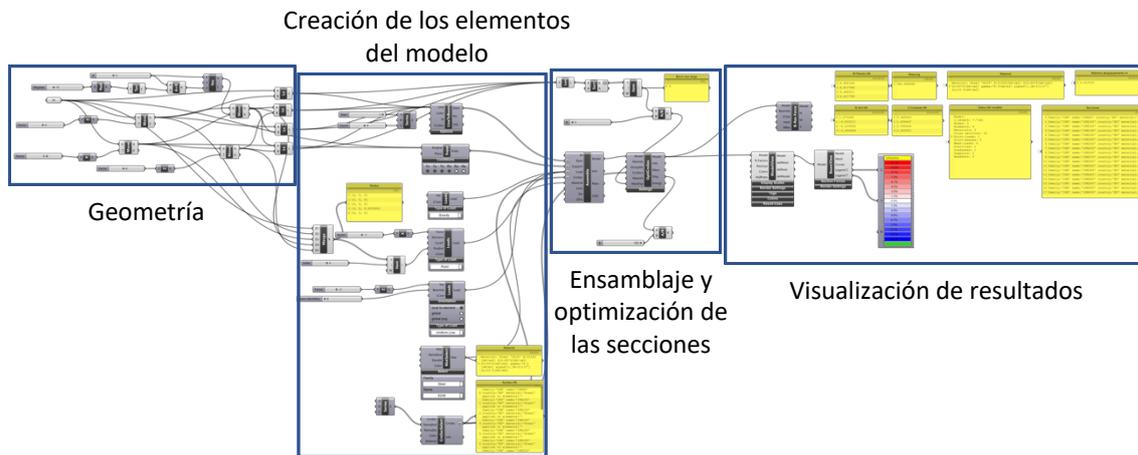


Figura 5 Script del Caso 1 con partes diferenciadas.

2.2.2 Metodología aplicada

I Geometría

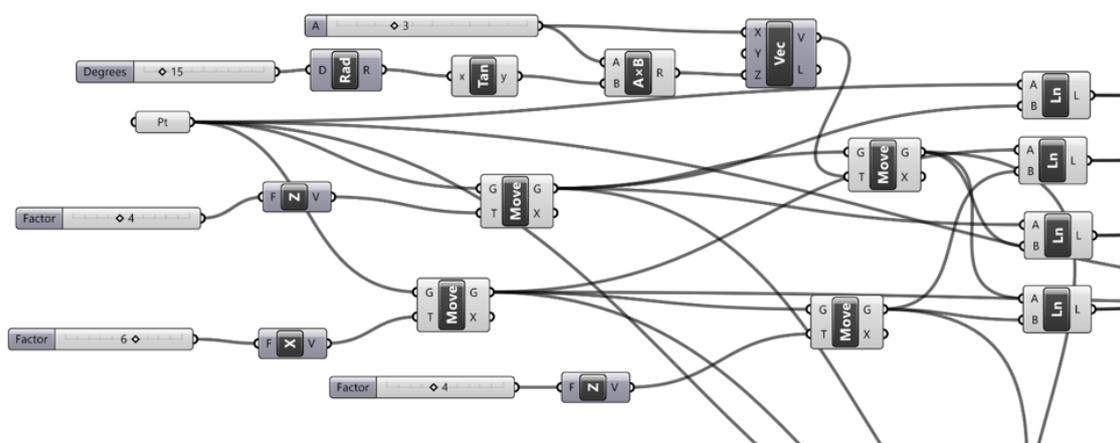


Figura 6 Geometría del Caso 1.

En esta parte de la metodología se desarrolla la geometría. En este caso lo que se hace es crear los puntos (nodos) que forman el modelo y a partir de estos se forman líneas. Se comienza en el punto origen (0,0,0) que se introduce en el módulo Point, a partir de este se crean los puntos (0,0,4) y (6,0,0) a partir del módulo Move en el que por un lado se introduce el punto origen (punto que se quiere desplazar) y por otro un vector de traslación creado a partir de un cursor lineal (Number Slider) con el que se elige el valor de desplazamiento (4 y 6 respectivamente) y con un Unit Z o Unit X depende de la dirección en la que se quiere desplazar se consigue el vector. El punto (6,0,4) se obtiene de la misma forma, pero a partir del punto (6,0,0). El punto (3,0,4+3*tan(15)) es un poco diferente a los anteriores para conseguir el vector de traslación se usara el módulo Vector (Vec) en el que se introduce en x con un Slider el desplazamiento de 3 m y en z se introducirá el valor de la tangente de 15 grados multiplicada por 3, que se consigue con un Slider en el que se introduce la pendiente del pórtico en grados, este valor se

hace pasar por el módulo Radians (Rad) con el se consigue el valor de la pendiente en radianes, este valor se introduce en el módulo Tangent (Tan) y por ultimo se introduce este valor en la entrada B del modulo Multiplication (AxB) y el Slider de valor 3 se conecta a la entrada A. A continuación, con Move y a partir del punto (4,0,0) y el vector de traslación obtenido, se consigue el punto deseado.

Una vez que se obtienen los puntos del modelo se unen a partir de líneas a partir de Line (Ln) donde se introduce el punto inicial y final de la línea que se quiere formar.

Ya se tiene preparada la geometría para su uso en los siguientes apartados de la metodología.

II Creación de los elementos del modelo

En esta parte de la metodología se van a crear las barras los apoyos y las cargas y se van a introducir los materiales y secciones.

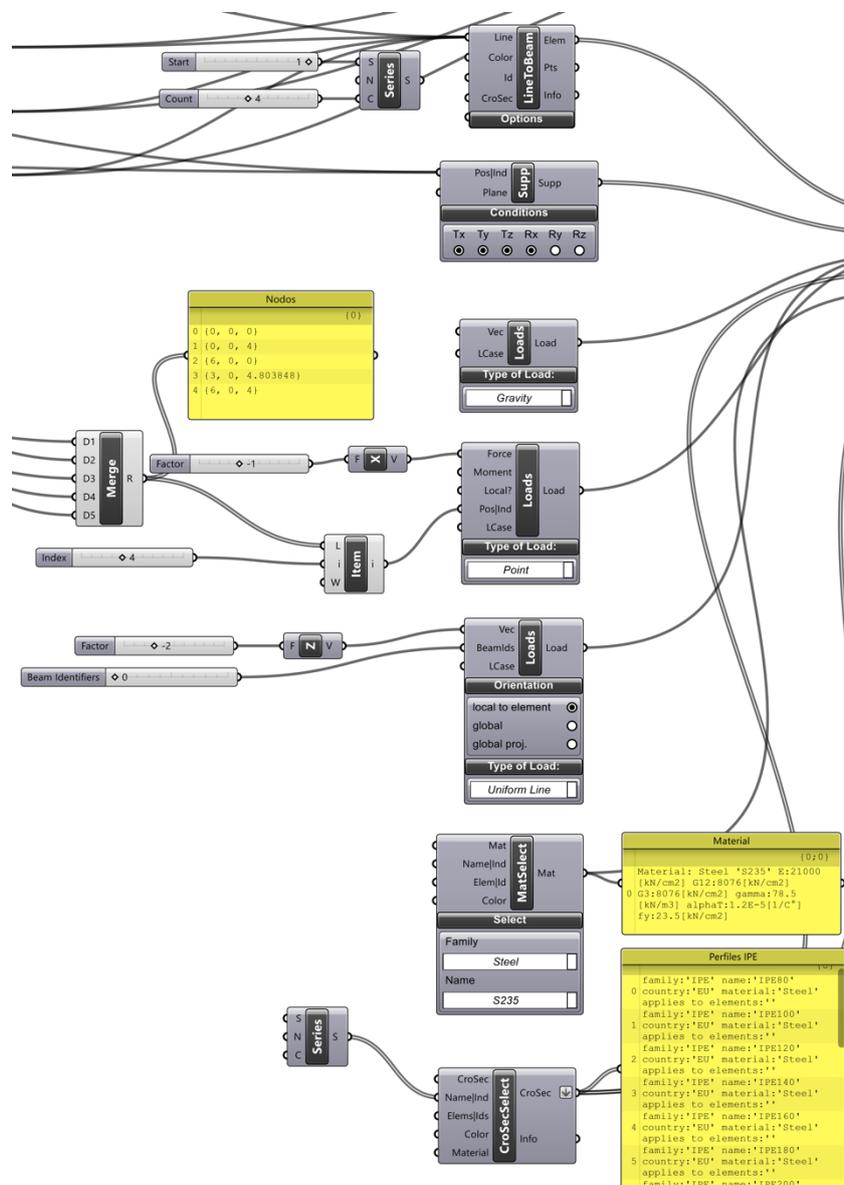


Figura 7 Creación de elementos del modelo del Caso 1.

Para crear las barras se introducen las líneas creadas en la geometría en el módulo Line to Beam (LineToBeam) también se introduce identificadores (Id) que será de gran utilidad a la hora de definir cargas lineales uniformes. En este caso se usa una serie de números creada con Series del 1 al 4 que serán los identificadores de las barras.

Para crear los apoyos se usa el módulo Supports (Supp) en el que se introducen los puntos de la geometría donde se quieran crear los apoyos, en este caso (0,0,0) y (6,0,0), y se seleccionan los traslaciones y rotaciones que se quieran restringir para este caso traslación en X Y y Z y rotación en X.

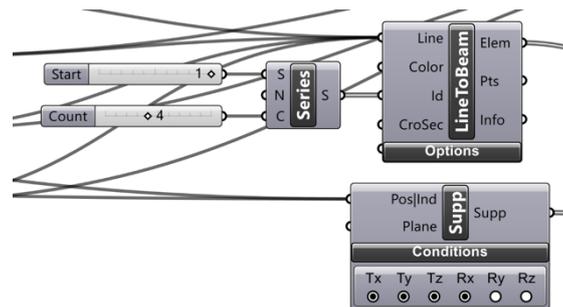


Figura 8 Creación de barras y apoyos del Caso 1.

En el caso de las cargas se necesitan tres tipos de cargas: gravitatoria, puntual y lineal uniforme, para todas ellas se usa el módulo Loads.

Para la carga gravitatoria basta con seleccionar Gravity en el desplegable Type of Load y se crea una carga gravitatoria por defecto en dirección (0,0,-1).

Para la carga puntual se selecciona Point en el desplegable y se introduce un vector de fuerza y la posición en la que se aplica la fuerza. El vector de fuerza se hace con un Slider y un Unit X en este caso es (-1,0,0), y la posición se consigue a partir del módulo List Item (Item), en el que se introduce una lista con todos los nodos del caso, que se consigue con el módulo Merge, y con un Slider se selecciona el índice del nodo de la lista que se quiere. Para seleccionar la posición también se podría introducir las coordenadas del nodo en el que se quiere aplicar la carga directamente.

Para la carga uniforme lineal se selecciona Uniform Line en el desplegable, y se introduce el vector de la fuerza y la barra donde se quiere su aplicación. El vector de la fuerza se consigue con un Slider y Unit Z (0,0-2) y la barra se selecciona con un Slider cuyo valor se corresponde con la notación que se les ha adjudicado en el módulo LineToBeam. Karamba solo permite aplicar cargas de este tipo sobre la totalidad de las barras y por defecto aplica la carga a todas las barras del modelo.

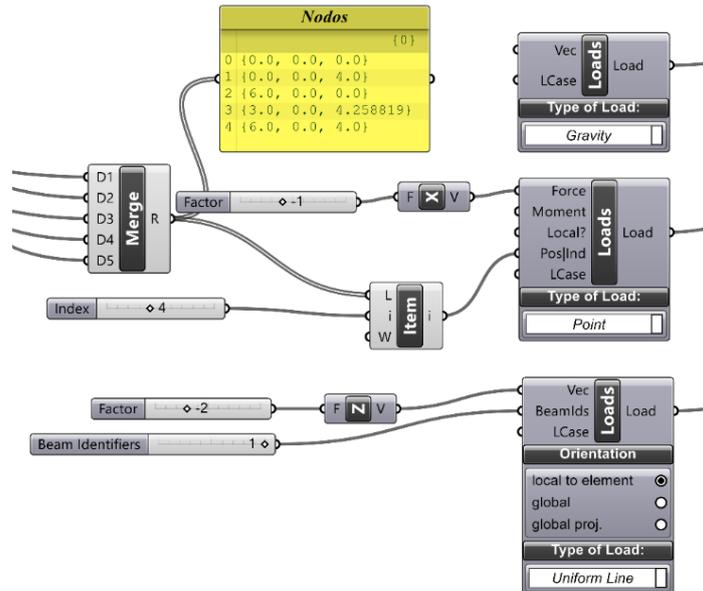


Figura 9 Creación de cargas del Caso 1.

Para seleccionar el material se usa el módulo Material Selection (MatSelect), en este caso se usará la biblioteca de materiales de Karamba, la selección del material se hace a partir de unos desplegables primero se selecciona la familia, Steel (acero), y posteriormente el nombre, S235.

En el caso de las secciones se usa también la biblioteca de Karamba, para la selección de los perfiles que nos interesan se usa el módulo Cross Section Selector (CroSecSelect). Para seleccionar los perfiles IPE se utiliza el módulo Series en que se crea una serie de números que se corresponde con los índices de los perfiles de la serie IPE, en el caso de la biblioteca de Karamba se corresponde con los primeros 18 perfiles, se introduce el numero 18 como entero en la entrada Count (C) y la serie conseguida que es la serie del 0 al 17. Esta se introduce en la entrada Name or list index of cross section (Name/Ind) del módulo CroSecSelect, consiguiendo las secciones que interesan para su posterior uso.

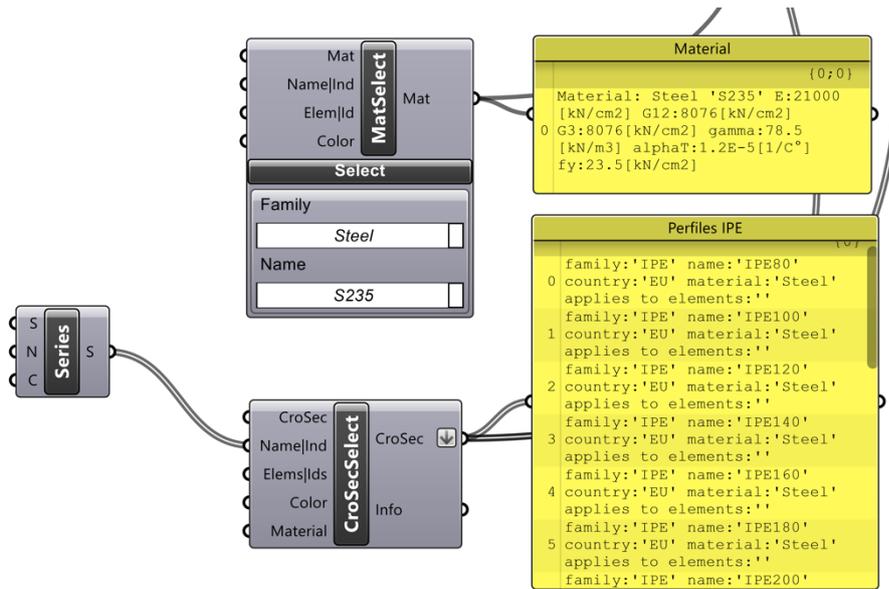


Figura 10 Selección de material y secciones del Caso 1

Se tienen ya creadas barras, apoyos y cargas y ya se tienen seleccionados material y secciones con lo que ya se puede pasar al siguiente punto de la metodología.

III Ensamblaje y optimización de las secciones

En esta parte de la metodología se ensambla el modelo a partir de los elementos creados en el apartado anterior y se optimizan las secciones.

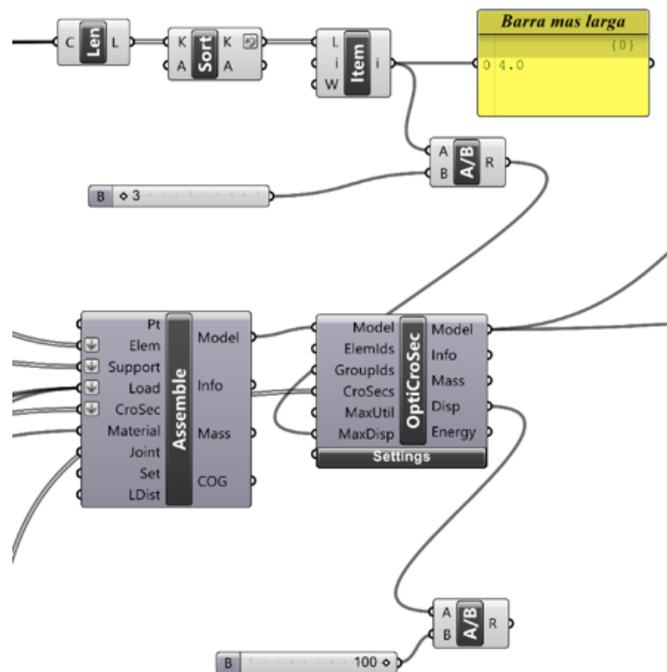


Figura 11 Ensamblaje y optimización de secciones del Caso1.

Para ensamblar el modelo se utiliza el módulo Assamble Model (Assamble) en el se introducen los elementos (barras en este caso), apoyos, cargas, secciones y material. Es importante que en la entrada Load se disponga el Flatten para conseguir que las cargas actúen a la vez si no se crearían un caso de carga para cada una de las cargas.

Una vez el modelo se ha creado se procede a optimizar las secciones a partir del módulo Optimize Cross Section (OptiCroSec) en el se introduce el modelo y la restricción de máximo desplazamiento en cm. La condición de máximo desplazamiento, que es $\frac{d}{300}$ [m], para ello hay que saber que barra es la mas larga para ello se crea a partir de las líneas que crean el modelo, se hacen pasar por el módulo Length (Len) que mide la longitud de las líneas, estas longitudes se ordenan con el módulo Sort List (Sort) que ordenan la lista de menor a mayor como se quiere que ordene de mayor a menor en la salida se aplica la función Reverse con la que se consigue el objetivo, a continuación se debe seleccionar el primer valor de la lista para ello se usa el módulo List Item (Item) que por defecto selecciona el primer valor, este valor se divide entre 3 con el módulo Division (A/B) y se consigue la restricción en cm.

IV Visualización de resultados

En esta parte se consigue ver el modelo y barras renderizadas y se permite visualizar diferentes resultados con valores numéricos y con leyendas de colores.

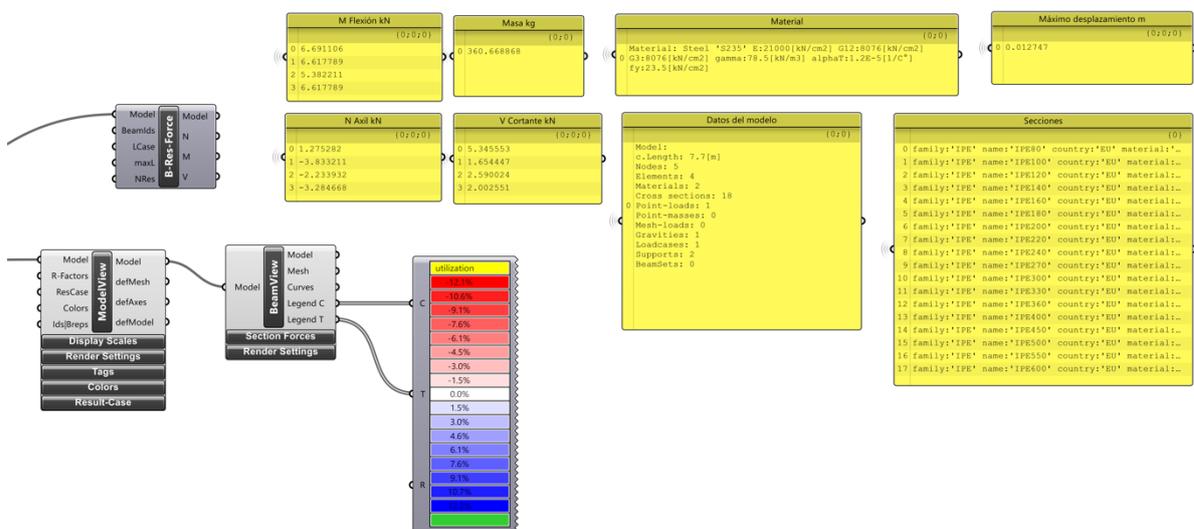


Figura 12 Visualización de resultados del Caso1.

Para visualizar el modelo se hace pasar el modelo por el módulo Model View (ModelView) con el que se ven todos los elementos del modelo como cargas, nodos apoyos, deformación del modelo y barras sin renderizar.

A continuación, se hace pasar el modelo por el módulo Beam View (BeamView) con el que se consigue la renderización de las barras con el que se incluye las fuerzas que soportan las secciones.

También con el uso del módulo Beam Resultant Forces (B-Res-Force) introduciendo en el modelo se consigue los valores máximos de axil, cortante y momento que actúan sobre cada una de las barras. Con un panel se pueden observar estos valores en una lista como se ve en la figura.

La visualización de los resultados se desarrollará en un apartado propio donde se analizarán todas las funcionalidades que tienen los módulos ModelView y BeamView.

2.3 Caso 2

2.3.1 Introducción.

En este caso se quiere analizar una barra simple con dos apoyos sometida a una carga lineal uniforme con la que se afianzara la metodología y se introducirá el uso de Galapagos con el cual se hallará la posición óptima de los apoyos para que el momento al que está sometida la barra sea mínimo.

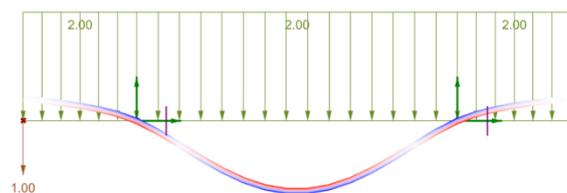


Figura 13 Esquema Caso 2. Viga biapoyada con extremos en voladizo.

Lo primero que se debe hacer es tener claros los parámetros geométricos, las condiciones de contorno del modelo a desarrollar y otras restricciones.

Geometría	Longitud de la barra: 7m
Material	Acero S235
Secciones	Perfiles IPE
Cargas	Carga distribuida de -2kN/m en la viga
Apoyos	Translaciones impedidas en X, Y y Z Rotaciones impedidas en X
Otros	Máxima deformación $\frac{d}{300}$ [m]

Con esto ya se puede desarrollar la metodología nombrada anteriormente con sus respectivas partes. Se procede a explicar la metodología con este caso.

Creación de los elementos del modelo

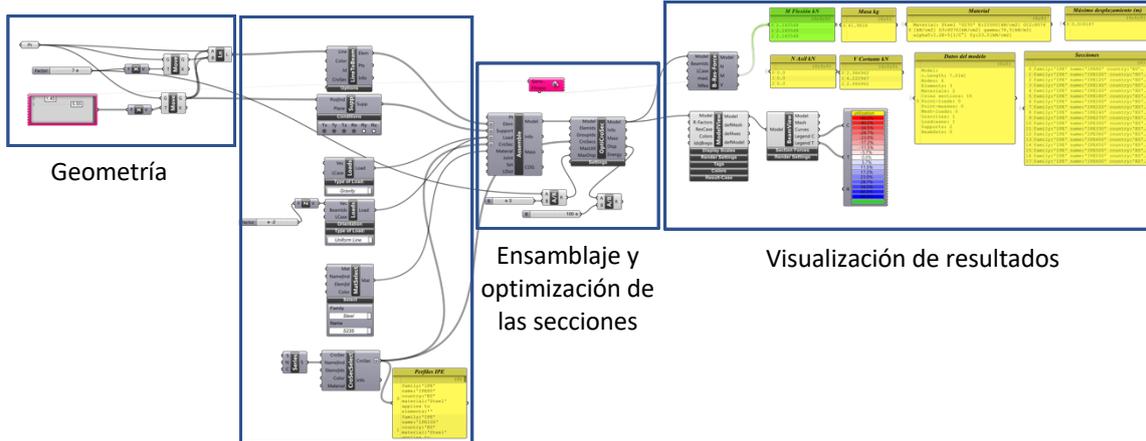


Figura 14 Script del Caso 2 con partes diferenciadas.

2.3.2 Metodología aplicada.

I Geometría.

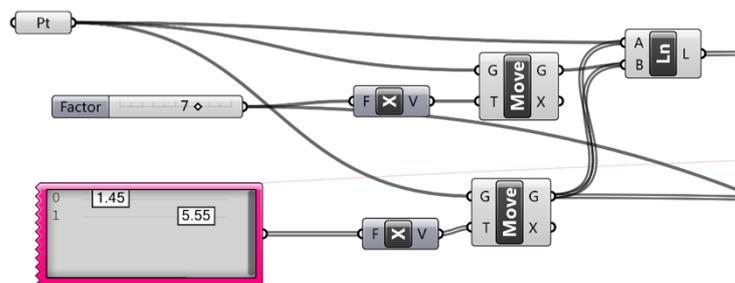


Figura 15 Geometría del Caso 2.

En esta parte de la metodología se desarrolla la geometría del modelo. Para este caso es muy sencilla. Se parte del punto origen (0,0,0), que se introduce en el módulo Point, a partir de este punto que hace de geometría base se generan el resto de los puntos del modelo a través del módulo Move, los vectores de traslación se consiguen uno a través de un Slider de valor 7 y un Unit X con el que se consigue el punto final de la viga (7,0,0) y el otro se consigue con el módulo Gene Pool que contiene dos Slider y un Unit X con el que se consiguen los puntos referentes a los apoyos. Para finalizar se introducen todos los puntos en el módulo Line en orden para que se formen bien las líneas.

Ya se tiene la geometría lista para su utilización en las siguientes partes de la metodología.

II Creación de los elementos del modelo.

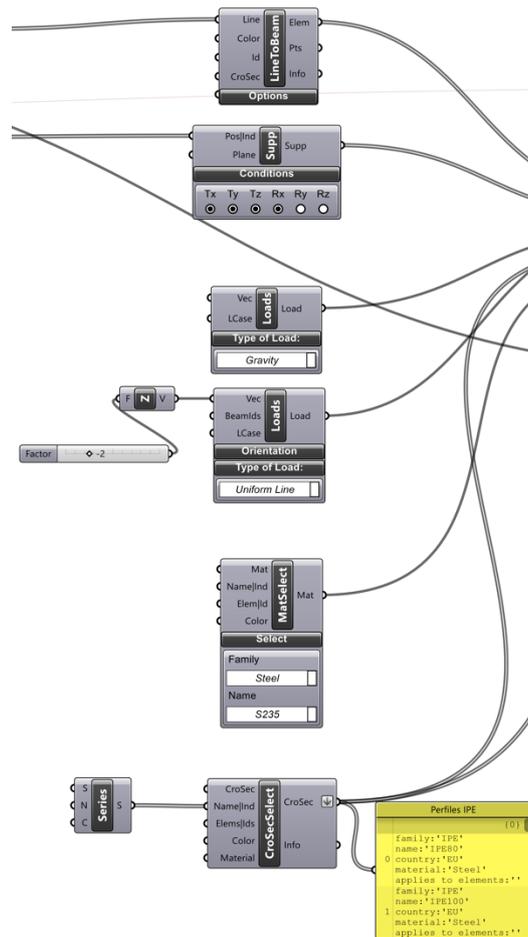


Figura 16 Creación de los elementos del modelo.

En esta parte de la metodología se van a crear las barras los apoyos y las cargas y se van a introducir los materiales y secciones.

Para empezar, se crean las barras, se introducen las líneas en el módulo Line to Beam y con este se obtienen, a continuación, se crean los apoyos con el módulo Support para ello se introduce en los puntos obtenidos con el Move y Gene Pool correspondientes a los apoyos y se seleccionan las traslaciones o rotaciones que se quieren restringir en este caso traslación en X Y y Z y rotación en X.

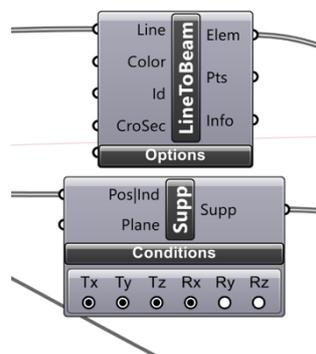


Figura 17 Creación de barras y apoyos del Caso2.

Para las cargas en este caso solo se necesitan una carga de gravedad que se obtiene simplemente seleccionando Gravity en el desplegable del módulo Load y una carga lineal uniforme de -2 Kn/m que se obtiene seleccionando en el desplegable Uniform line e introduciendo el vector de carga que se consigue con un Slider de valor -2 y un Unit Z para conseguir el vector en la dirección deseada (0,0,-2).

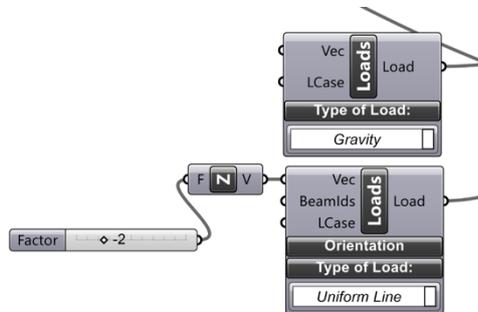


Figura 18 Creación de cargas del Caso2.

Para la selección del material se usa el módulo Material Selector, para seleccionar el material de este caso que es el acero S235 basta con seleccionar en la pestaña de Family Steel y en la pestaña de Name S235.

Para la selección de las secciones se quieren los perfiles de la serie IPE que se corresponden con los valores del 0 al 17 de la biblioteca de Karamba, para seleccionar estos valores se crea una serie de números con el módulo Series y se introduce en el módulo Cross Section Selector en la entrada Name/Ids de esta manera se seleccionan los 18 perfiles de la serie IPE.

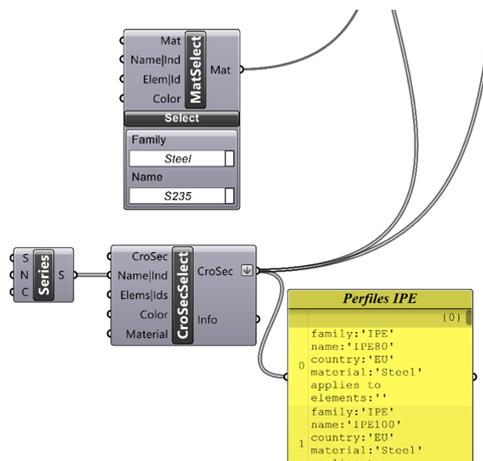


Figura 19 Selección de material y secciones del Caso 2.

Ya se tienen las barras, los apoyos, cargas, material y sección preparados para su utilización en la siguiente parte de la metodología.

III Ensamblaje y optimización de secciones.

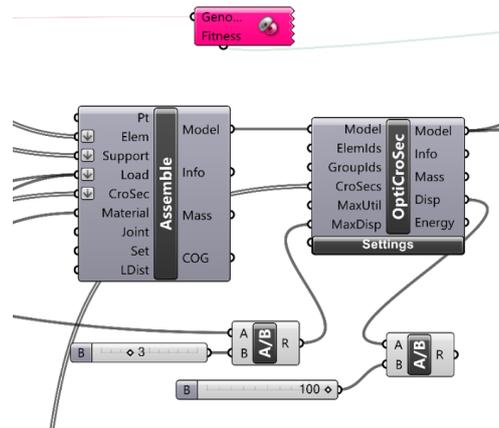


Figura 20 Ensamblaje y optimización de secciones del Caso 2.

En este apartado de la metodología se ensambla el modelo, se optimizan las secciones y se optimiza la posición de los apoyos.

Para ensamblar el modelo se utiliza en el módulo Assemble model en el que se introducen los elementos (barras), apoyos, cargas, secciones y material.

Para optimizar las secciones se utiliza el módulo Optimize Cross Section en el que introduce el modelo conseguido con el módulo Assemble model y la lista de secciones obtenida en con el Cross Section Selector, como restricción adicional también se introduce la restricción de máximo desplazamiento, que es $\frac{d}{300}$ [m], en este caso se opta por seleccionar como d la longitud total de la barra actuando por el lado de la seguridad, recordar que esta restricción se debe introducir en cm.

Hasta ahora las distintas partes de la metodología son muy similares a las del caso 1 a excepción de la geometría ahora se procede a introducir el módulo de Galapagos.

Se utiliza Galapagos para la optimización de la posición de los apoyos para que el momento sea mínimo en el modelo. Para ello se debe introducir en el parámetro Genome, que es lo que se quiere que optimice, el Gene Pool con los Sliders de los apoyos y en el parámetro Fitness se introduce lo que se quiere optimizar, en este caso el momento que se obtiene con el módulo Beam Resultant Forces.

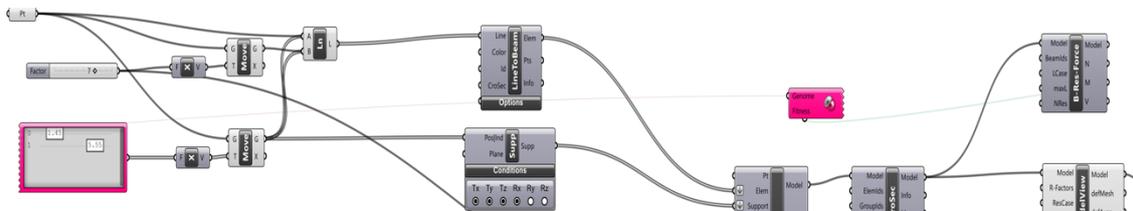


Figura 21 Conexiones de Galapagos.

Para proceder a la optimización se hace doble click con el botón izquierdo sobre Galapagos y aparece el menú del módulo. En la pestaña de Options seleccionamos

Minimize en el parámetro Fitness, a continuación, pasamos a la pantalla Solvers y hacemos click sobre Start Solver.

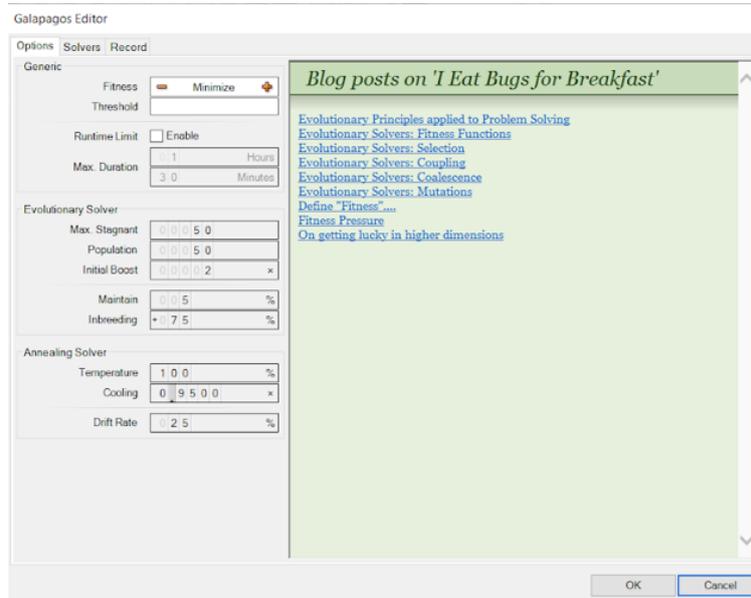


Figura 22 Options del menú de Galapagos del caso 2.

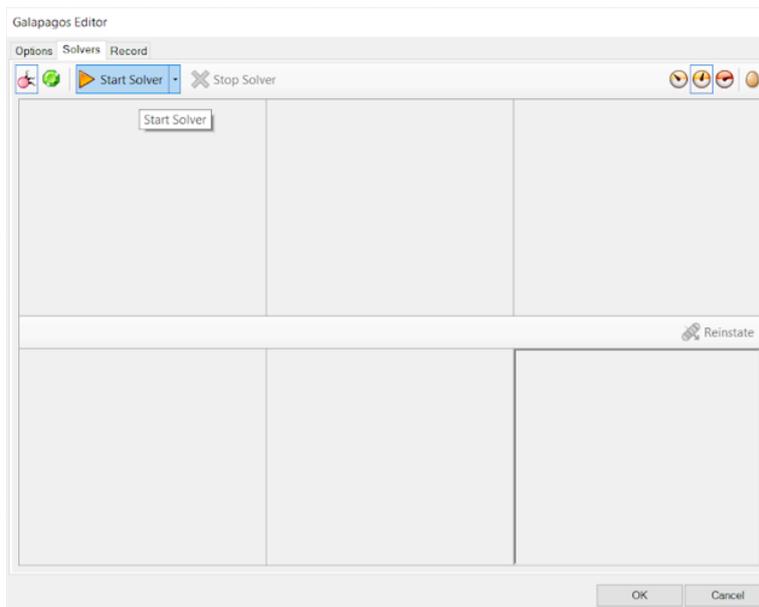


Figura 23 Inicio de la optimización mediante Galapagos del caso 2.

Pasado un tiempo, finaliza la optimización y los Sliders del Gene Pool se quedan en la posición que se buscaba para minimizar el modulo del momento flector, que corresponde con las posiciones de los apoyos a 1,45 y 5,55 metros del extremo inicial de la barra.

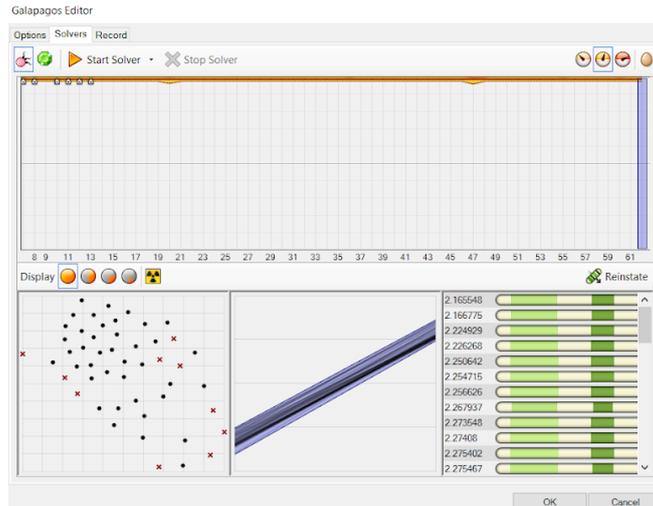


Figura 24 Resultado de la optimización del caso 2.

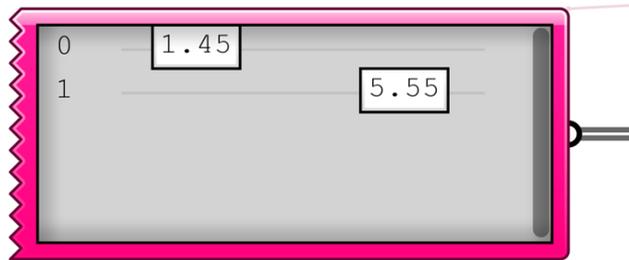


Figura 25 Posición de los apoyos tras la optimización con Galapagos.

IV Visualización de resultados.

En esta parte se consigue ver el modelo y barras renderizadas y se permite visualizar diferentes resultados con valores numéricos y con leyendas de colores.

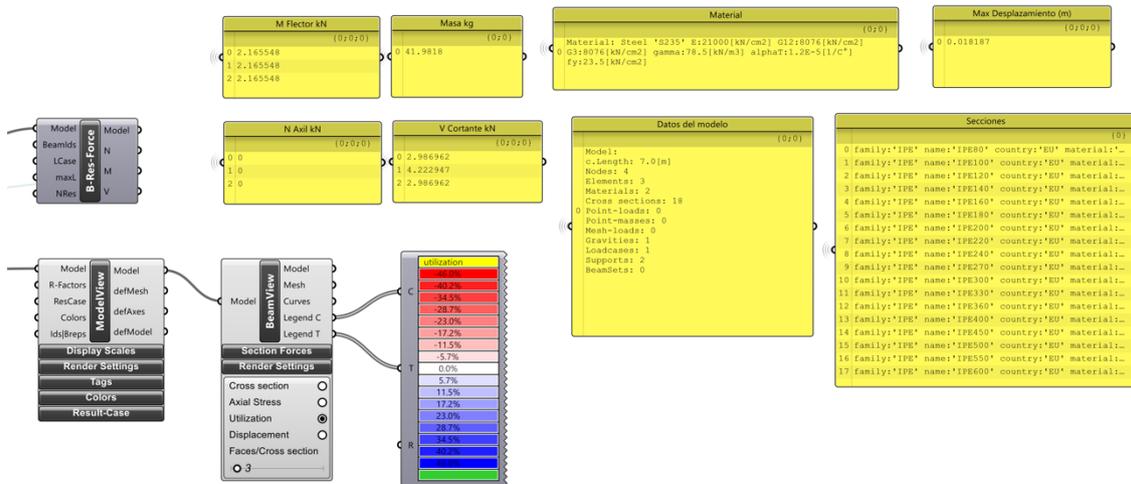


Figura 26 Visualización de resultados del Caso 2.

Para visualizar el modelo se hace pasar el modelo por el módulo Model View (ModelView) con el que se ven todos los elementos del modelo como cargas, nodos apoyos, deformación del modelo y barras sin renderizar.

Foto sin Beam View conectado

A continuación, se hace pasar el modelo por el módulo Beam View (BeamView) con el que se consigue la renderización de las barras con el que se incluye las fuerzas que soportan las secciones.

También con el uso del módulo Beam Resultant Forces (B-Res-Force) introduciendo en el el modelo se consigue los valores máximos de axil, cortante y momento que actúan sobre cada una de las barras. Con un panel se pueden observar estos valores en una lista como se ve en la figura 18.

La visualización de los resultados se desarrollará en un apartado propio donde se analizarán todas las funcionalidades que tienen los módulos ModelView y BeamView.

2.4 Caso 3

2.4.1 Introducción.

En este caso se quiere analizar una serie de pórticos sucesivos de una fachada donde se quiere dejar un hueco para una puerta de garaje, está sometido a diferentes cargas uniformes y puntuales y el objetivo es optimizar la posición de los pilares para que la masa sea mínima a través de Galapagos.

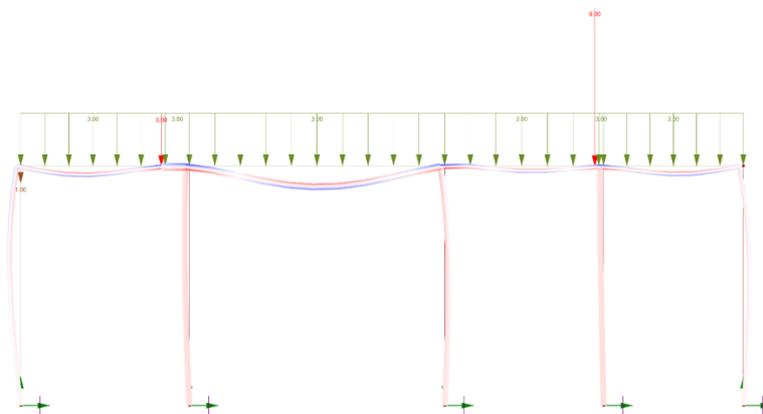


Figura 27 Esquema Caso 3 Pórtico rígido con optimización en la posición de los pilares intermedios.

Lo primero que se debe hacer es tener claros los parámetros geométricos, las condiciones de contorno del modelo a desarrollar y otras restricciones.

Geometría	Ancho de la estructura: 15m Altura de los pilares: 5m
Material	Acero S235
Secciones	Perfiles IPE

Cargas	Carga distribuida de -3kN/m en todas las vigas Carga distribuida de -3 kN/m entre $x=10,5$ y $x=13,5$ Carga puntual de -3 kN en $x=3$
Apoyos	Traslaciones impedidas en X, Y y Z Rotaciones impedidas en X
Otros	Máxima deformación $\frac{d}{300}$ [m] No puede haber pilares en el dominio de $x= 4$ y $x=7$

Creación de los elementos del modelo

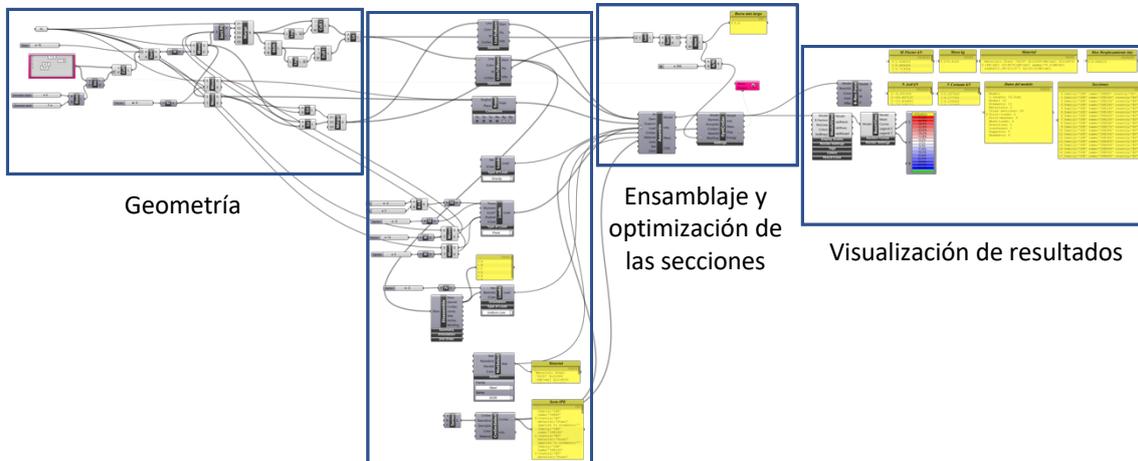


Figura 28 Script del Caso 3 con partes diferenciadas.

2.4.2 Metodología aplicada.

I Geometría.

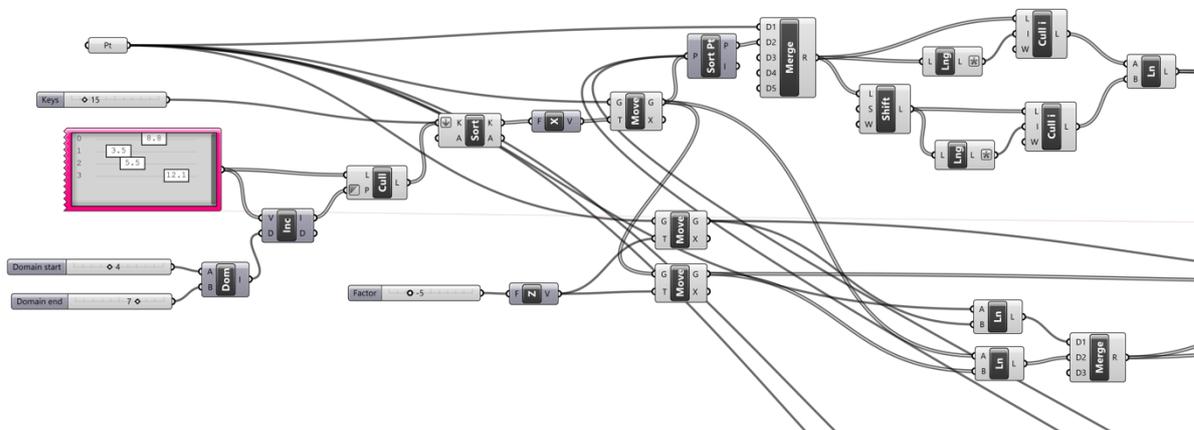


Figura 29 Geometría del Caso 3.

En esta parte se genera la geometría del modelo. Se parte del punto origen (0,0,0) que se introduce en el módulo Point, a parte de este punto se crearan todos los demás puntos del modelo. Para comenzar se crean los puntos sobre la horizontal donde estarán los pilares para ello se usa el módulo Move, como geometría base se tiene el punto origen. Para obtener los vectores de traslación se tiene la posición final de estructura con un Slider de valor 15 y un Gene Pool que contiene 4 Sliders que se corresponden con los pilares intermedios que pueden aparecer en la estructura con los que se hará la optimización con Galapagos. Para empezar, se debe saber si algún valor del Gene Pool esta dentro del dominio de la puerta de garaje para eliminarlo, para ello se crea un dominio con el módulo Construct Domain y dos Sliders que representan el inicio y fin del dominio con valores 4 y 7 respectivamente, a continuación, se usa el módulo Includes en el que se introducen los valores del Gene Pool y el dominio creado para conseguir un patrón True/False de los valores que hay dentro del dominio, para eliminar los valores que están dentro del dominio se usa el módulo Cull Pattern en el que se introduce la lista de valores del Gene Pool y el patrón obtenido, como se quieren eliminar los valores que están dentro se debe marcar en la entrada Pattern la opción Invert. Una vez hecha esta eliminación se ordenan los valores de menor a mayor con el módulo Sort List, aquí también se introduce el punto final de la estructura. Esta lista ordenada se hace pasar por el módulo Unit X y se consiguen los vectores de traslación para el Move. Para crear los puntos base de los pilares se usa el módulo Move con geometría base los puntos conseguidos anteriormente y el punto origen y el vector de traslación creado con un Slider de valor -5 y un Unit Z.

A partir de estos puntos base y los puntos anteriormente creados se crean las líneas de los pilares con el módulo Line. Para crear las líneas de las vigas se tienen que añadir también los puntos donde se añaden cargas puntuales ya que Karamba no permite definir cargas en puntos intermedios de barras para ello se usa el módulo Sort Points en el que se introduce los puntos generados sobre la horizontal donde se encuentran los pilares y los puntos donde se aplican las cargas puntuales. Seguidamente se juntan estos puntos con el punto origen con el módulo Merge.

Ahora lo que se quiere es crear las líneas de las vigas, para ello hay que tener extremo cuidado de introducir los puntos en el orden correcto. Para la creación de estas líneas se utiliza el módulo Line en la entrada A se deben introducir la colección de puntos que se ha obtenido con el Merge sin el ultimo punto y en la entrada B se debe introducir esta colección sin el primer punto. Para la lista de puntos de la entrada A se usa el modulo List Length que muestra la longitud de la lista que se modifica con la expresión $x-1$ y el modulo Cull ítem con el que se introduce la lista de puntos y el resultado del List Length y se consigue que seleccione todos los puntos menos el ultimo (15,0,0) y este lo elimine de la lista. Para la lista de puntos de la entrada B se hace lo mismo que para la lista de puntos de la entrada A, pero añadiendo antes del List Length el módulo Shift List con el que se consigue introduciendo la lista de puntos general que el primer valor de esta lista cambie de lugar al final de esta, consiguiendo que el punto eliminado en este caso sea el (0,0,0).

Ya se tienen los puntos y líneas de la geometría para que se puedan usar en las siguientes partes de la metodología.

II Creación de los elementos del modelo.

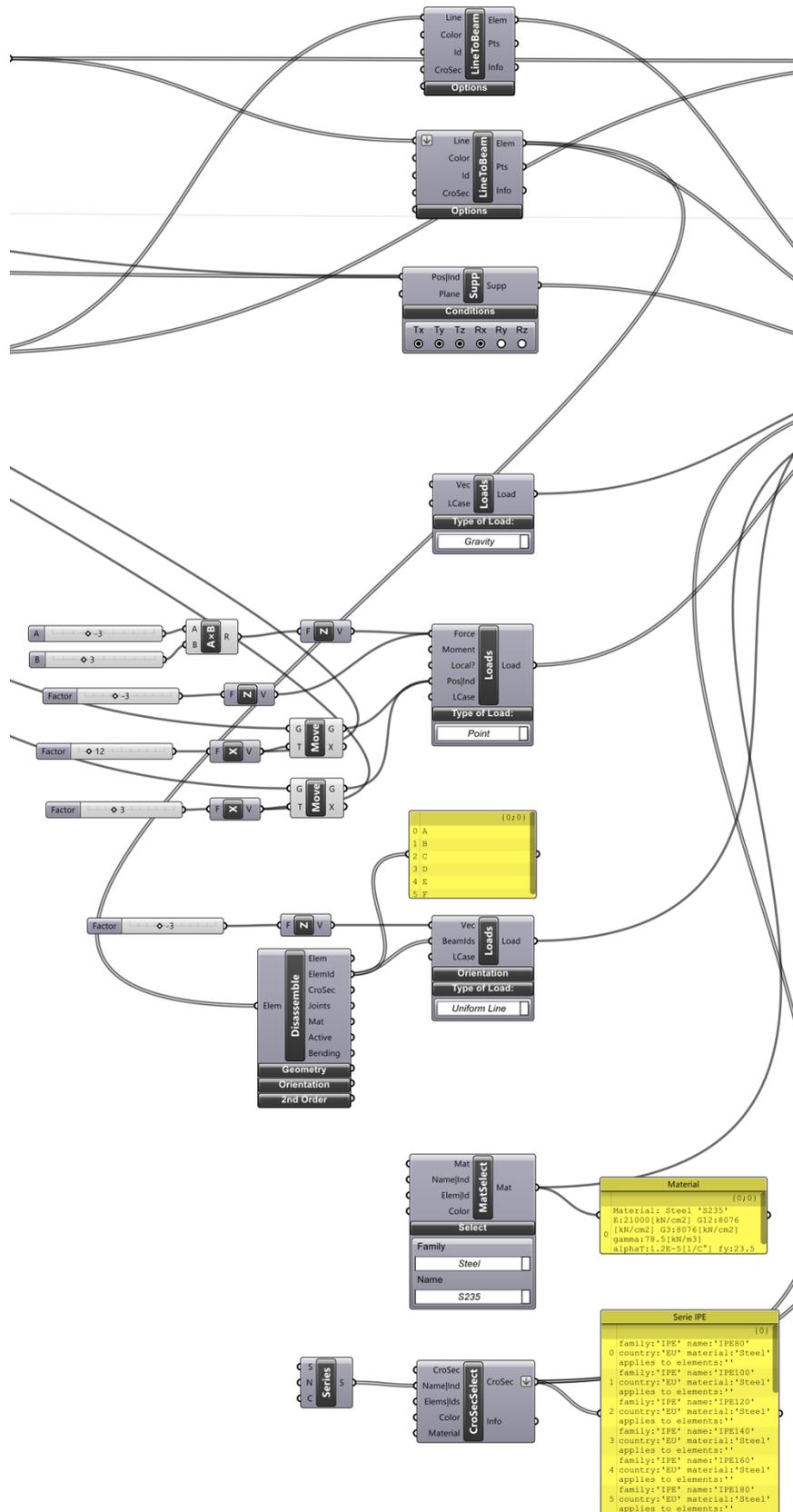


Figura 30 Creación de los elementos del modelo del Caso 3.

En esta parte de la metodología se van a crear las barras los apoyos y las cargas y se van a introducir los materiales y secciones.

Para la creación de las barras se utiliza el módulo Line to Beam, se usa uno para los pilares donde se introducen las líneas correspondientes a estos y otro para las vigas donde se introducen las líneas correspondientes a estas. También en el caso de las vigas se introducen identificadores en la entrada Identifiers para su posterior uso en la definición de la carga lineal uniforme.

Para los apoyos se usa el módulo Support donde se introducen los puntos correspondientes a los puntos base de los pilares y se seleccionan las restricciones de traslación y rotación. En este caso traslación en X, Y y Z y rotación en X.

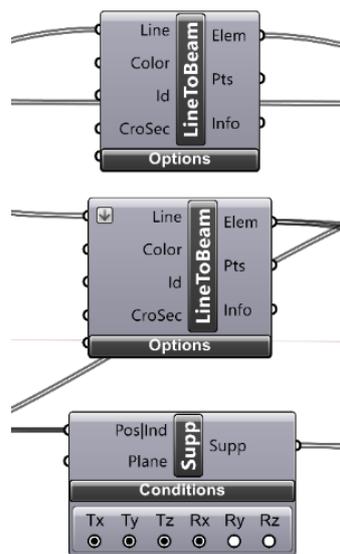


Figura 31 Creación de barras y apoyos del Caso 3.

Para las cargas en este caso se necesita una carga de gravedad que se obtiene simplemente seleccionando Gravity en el desplegable del módulo Loads.

También se necesitan dos cargas puntuales una correspondiente a la carga puntual en $x=3$ y otra que se aplica en $x=12$ sustituyendo la carga uniforme lineal aplicada entre $x=11,5$ y $x=13,5$ ya que en Karamba solo se pueden aplicar cargas uniformes lineales a toda la barra, para su creación se selecciona Point en el desplegable del módulo Loads e introduciendo el vector fuerza y la posición de aplicación de cada carga puntual. El vector fuerza se crea con un Slider de valor -3 y un Unit Z para la primera carga y para la segunda carga con dos Sliders uno correspondiente a la magnitud de la fuerza uniforme lineal, en este caso -3, y otro para la longitud de la carga uniforme lineal, en este caso 3, que se multiplican con el módulo Multiplication y el resultado se introduce a un Unit Z. Los puntos de aplicación de las cargas se crean con el módulo Move que a través del punto origen que hace de geometría base y un vector de traslación creado con un Slider de valor 3 y 12 respectivamente para cada carga y un Unit X.

Para finalizar se crea la carga uniforme lineal aplicada en todas las vigas para ello se selecciona Uniform Line en el desplegable del módulo Loads. Se introduce el vector de

la fuerza distribuida creado a partir de un Slider de valor -3 y un Unit Z y para seleccionar las barras a las que se aplica dicha fuerza se hace uso del módulo Disassemble conectado a las vigas creadas con el que pueden ver los identificadores de estas barras y conectarlos a la entrada BeamIds del módulo Loads.

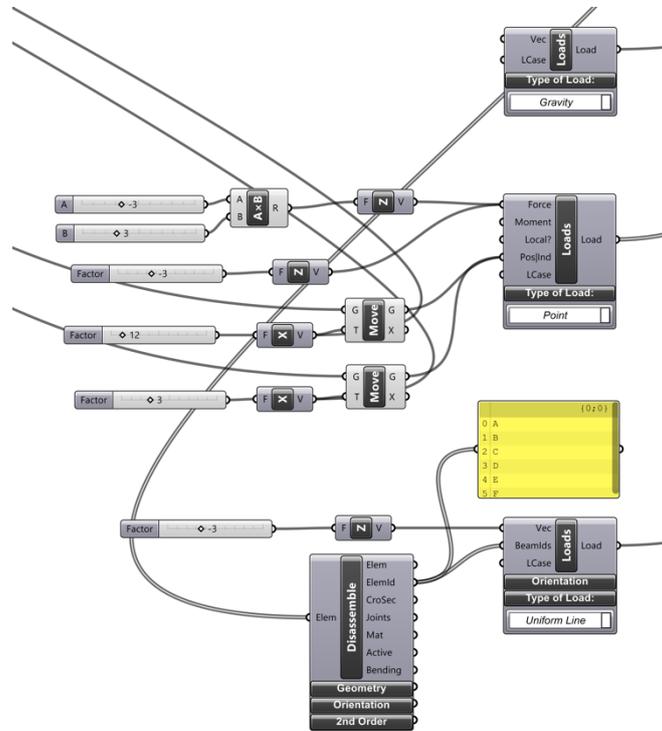


Figura 32 Creación de cargas del caso 3.

Para la selección del material se usa el módulo Material Selector, para seleccionar el material de este caso que es el acero S235 basta con seleccionar en la pestaña de Family Steel y en la pestaña de Name S235.

Para la selección de las secciones se quieren los perfiles de la serie IPE que se corresponden con los valores del 0 al 17 de la biblioteca de Karamba, para seleccionar estos valores se crea una serie de números con el módulo Series y se introduce en el módulo Cross Section Selector en la entrada Name/Ids de esta manera se seleccionan los 18 perfiles de la serie IPE.

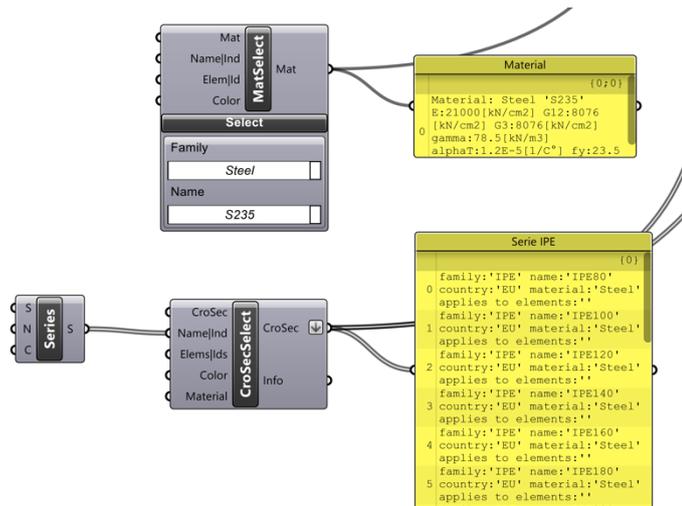


Figura 33 Selección de material y secciones.

Ya se tienen las barras, los apoyos, cargas, material y sección preparados para su utilización en la siguiente parte de la metodología.

III Ensamblaje y optimización de secciones.

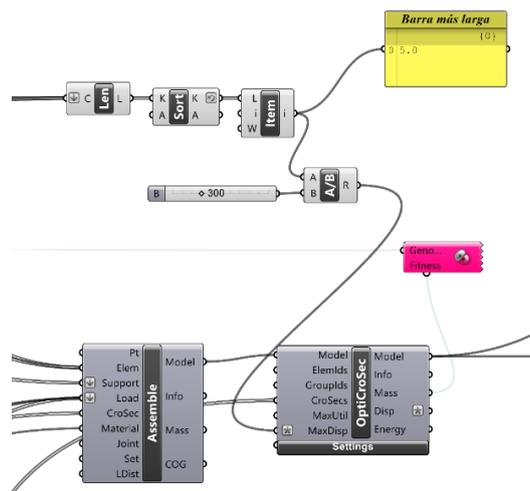


Figura 34 Ensamblaje y optimización de secciones del Caso 3.

En este apartado de la metodología se ensambla el modelo, se optimizan las secciones y se optimiza la posición de los pilares.

Para ensamblar el modelo se utiliza en el módulo Assamble model en el que se introducen los elementos (barras), apoyos, cargas, secciones y material.

Para optimizar las secciones se utiliza el módulo Optimize Cross Section en el que se introduce el modelo conseguido con el módulo Assamble model y la lista de secciones obtenida en con el Cross Section Selector, como restricción adicional también se introduce la restricción de máximo desplazamiento, que es $\frac{d}{300}$ [m], en este caso se obtiene la barra mas la barra más larga de igual forma que en el Caso 1 introduciendo vigas y pilares, además el cambio de unidades de m a cm y de cm a m se hace directamente a través de expresiones en la entrada MaxDisp y Disp.

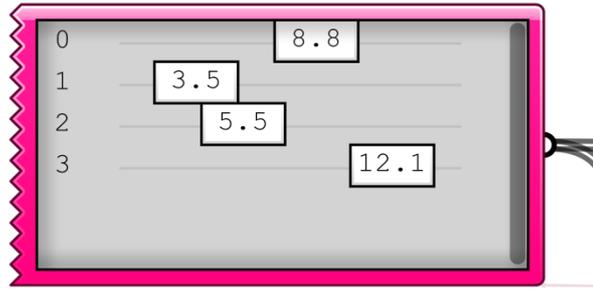
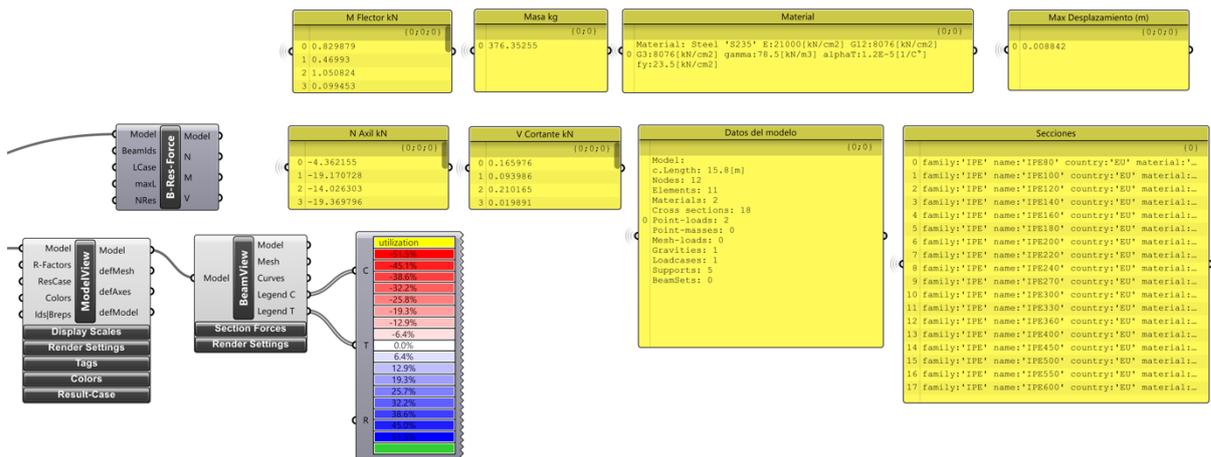


Figura 37 Resultados en la optimización de los pilares.

IV Visualización de resultados.

En esta parte se consigue ver el modelo y barras renderizadas y se permite visualizar diferentes resultados con valores numéricos y con leyendas de colores.



La visualización de los resultados se desarrollará en un apartado propio donde se analizarán todas las funcionalidades que tienen los módulos ModelView y BeamView.

2.5 Caso 4

2.5.1 Introducción.

En este caso se parte de la generación de la envolvente geométrica definida para una cubierta. A partir de esa definición geométrica primaria, se parametriza la generación de la celosía tridimensional de barras rectas que mejor se adapta a la forma propuesta. Y se analizan las posibilidades de Karamba 3D para calcular la celosía sustentada por cuatro pilares en los que se busca la posición óptima, utilizando Galapagos, para que los esfuerzos en las barras sean mínimos.

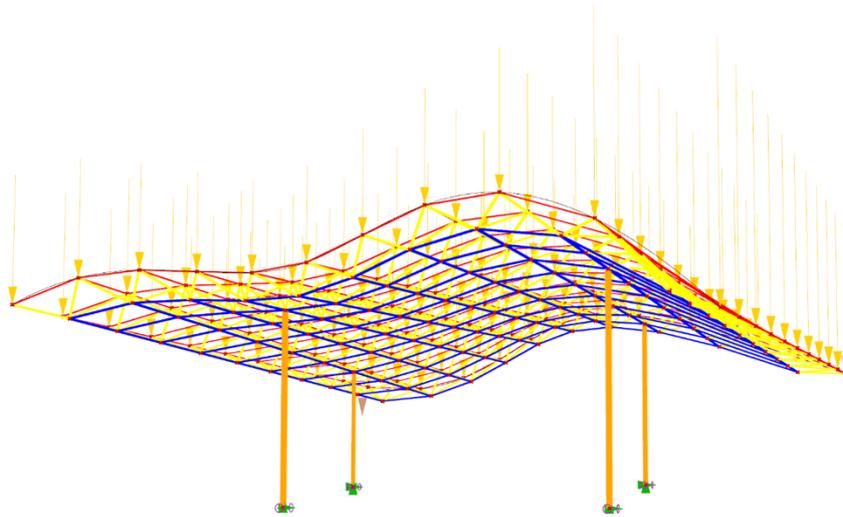


Figura 39 Esquema caso 4.

Lo primero que se debe hacer es tener claros los parámetros geométricos, las condiciones de contorno del modelo a desarrollar y otras restricciones.

Geometría	Curvas definidas por el diseño, superficie ondulada/alabeada con proyección en planta de aproximadamente 30m por lado Altura libre 5m
Material	Acero S275
Secciones	Perfiles HEB para pilares Perfiles QRO para la celosía.
Cargas	Carga de nieve sobre la cubierta de 0,8 kN/m ²
Apoyos	Traslaciones impedidas en X, Y y Z Rotaciones impedidas en X, Y y Z

Con las caras obtenidas con DeBrep, se conectan al módulo área para obtener los centroides de estas superficies, ya que la parte inferior de la cubierta será ligeramente diferente. Estos centroides se mueven un metro hacia en dirección Z negativa que es el grosor que tendrá la celosía de la cubierta, esto se consigue a partir del módulo Move, Number Slider y Unit Z. Así a partir del módulo Line, con la opción Graft activada en la entrada de los centroides y conectando los vértices de la parte baja de la cubierta se consiguen las líneas intermedias de esta.

Con los centroides de la parte inferior y el módulo Path Mapper se crea una relación para conseguir poder hacer las líneas de la parte superior de manera correcta. Después el resultado del Path Mapper se conecta a PolyLine y el resultado de Path Mapper también se conecta a Flip para cambiar la orientación y posteriormente a PolyLine. De esta manera tendremos las líneas en sentido longitudinal y transversal después estas polilíneas se conectan a Explode para conseguir los segmentos de la parte inferior, estas líneas se unen mediante el módulo Merge.

Una vez creada la cubierta al completo, hay que crear la geometría correspondiente a los pilares. Para ello se parte de los vértices de la parte inferior de la cubierta, se conectan al módulo List ítem estos vértices y el módulo Gene Pool con 4 Sliders. Con esto se consigue que se pueda seleccionar con estos Sliders el punto en donde se situaran los apoyos, de entre todos los vértices de la parte inferior. Se dan valores aleatorios a estos Sliders ya que será Galapagos el que se encargará de seleccionar su posición.

Como la cubierta no es plana no se sabe de que longitud tienen que ser los pilares, por lo que se creara un plano x-y a cierta distancia de la cubierta con el que haremos intersectar líneas que saldrán de los puntos seleccionados con el Gene Pool.

Para la creación del plano se parte del punto origen que se moverá 6 m en dirección Z negativa, para ello utilizaremos el punto origen como base en el módulo Move y el vector de traslación que se conseguirá con un Number Slider de valor -6 y Unit Z. Una vez obtenido este punto conectándolo al módulo Plane Surface (PlaneSrf) se consigue el plano deseado.

Con los resultados obtenidos con List Item se crean líneas con suficiente longitud para intersectar con el plano a través del módulo Line SDL (Line) donde se conectan estos puntos y un Number Slider de valor 18.

Para calcular la intersección entre estas líneas y el plano se utiliza el módulo Surface / Line (SLX) en el que bastara con conectar estos. Para finalizar se conectan los puntos de intersección y los puntos obtenidos con List Item al módulo Line y se obtienen las líneas correspondientes a los pilares.

Ya se tienen los puntos y líneas de la geometría para que se puedan usar en las siguientes partes de la metodología.

II Creación de elementos e introducción de material y secciones.

En esta parte de la metodología se van a crear las barras los apoyos y las cargas y se van a introducir los materiales y secciones.

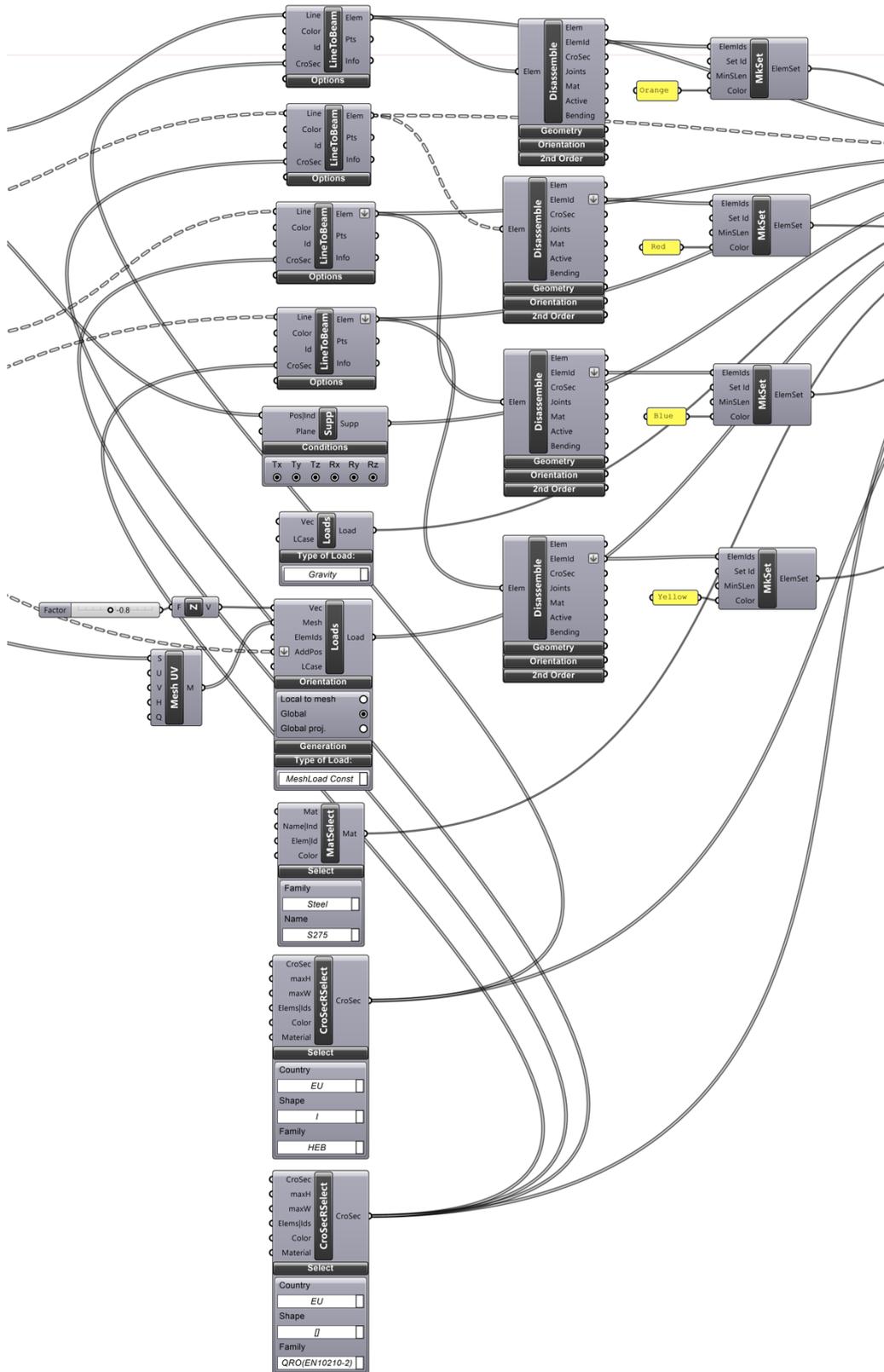


Figura 42 Creación de los elementos y selección de material y secciones del caso 4.

Para la creación de las barras se utiliza el módulo Line to Beam, se usa uno para los pilares donde se introducen las líneas correspondientes a estos y otro para cada parte de la cubierta (parte superior intermedia e inferior) donde se introducen las líneas correspondientes a esta, también se conectarán las secciones correspondientes a cada

parte ya que en este caso no son iguales y se le asignara un nombre genérico a cada elemento de cada parte para que a posteriori se puedan generar grupos de elementos.

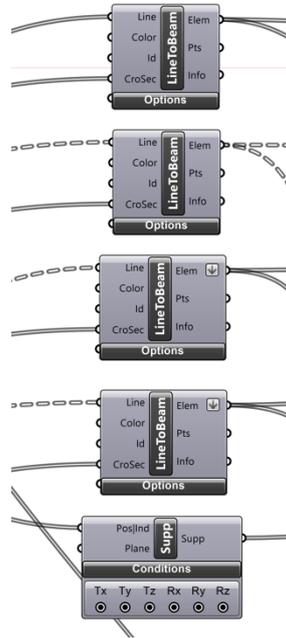


Figura 43 Creación de barras y apoyos del caso 4.

Para los apoyos se usa el módulo Support donde se introducen los puntos correspondientes a los puntos base de los pilares y se seleccionan las restricciones de traslación y rotación. En este caso traslación en X, Y y Z y rotación en X, Y y Z.

Para las cargas en este caso se necesita una carga de gravedad que se obtiene simplemente seleccionando Gravity en el desplegable del módulo Loads.

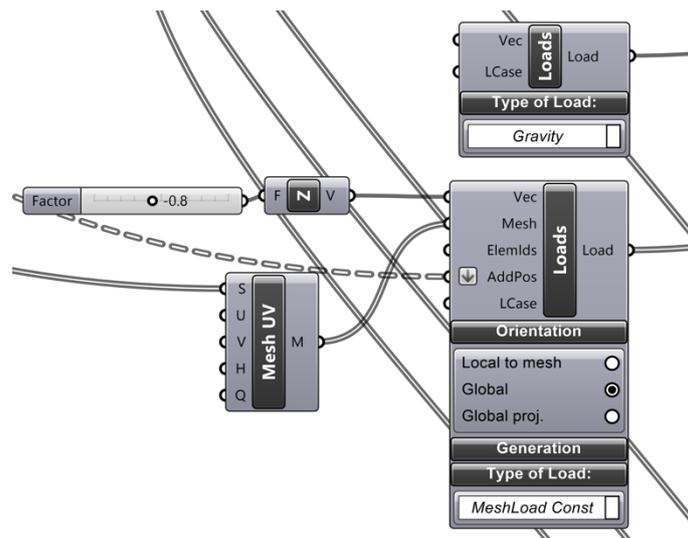


Figura 44 Creación de cargas del caso 4.

Para definir la carga sobre la cubierta primero se selecciona MeshLoad Const en la pestaña de tipo de carga. El vector fuerza de superficie se crea a partir de un Number Slider de valor -0,8 y Unit Z. Para crear la malla se conecta las superficies obtenidas en

Isotrim (SubSrf) al módulo Mesh UV consiguiendo así la malla que se conecta al módulo Loads. También se debe seleccionar orientación Global y generación de cargas puntuales. Además, se conectan los puntos donde se quiere que se generen estas cargas puntuales correspondientes con los vértices obtenidos en Deconstruct Brep (DeBrep).

Para la selección del material se usa el módulo Material Selector, para seleccionar el material de este caso que es el acero S235 basta con seleccionar en la pestaña de Family Steel y en la pestaña de Name S235.

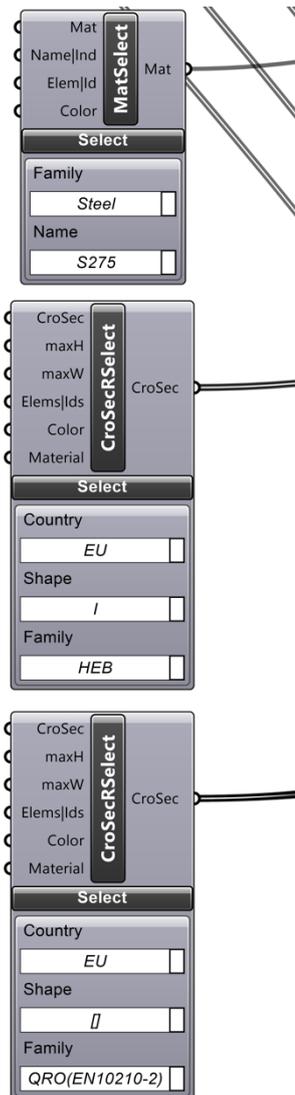


Figura 45 Selección de material y secciones del caso 4.

Para seleccionar las secciones se utiliza el modulo Cross Section Range Selector (CroSecRSelect) basta con seleccionar en el desplegable Select, país, forma y familia. En este caso se utilizan dos uno para los perfiles HEB y otro para los QRO.

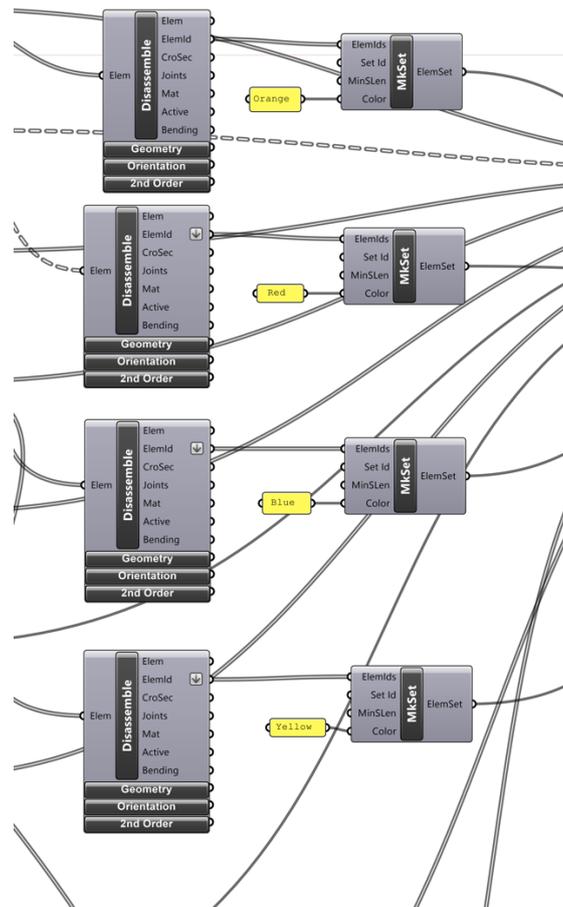


Figura 46 Creación de grupos de elementos.

Se quieren crear también grupos para cada parte del modelo para ello usaremos el módulo Disassemble Element (Disassemble), junto con el módulo Make Element-Set (MkSet). Conectando los elementos resultantes de cada Line to Beam a Disassemble se obtiene el Id de los elementos, este se conecta a MkSet y en este módulo se elige un nombre para cada grupo con una entrada de texto a la que se accede a partir de las opciones de la entrada SetId. También se les aplica color a los grupos a partir de un Panel con el color que se desea.

Se crea un grupo para los pilares, otro para la parte superior, otro para la parte intermedia y otro para la parte inferior.

Ya se tienen las barras, los apoyos, cargas, grupos de elementos, material y sección preparados para su utilización en la siguiente parte de la metodología.

III Ensamblaje y optimización de secciones.

En este apartado de la metodología se ensambla el modelo, se optimizan las secciones y se optimiza la posición de los pilares.

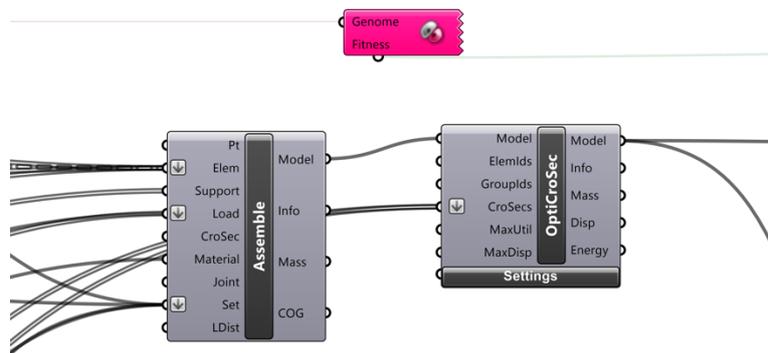


Figura 47 Ensamblaje del modelo y optimización de secciones del caso 4.

Para ensamblar el modelo se utiliza en el módulo Assamble model en el que se introducen los elementos (barras), apoyos, cargas, secciones, grupos de elementos y material.

Para optimizar las secciones se utiliza el módulo Optimize Cross Section en el que se introduce el modelo conseguido con el módulo Assamble model y la lista de secciones obtenida en con el Cross Section Selector, en GroupIds se deben introducir los nombres de los grupos creados si se quiere que se le asigne la misma sección a todo el grupo, en este caso se introduce el grupo superior, inferior e intermedio de la celosía.

Se utiliza Galapagos para la optimización de la posición de los pilares para que el momento sea mínimo en el modelo. Para ello se debe introducir en el parámetro Genome, que es lo que se quiere que optimice, el Gene Pool con los Sliders de la posición de los pilares y en el parámetro Fitness se introduce lo que se quiere optimizar, en este caso el momento que se obtiene con el módulo Beam Resultant Forces.

Para proceder a la optimización se actúa de igual manera que en el caso 2, se accede al menú de Galapagos haciendo doble click con el botón izquierdo sobre el módulo de Galapagos y se selecciona la opción de minimizar, ya que lo que se quiere es que el momento sea mínimo y se procede a iniciar la optimización. Pasado un tiempo, finaliza la optimización y los Sliders del Gene Pool se quedan en la posición que se buscaba donde el momento es mínimo en el modelo.



Figura 48 Resultados de la optimización en Galapagos.

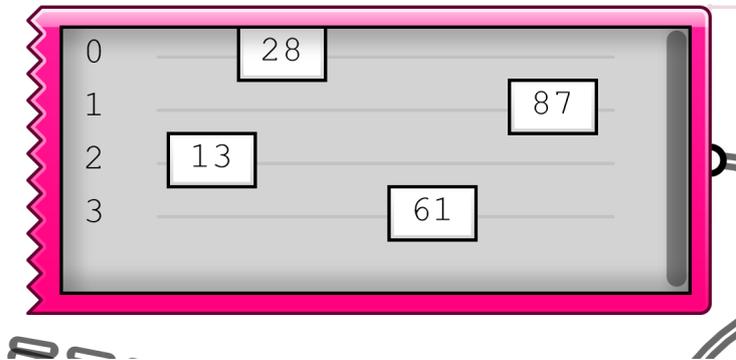


Figura 49 Resultado posición pilares.

IV Visualización de resultados.

En esta parte se consigue ver el modelo y barras renderizadas y se permite visualizar diferentes resultados con valores numéricos y con leyendas de colores.

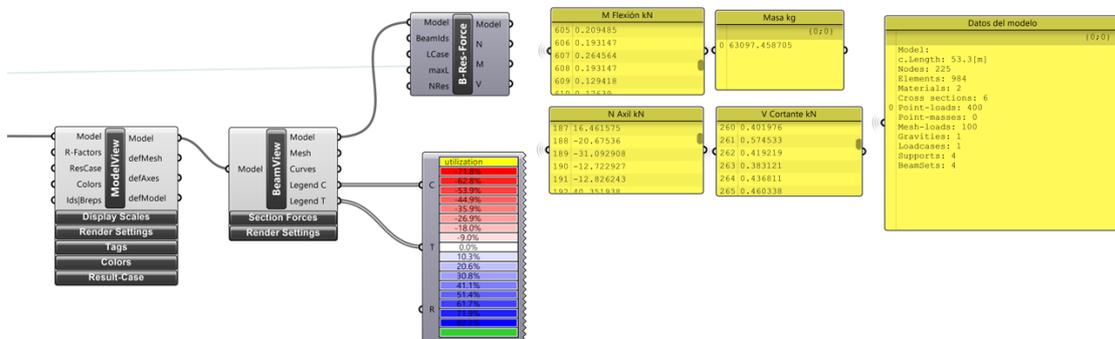


Figura 50 Visualización de resultados del caso 4.

Para visualizar el modelo se hace pasar el modelo por el módulo Model View (ModelView) con el que se ven todos los elementos del modelo como cargas, nodos apoyos, deformación del modelo y barras sin renderizar.

A continuación, se hace pasar el modelo por el módulo Beam View (BeamView) con el que se consigue la renderización de las barras con el que se incluye las fuerzas que soportan las secciones.

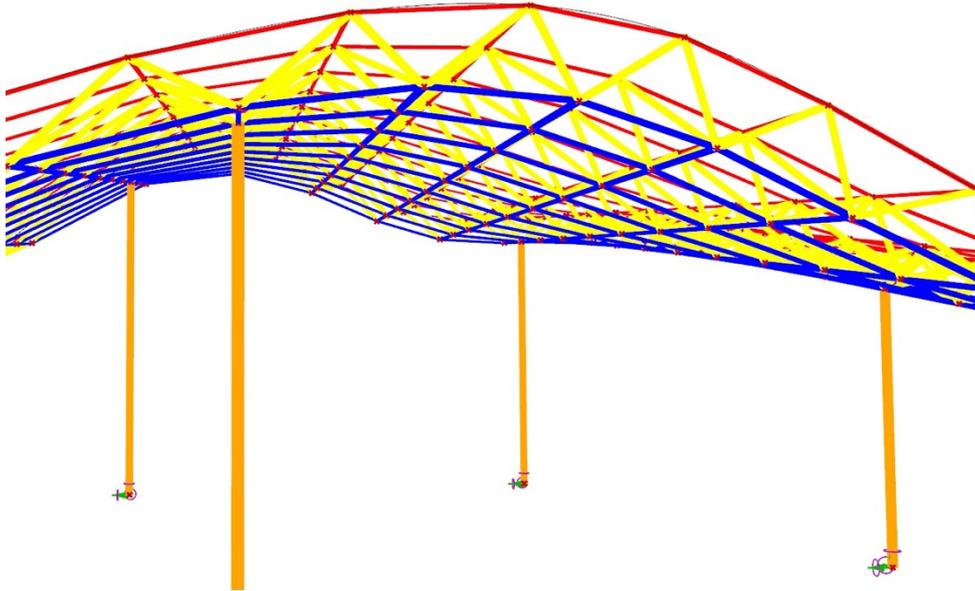


Figura 51 Estructura según colores de los grupos.

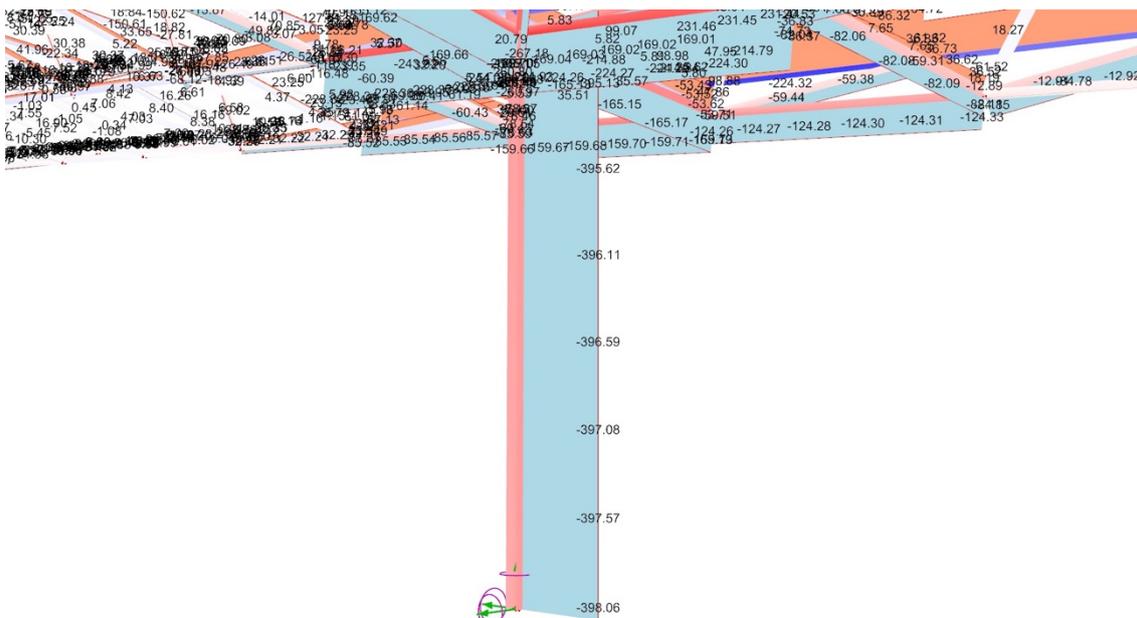


Figura 52 Esfuerzos axiales (Nx). Detalle de uno de los pilares.

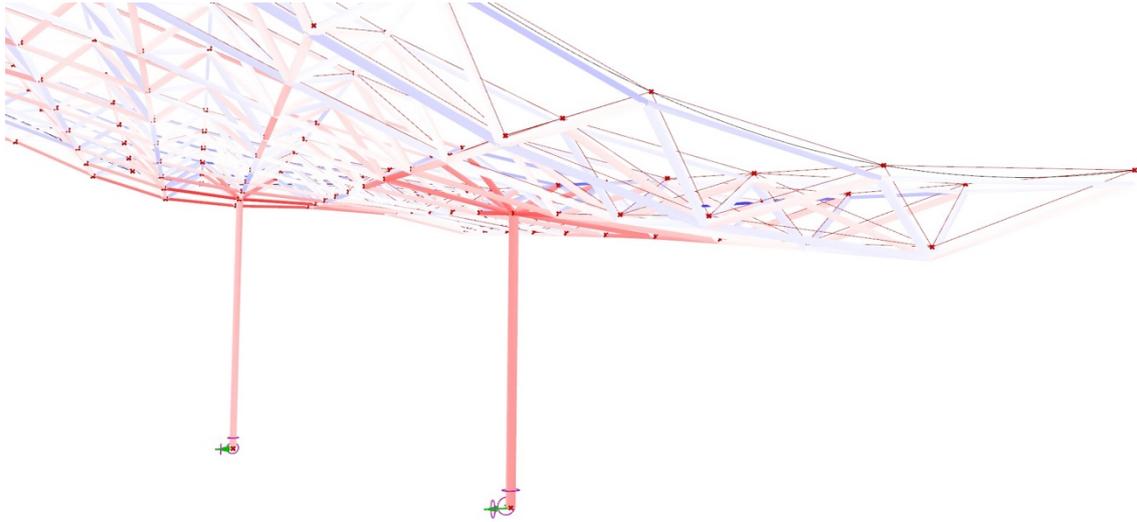


Figura 53 Deformada de la estructura.

También con el uso del módulo Beam Resultant Forces (B-Res-Force) introduciendo en el modelo se consigue los valores máximos de axil, cortante y momento que actúan sobre cada una de las barras. Con un panel se pueden observar estos valores en una lista como se ve en la figura.

Además, se añade el módulo Export Model to DStV (ExToDStV) para exportar el modelo a RFEM.

3 Otros aspectos de interés.

3.1 Creación y uso de una biblioteca propia de secciones en Karamba.

En este apartado se expone la creación y uso de una biblioteca propia de secciones para Karamba.

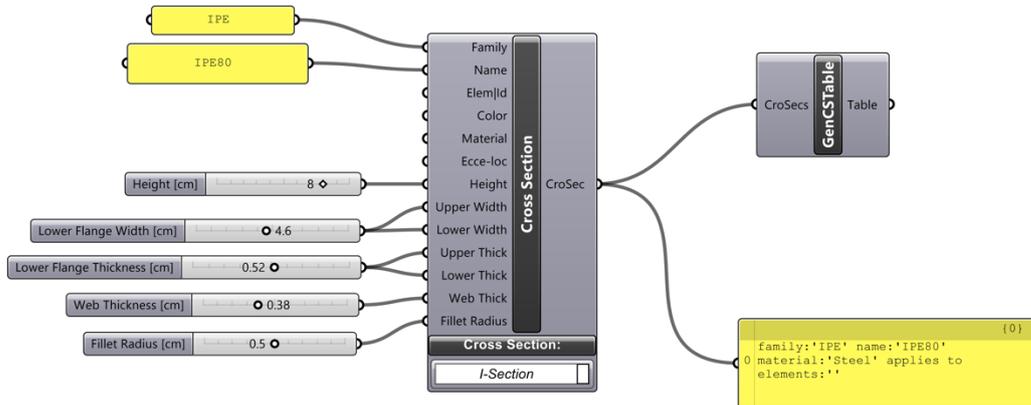


Figura 54 Creación de la sección IPE 80.

Para crear una biblioteca hay dos opciones principales, si las secciones que se quieren crear son pocas se recomienda hacerlo con el módulo Cross Section, con el que se elige la forma de la sección en un desplegable e introduciendo los datos geométricos y nombres se consigue crear la sección, se debe repetir este proceso tantas veces como secciones se quieran crear. Como último paso para crear la biblioteca se utiliza el módulo Generate Cross Section Table, en el que se introducen las secciones creadas y se genera una tabla de secciones. Para guardar esta tabla de secciones para su posterior uso se hace click con el botón derecho en el ratón, se selecciona la opción Save cross section table to file y se elige su nombre ubicación y formato del archivo. Como ejemplo se toma la creación de un perfil IPE 80.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	#	country	family	name	shape	h	t_web	b_upper	t_upper	b_lower	t_lower	r	ex	ey
2	#	-	-	-	-	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm	cm
3			IPE	IPE80	I		80 3.8		46 5.2		46 5.2		5	0
4														
5														

Figura 55 Ejemplo biblioteca sección IPE 80.

La segunda opción es muy similar a la primera pero basta con hacer una sección si los perfiles son de la misma forma y a la hora de guardar el archivo se selecciona el formato csv. A continuación, se abre el archivo con Excel o similar y se completa con las secciones que se quieran siguiendo el patrón de la primera sección creada. Como ejemplo se toma la creación de la serie IPE.

#	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
	country	family	name	shape	h	t_web	b_upper	t_upper	b_lower	t_lower	r	ex	ey	ez	zs	A	A_y	
					mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	cm	cm	cm	cm	cm2	cm2	
3	EU	IPE	IPE80	I		80 3.8		46 5.2		46 5.2		5	0	0	0	4 7.64	4.8	
4	EU	IPE	IPE100	I		100 4.1		55 5.7		55 5.7		7	0	0	0	5 10.3	6.43	
5	EU	IPE	IPE120	I		120 4.4		64 6.3		64 6.3		7	0	0	0	6 13.2	8.2	
6	EU	IPE	IPE140	I		140 4.7		73 6.9		73 6.9		7	0	0	0	7 16.4	10.14	
7	EU	IPE	IPE160	I		160	5	82 7.4		82 7.4		9	0	0	0	8 20.1	12.47	
8	EU	IPE	IPE180	I		180 5.3		91	8	91	8	9	0	0	0	9 23.9	14.78	
9	EU	IPE	IPE200	I		200 5.6		100 8.5		100 8.5		12	0	0	0	10 28.5	17.8	
10	EU	IPE	IPE220	I		220 5.9		110 9.2		110 9.2		12	0	0	0	11 33.4		
11	EU	IPE	IPE240	I		240 6.2		120 9.8		120 9.8		15	0	0	0	12 39.1	24.8	
12	EU	IPE	IPE270	I		270 6.6		135 10.2		135 10.2		15	0	0	0 13.5	45.9	28.8	
13	EU	IPE	IPE300	I		300 7.1		150 10.7		150 10.7		15	0	0	0	15 53.8	33.3	
14	EU	IPE	IPE330	I		330 7.5		160 11.5		160 11.5		18	0	0	0 16.5	62.6	38.7	
15	EU	IPE	IPE360	I		360	8	170 12.7		170 12.7		18	0	0	0	18 72.7	44.9	
16	EU	IPE	IPE400	I		400 8.6		180 13.5		180 13.5		21	0	0	0	20 84.5	51.3	
17	EU	IPE	IPE450	I		450 9.4		190 14.6		190 14.6		21	0	0	0 22.5	98.8	57.9	
18	EU	IPE	IPE500	I		500 10.2		200	16	200	16	21	0	0	0	25	116 66.6	
19	EU	IPE	IPE550	I		550 11.1		210 17.2		210 17.2		24	0	0	0 27.5		134 74.9	
20	EU	IPE	IPE600	I		600	12	220	19	220	19	24	0	0	0	30	156 86.3	

Figura 56 Ejemplo biblioteca Serie IPE.

Para usar las bibliotecas de secciones creadas se usa el módulo Read Cross Section Table from File (ReadCSTable), se debe introducir el camino hasta el archivo que se quiere leer que se consigue a través del modulo Path. El archivo que se quiere leer debe tener formato csv o formato bin.

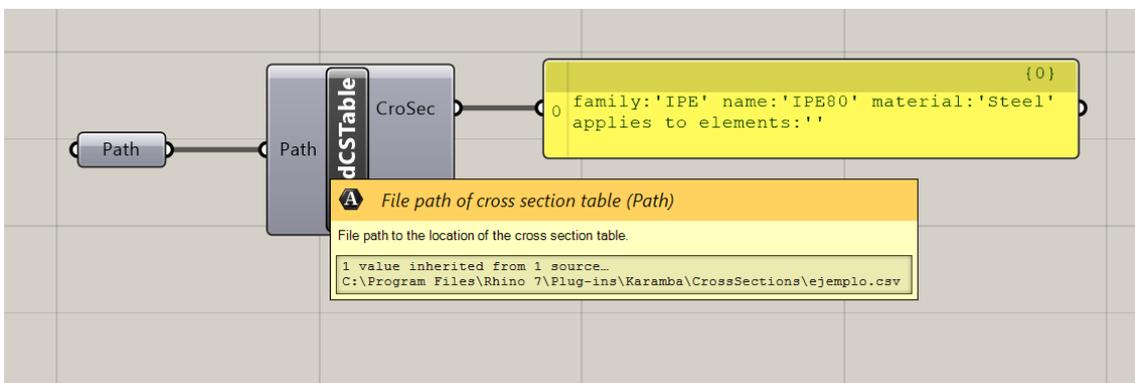


Figura 57 Lectura de tabla de secciones desde archivo .csv.

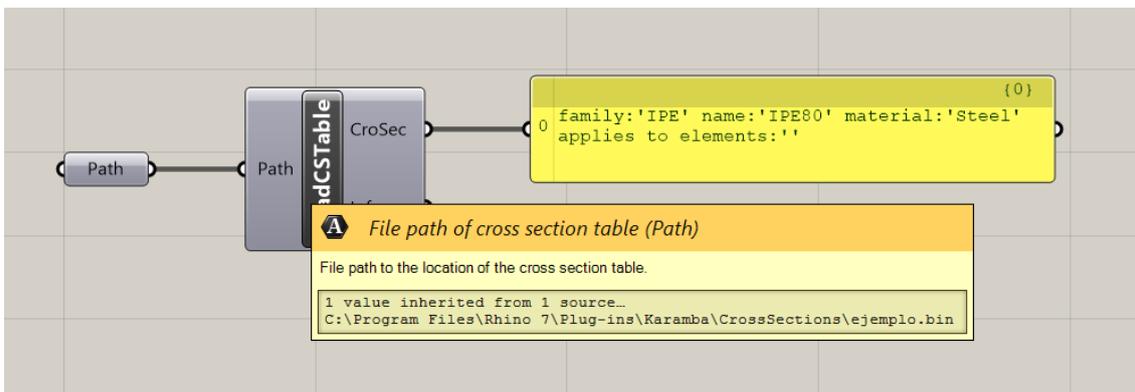


Figura 58 Lectura de tabla de secciones desde archivo .bin.

Se recomienda ubicar los archivos que se quieren guardar en la carpeta del programa para evitar errores.

3.2 Exportación del modelo desde Karamba 3D a RFEM.

En esta parte se explica como exportar cualquier modelo desde Karamba 3D a RFEM. Para ello se usa el módulo Export Model to DStV (ExToDStV), en el se conecta el modelo que se quiere exportar cuando ya esta finalizado en los casos desarrollados en este

documento sería el modelo que se obtiene en el módulo Optimize Cross Section (OptiCroSec).

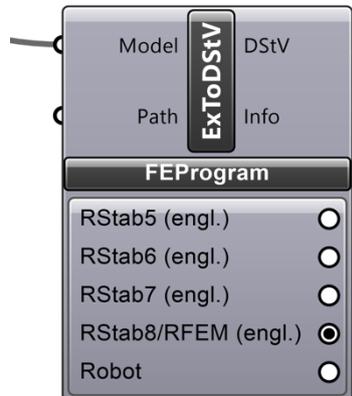


Figura 59 Utilización del módulo Export To DStv.

Después se selecciona en la pestaña FEProgram la opción RStab8/RFEM (engl.), seguidamente se hace click con el botón derecho del ratón sobre el módulo y se selecciona la opción Select file path to file for export. Aparece una ventana que permite seleccionar donde se quiere guardar el archivo y dar un nombre al archivo.

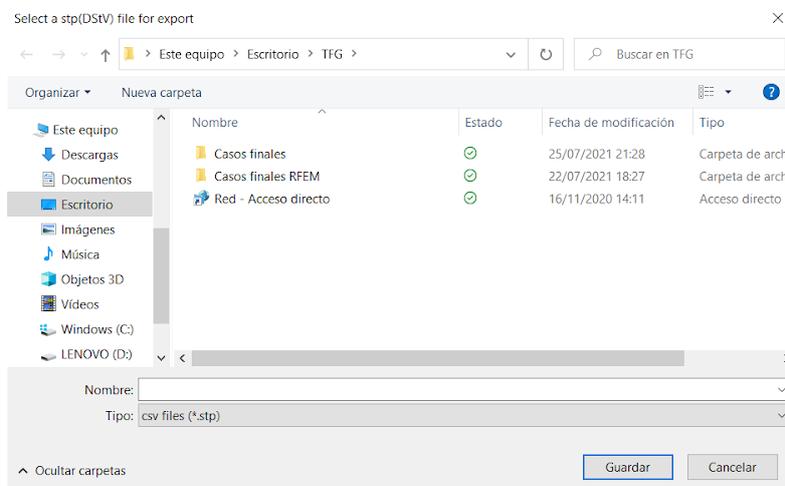


Figura 60 Ventana Select file path to file for export.

Una vez guardado se accede a RFEM y se abre este archivo, el programa procesará el código que contiene este archivo y generará un modelo idéntico al creado en Karamba 3D.

Esto permite crear estructuras complejas en poco tiempo con Grasshopper y Karamba 3D para luego ser exportadas a RFEM. De modo que se utiliza Karamba 3D para el predimensionado de la estructura permitiendo agilizar las iteraciones necesarias hasta conseguir un diseño de la estructura que finalmente será pasado a RFEM para hacer un

análisis más exhaustivo y las comprobaciones según la normativa de aplicación (Eurocodigo, CTE, etc.).

Isométrico

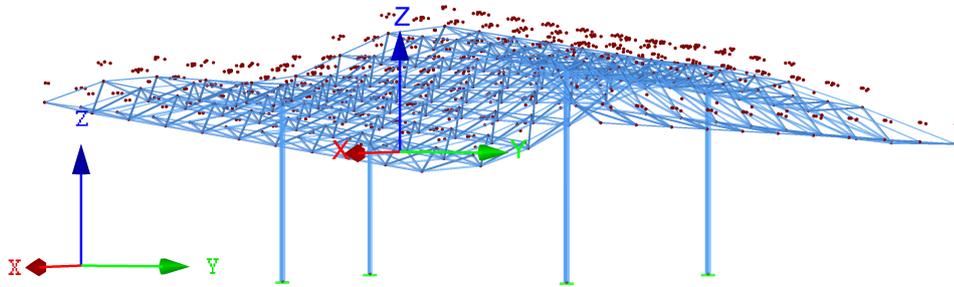


Figura 61 Caso 4 con RFEM.

4 Análisis de resultados y comparación con los obtenidos con RFEM

4.1 Introducción

En este apartado se van a analizar los resultados obtenidos en Karamba, y se van a comparar con los obtenidos para los mismos casos en RFEM.

La razón de esta comparación es la de saber si se obtienen resultados fiables en Karamba, ya que en el manual pone “Aunque Karamba ha sido testado cuidadosamente probablemente contenga errores. El uso de Karamba es completamente tu riesgo”, por ello, aunque Karamba no se usaría nunca como Software para el cálculo y diseño final de una estructura se quiere saber si podría servir como herramienta de diseño temprano de una estructura.

Se decide usar RFEM porque es un software de gran reputación y fiabilidad en sus resultados, además de ser uno de los más usados para el diseño y cálculo de estructuras.

Antes de analizar y comparar los resultados se desarrollan las opciones de visualización de estos en Karamba 3D.

4.2 Opciones de visualización de resultados

Para una buena interpretación y análisis de los resultados se desarrollan las opciones que tienen los módulos ModelView Y BeamView referentes a la visualización de los resultados.

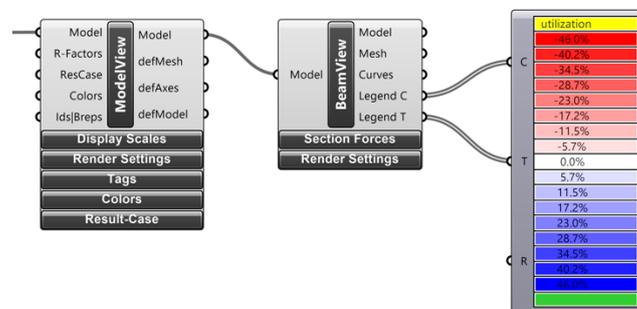


Figura 62 Módulos ModelView, BeamView y Legend.

Se comienza con ModelView en la pestaña de Display Scales aparecen distintos parámetros que se pueden activar y desactivar para su visualización, así como configurar la escala con la que se muestran. Estos parámetros son los siguientes: configuración deformada del modelo, reacciones, cargas, apoyos, ejes locales y uniones.

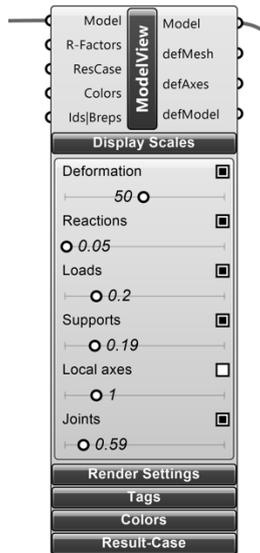


Figura 63 Opciones de Display Scales del módulo ModelView.

En la pestaña Render Settings se encuentran los ajustes del renderizado, en los que se puede configurar la longitud de los segmentos en m, este es un parámetro muy importante para poder visualizar bien el modelo ya que si por ejemplo se elige un valor muy alto para este parámetro no se vería bien el modelo creando picos en la deformada y diagramas de esfuerzos que dificultan el análisis de los resultados.

También se puede configurar el valor umbral de los resultados superior e inferior y como visualizar los resultados umbral en tanto por ciento de rango o en valor absoluto.

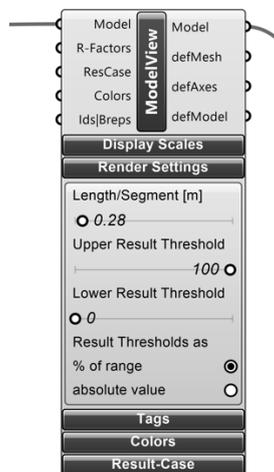


Figura 64 Opciones de Render Settings del módulo ModelView.

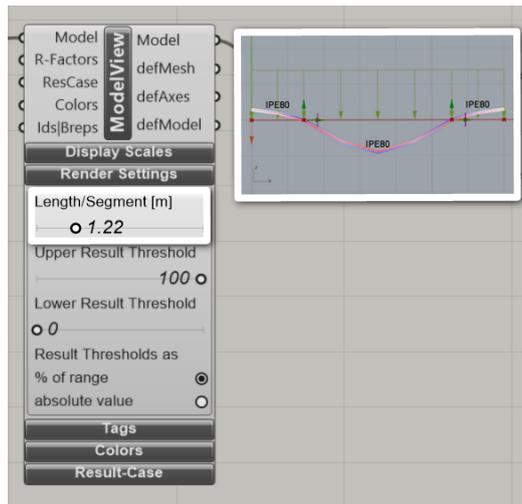


Figura 65 Length/Segment mal ajustado.

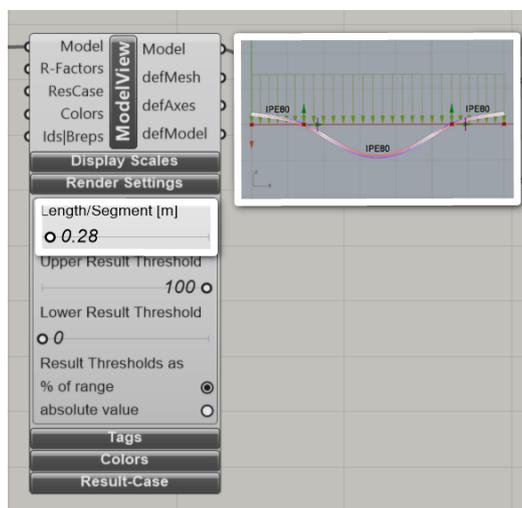


Figura 66 Length/Segment bien ajustado.

En la pestaña Tags se puede seleccionar que etiquetas se quiere que aparezcan en el modelo. Las etiquetas que se pueden configurar en esta pestaña son las siguientes: Nodos, elementos, identificadores de elementos, nombres de las secciones, nombre del material, excentricidades y valores de las cargas.

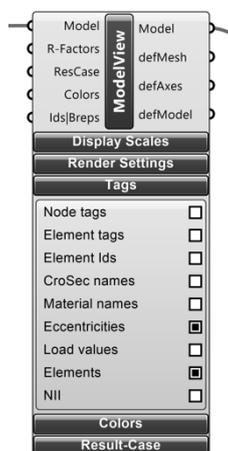


Figura 67 Opciones de Tags del módulo ModelView.

En la pestaña Colors se pueden activar o desactivar los colores asignados a los elementos, secciones y materiales.

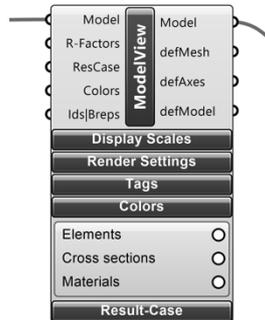


Figura 68 Opciones de Colours del módulo ModelView.

Por último, en la pestaña Result Case aparece un desplegable en el que se puede seleccionar el caso de carga que se quiere mostrar o si se quieren visualizar todos.

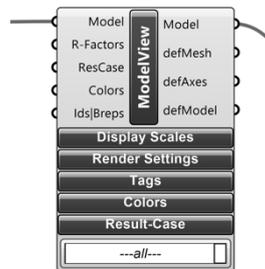


Figura 69 Opciones de Result Case del módulo ModelView.

En el módulo Beam View se tienen dos pestañas una para configurar las opciones de visualización de las fuerzas actuantes en el modelo y otra de ajustes de renderizado.

En la pestaña Section Forces se puede seleccionar el diagrama de esfuerzos que se quiere visualizar en el modelo (M_x , M_y , M_z , N_x , V_y , V_z) así como la escala que se les aplica, si se quiere que aparezcan con valores numéricos y si se quiere que aparezca el diagrama con relleno.

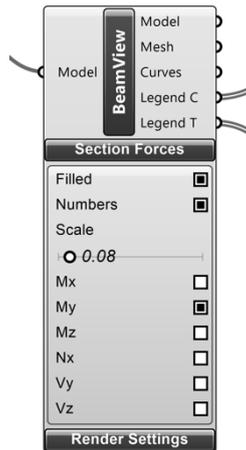


Figura 70 Opciones de Section Forces del módulo BeamView.

En la pestaña Render Settings se puede que opción de renderización se quiere visualizar, los tipos de renderización son los siguientes: secciones, tensión axial, utilización y desplazamientos. También con el parámetro Faces/Cross section se puede refinar el resultado visualizado.

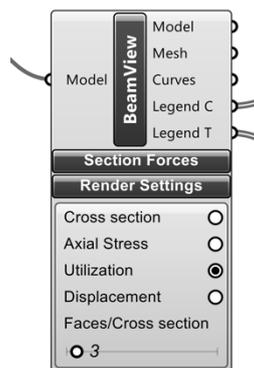


Figura 71 Opciones de Render Settings del módulo BeamView.

Los datos de la leyenda dependen de la opción de que se selecciona en el Render Settings del BeamView.

El módulo Utilization of elements nos permite obtener los valores de las tensiones a las que está sometido el modelo.

4.3 Caso 1

Para comenzar se comprueban las reacciones (kN) generadas en los apoyos, como se puede ver en las imágenes son idénticas.

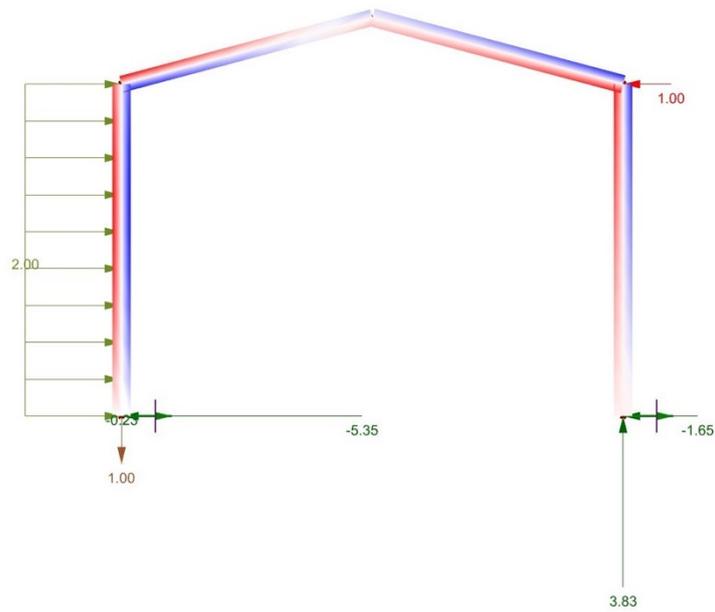


Figura 72 Reacciones del caso 1 obtenidas mediante Karamba 3D.

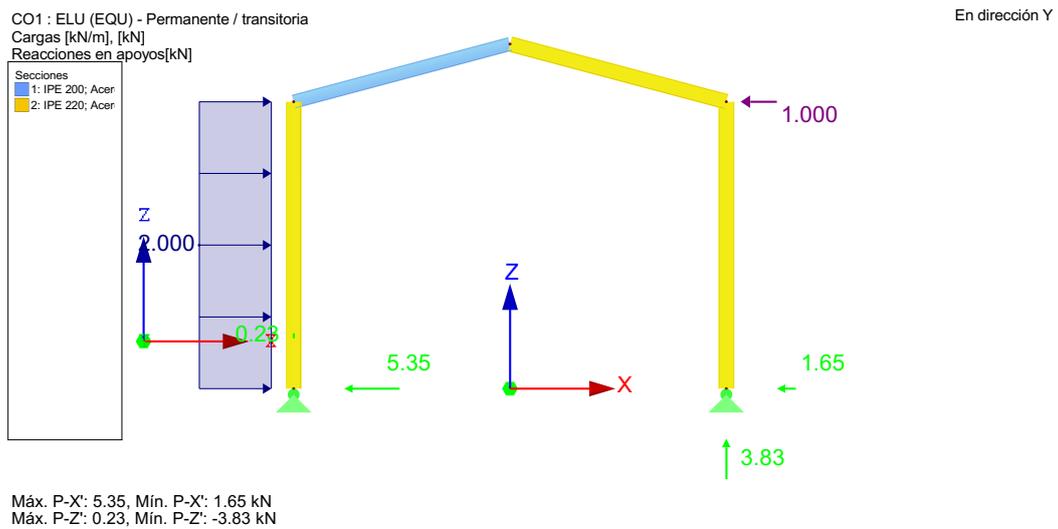


Figura 73 Reacciones del caso 1 obtenidas mediante RFEM.

Seguidamente se comparan los diagramas de esfuerzos, resultando también idénticos.

- My (kN m)

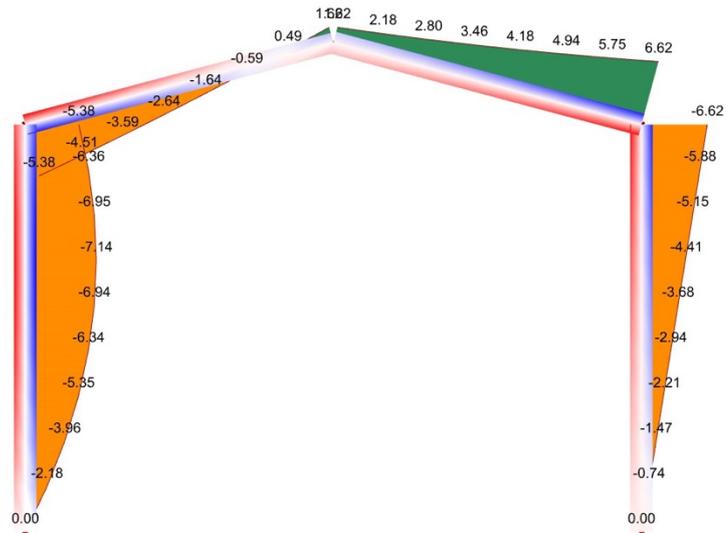


Figura 74 Diagrama My del caso 1 obtenido mediante Karamba 3D.

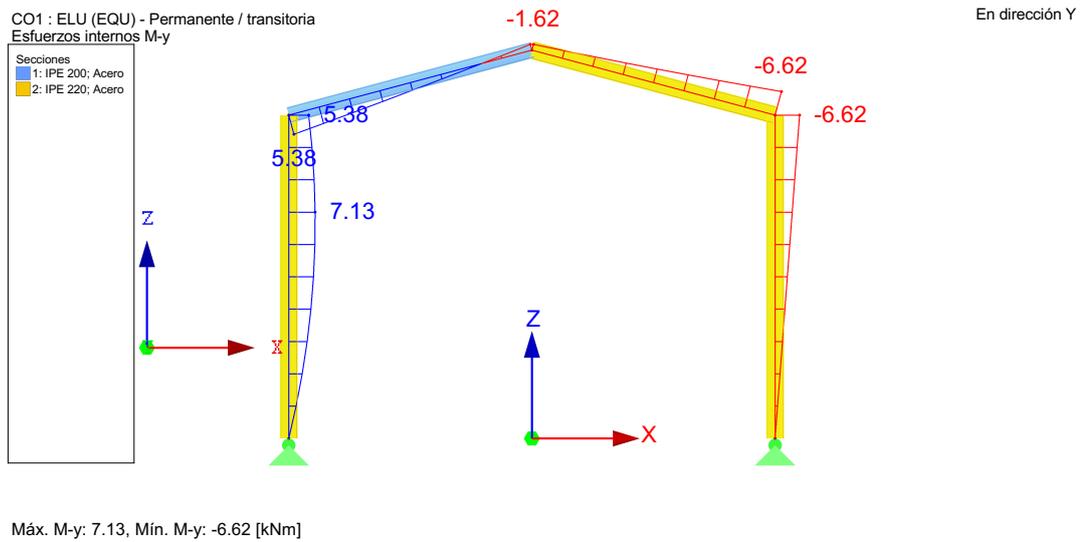


Figura 75 Diagrama My del caso 1 obtenido mediante RFEM.

- Nx (kN)

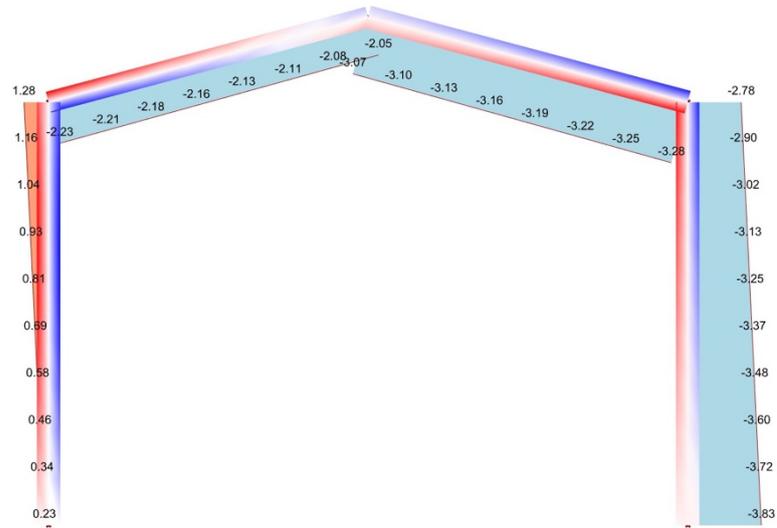


Figura 76 Diagrama Nx del caso 1 obtenido mediante Karamba 3D.

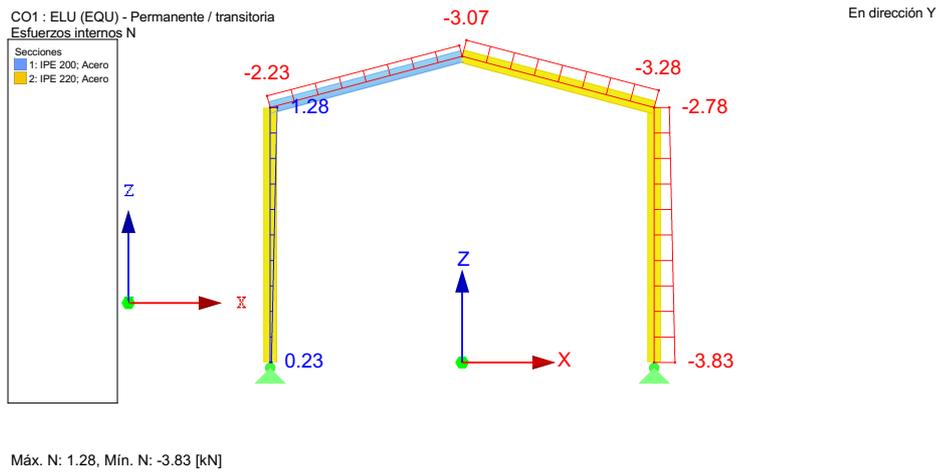


Figura 77 Diagrama Nx del caso 1 obtenido mediante RFEM.

- Vz (kN)

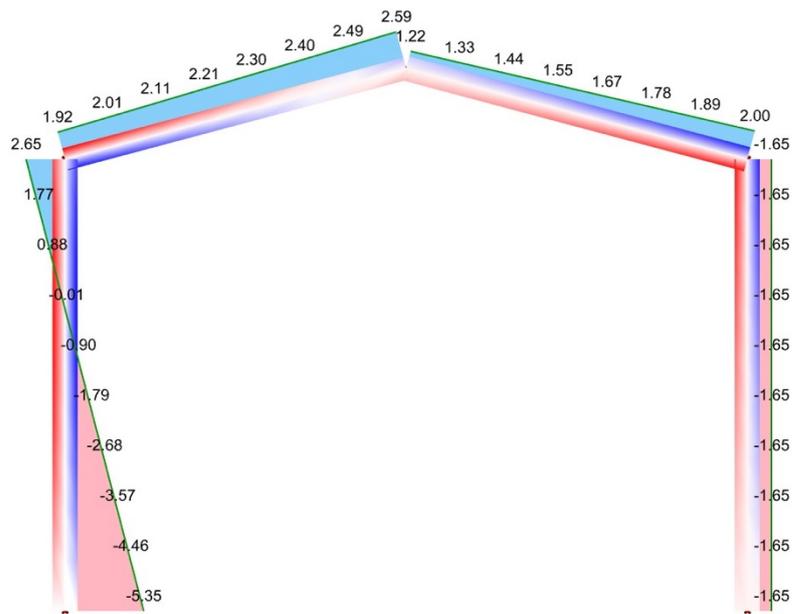


Figura 78 Diagrama Vz del caso 1 obtenido mediante Karamba 3D.

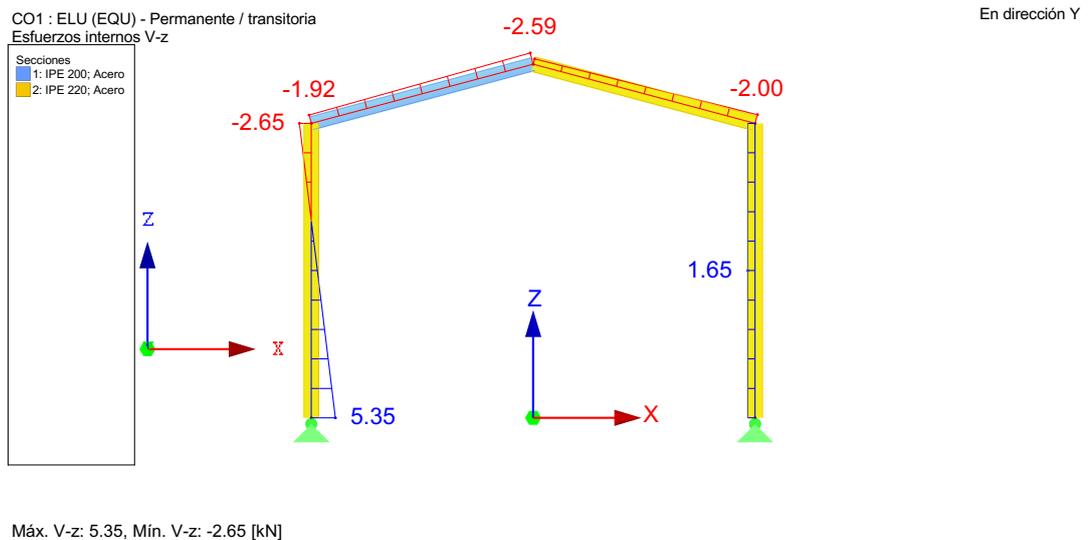


Figura 79 Diagrama Vz del caso 1 obtenido mediante RFEM.

Para finalizar compararemos las tensiones máximas y mínimas del modelo

	Karamba 3D	RFEM
σ_x max [kN/cm ²]	2,6916	2,85
σ_x min [kN/cm ²]	-2,8484	2,84
τ max [kN/cm ²]	0,242	0,47

Las tensiones tienen valores parecidos, pero difieren ligeramente. Esto puede ser debido a los diferentes métodos de cálculo que utilizan los dos programas y/o a una discretización de la malla diferente en cada caso.

4.4 Caso 2

Para comenzar se comprueban las reacciones (kN) generadas en los apoyos, como se puede ver en las imágenes son idénticas.

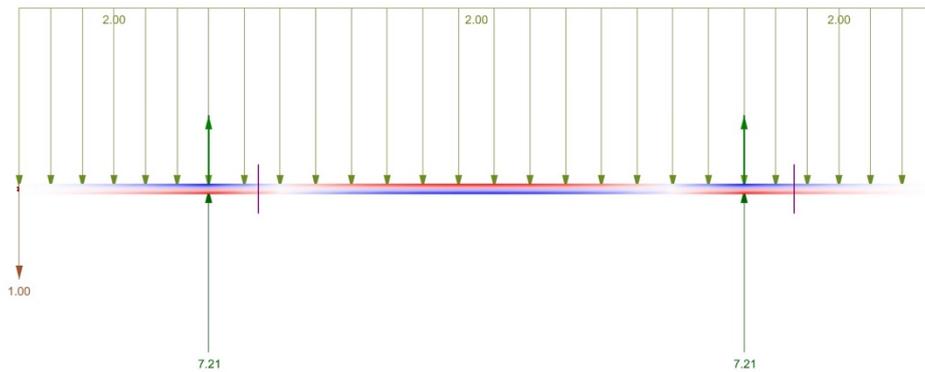
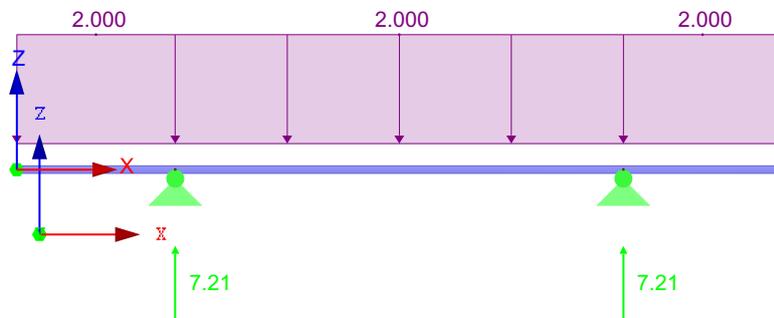


Figura 80 Reacciones del caso 2 obtenidas mediante Karamba 3D.

CO1 : ELU (EQU) - Permanente / transitoria
Cargas [kN/m]
Reacciones en apoyos[kN]

En dirección Y



Máx. P-X': 0.00, Mín. P-X': 0.00 kN
Máx. P-Z': -7.21, Mín. P-Z': -7.21 kN

Figura 81 Reacciones del caso 2 obtenidas mediante RFEM.

Seguidamente se comparan los diagramas de esfuerzos, resultando también prácticamente idénticos.

- My (kN m)

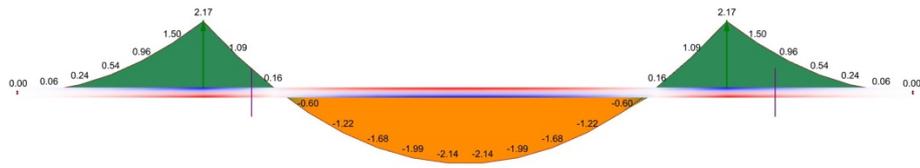
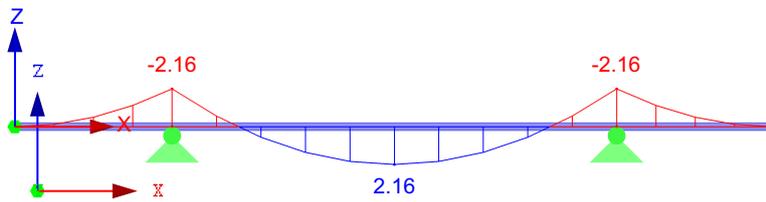


Figura 82 Diagrama My del caso 1 obtenido mediante Karamba 3D.

CO1 : ELU (EQU) - Permanente / transitoria
Esfuerzos internos M-y

En dirección Y



Máx. M-y: 2.16, Mín. M-y: -2.16 [kNm]

Figura 83 Diagrama My del caso 1 obtenido mediante RFEM.

- Vz (kN)

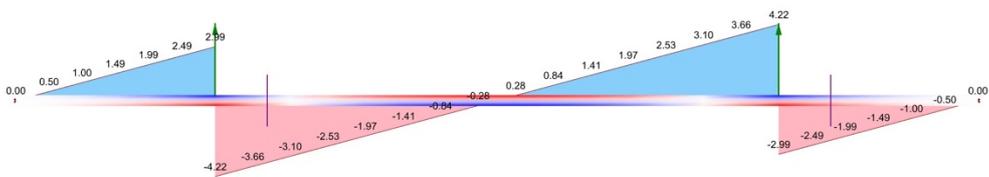
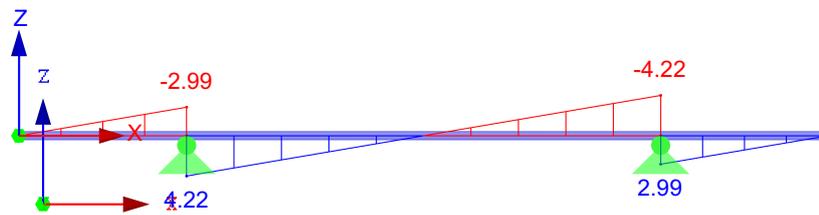


Figura 84 Diagrama Vz del caso 2 obtenido mediante Karamba 3D.



Máx. V-z: 4.22, Min. V-z: -4.22 [kN]

Figura 85 Diagrama Vz del caso 2 obtenido mediante RFEM.

Ahora se comprueba la eficacia del optimizador Galapagos a través de la resolución analítica del problema.

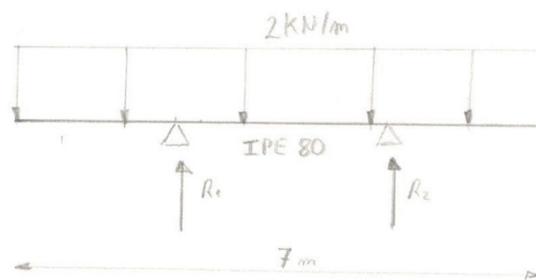


Figura 86 Equilibrio de fuerzas.

Se debe tener en cuenta varios aspectos para la resolución los apoyos se encuentran a la misma distancia de los extremos (1) y el valor del momento sobre el apoyo es igual al valor del momento sobre el centro de la barra (2).

$$x_2 = 7 - x_1 \quad (1)$$

$$M_{x1} + M_{centro} = 0 \quad (2)$$

Como el modelo es simétrico las reacciones en los apoyos serán iguales. En este caso solo hay reacción horizontal.

$$R_1 = R_2 = R$$

Se procede a calcular la reacción horizontal, para ello hay que tener en cuenta que no solo actúa la carga lineal uniforme, hay que tener en cuenta también el peso propio de los perfiles IPE 80.

$$q_l = 2 \frac{kN}{m}$$

$$q_{pp} = 0,06 \frac{kN}{m}$$

$$q_{total} = 2 + 0,06 = 2,06 \frac{kN}{m}$$

Se hace sumatorio de fuerzas en el eje z y se iguala a cero obteniendo el valor de las reacciones.

$$2 * R = 2,06 \frac{kN}{m} * 7 m$$

$$R = 7,21 kN$$

Con la condición 2 se obtiene la siguiente expresión con la que se consigue la posición del primer apoyo.

$$-(2,06) * x_1 * \frac{x_1}{2} = 2,06 * 3,5 * \frac{3,5}{2} - (3,5 - x_1) * 7,21$$

$$x_1 = 1,45 m$$

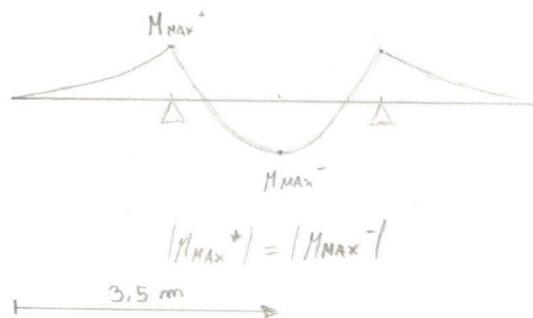


Figura 87 Condición 1.

Con la condición 1 se obtiene la posición del segundo apoyo.

$$x_2 = 5,55 m$$

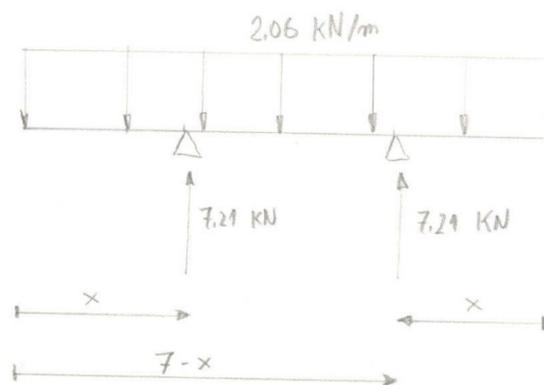


Figura 88 Condición 2.

Como se puede observar la posición es exacta a la obtenida con Galapagos.

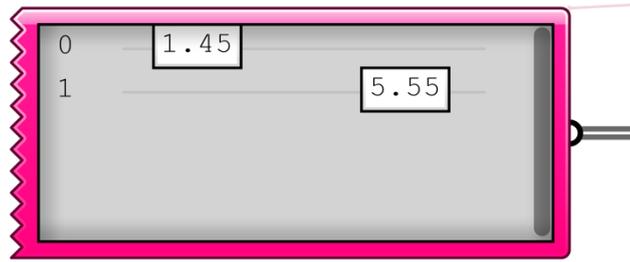


Figura 89 Resultados de la posición de los apoyos del caso 2 obtenidos con Galapagos.

Para finalizar compararemos las tensiones máximas y mínimas del modelo

	Karamba 3D	RFEM
σ_x max [kN/cm ²]	10,811	11,11
σ_x min [kN/cm ²]	-10,811	-11,11
τ max [kN/cm ²]	1,4869	1,58

Las tensiones tienen valores parecidos, pero difieren ligeramente esto puede ser debido a los diferentes métodos de cálculo que utilizan los dos programas y/o discretización de las mallas MEF.

4.5 Caso 3

Para comenzar se comprueban las reacciones (kN) generadas en los apoyos, como se puede ver en las imágenes son idénticas.



Figura 90 Reacciones del caso 3 obtenidas mediante Karamba 3D.

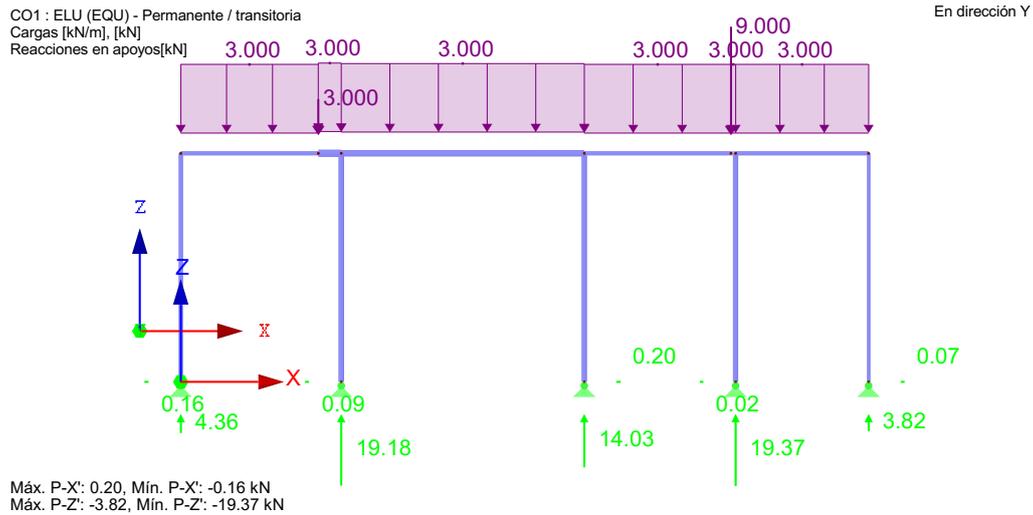


Figura 91 Reacciones del caso 3 obtenidas mediante RFEM.

Seguidamente se comparan los diagramas de esfuerzos, resultando también prácticamente idénticos.

- My (kN m)

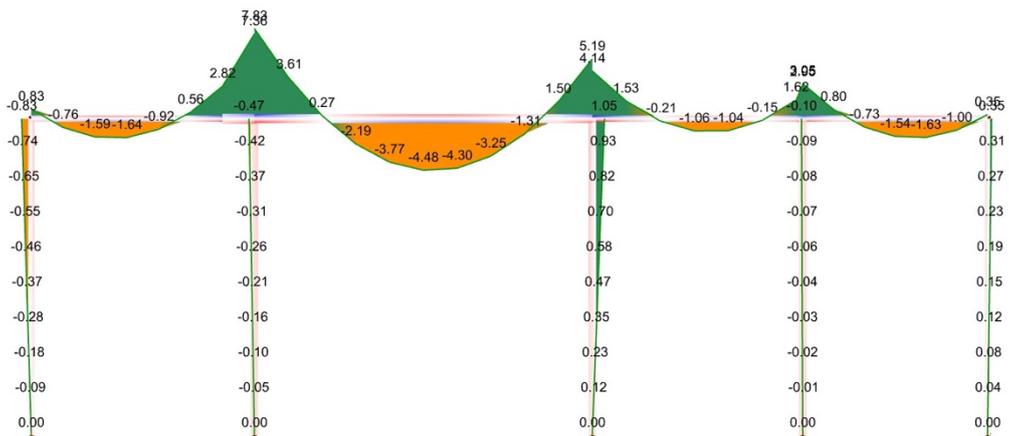
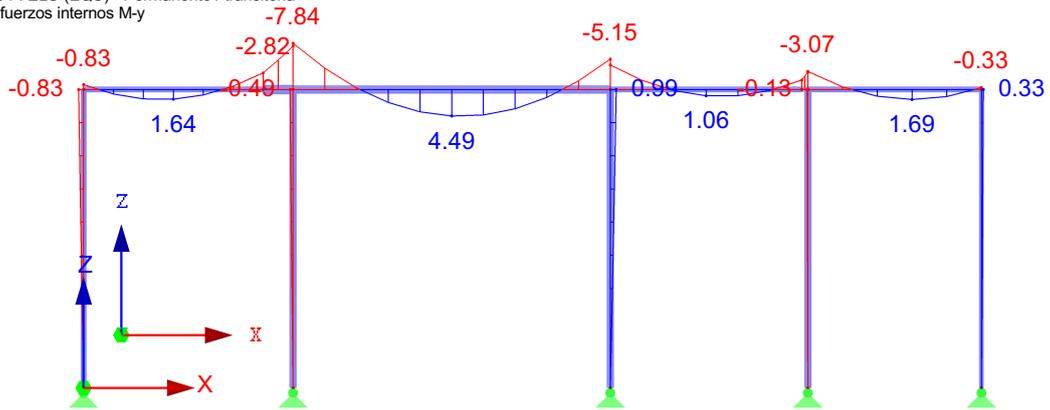


Figura 92 Diagrama My del caso 3 obtenido mediante Karamba 3D.

CO1 : ELU (EQU) - Permanente / transitoria
Esfuerzos internos M-y

En dirección Y



Máx. M-y: 4.49, Mín. M-y: -7.84 [kNm]

Figura 93 Diagrama My del caso 3 obtenido mediante RFEM.

- Nx (kN)

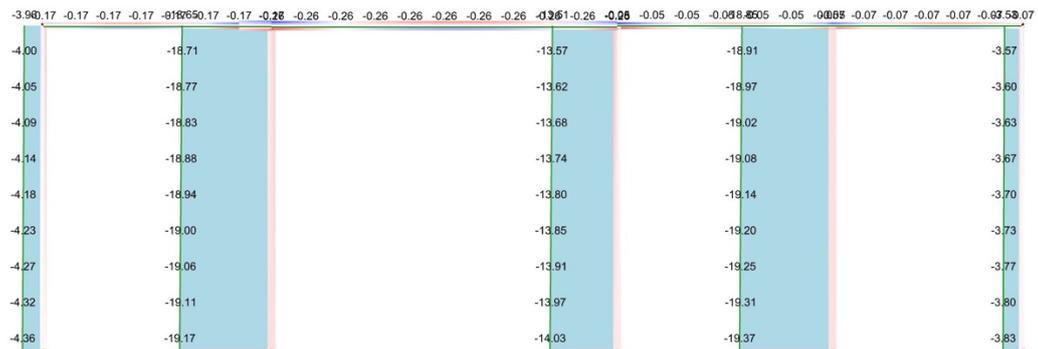
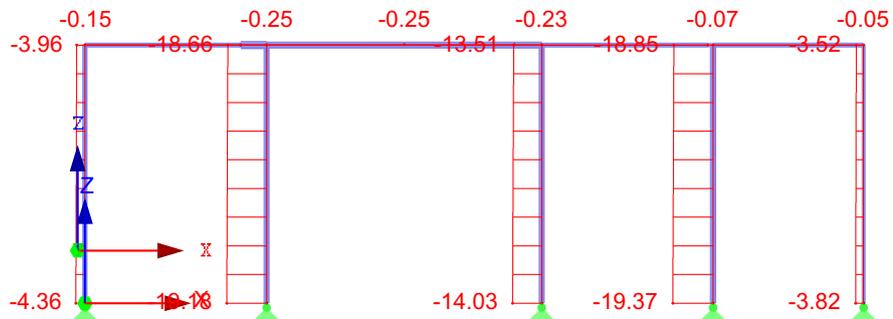


Figura 94 Diagrama Nx del caso 3 obtenido mediante Karamba 3D.

CO1 : ELU (EQU) - Permanente / transitoria
Esfuerzos internos N

En dirección Y



Máx. N: -0.04, Mín. N: -19.37 [kN]

Figura 95 Diagrama Nx del caso 3 obtenido mediante RFEM.

- Vz (kN)

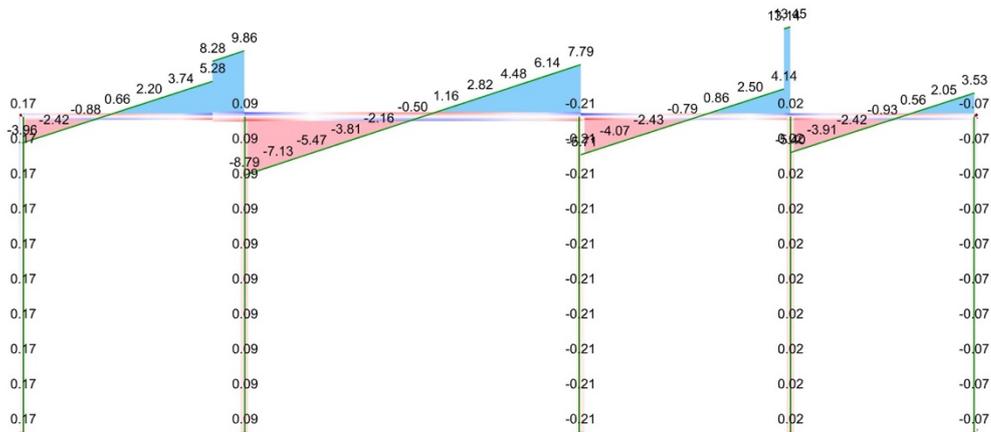
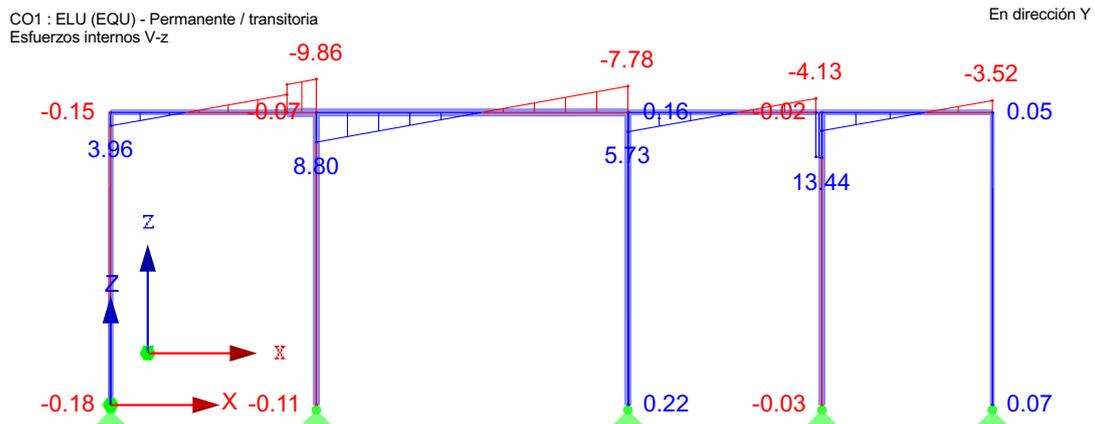


Figura 96 Diagrama Vz del caso 3 obtenido mediante Karamba 3D.



Máx. V-z: 13.44, Mín. V-z: -9.86 [kN]

Figura 97 Diagrama Vz del caso 3 obtenido mediante RFEM.

Para finalizar compararemos las tensiones máximas y mínimas del modelo

	Karamba 3D	RFEM
σ_x max [kN/cm ²]	12,092	12,12
σ_x min [kN/cm ²]	-12,102	-12,14
τ max [kN/cm ²]	3,476	3,78

Las tensiones tienen valores parecidos, pero difieren ligeramente esto puede ser debido a los diferentes métodos de cálculo que utilizan los dos programas y/o discretización de la malla MEF.

5 Conclusiones

La metodología obtenida para el uso integrado de simulaciones MEF en las fases preliminares del diseño estructural es factible con el uso de las herramientas adecuadas. En el caso que nos ocupa el uso combinado de distintos plugins dentro del entorno de Grasshopper de Rhinoceros (Karamba y Galapagos) ha permitido agilizar enormemente el proceso de diseño, obteniendo formas estructurales optimizadas a los condicionantes geométricos y resistentes.

Gracias a la metodología planteada podemos realizar modelos complejos en poco tiempo comparado con otros programas de elementos finitos convencionales como RFEM, SAP, CYPE, etc. La principal diferencia radica en la forma de definir la geometría que en lugar de hacerlo en un entorno gráfico habitual, se realiza una parametrización utilizando Grasshopper, lo cual supone un cambio conceptual en la forma de “dibujar” la estructura. Por tanto, inicialmente supone un esfuerzo de adaptación al entorno, que se ve ampliamente compensado por los resultados y agilidad en los cambios posteriores de la estructura.

Los resultados MEF obtenidos en el entorno de Rhinoceros (Karamba 3D) se han comparado con los valores obtenidos por RFEM obteniéndose valores de esfuerzos prácticamente idénticos, las tensiones difieren un poco, lo cual se puede deber a diferencias en la discretización interna de las mallas y la aproximación elemental que realiza cada uno de los programas. Lo cual permite utilizar Karamba para predimensionar la estructura y finalmente pasar la geometría final obtenida a RFEM, donde se realizará el análisis exhaustivo de la estructura, incluyendo efectos de segundo orden, pandeo, análisis de estabilidad, etc. y de acuerdo a la normativa vigente (Eurocodigo, CTE, ...)

También para la optimización con Galapagos se obtienen resultados coherentes al comprobar con el caso 2 y la solución analítica para su optimización se obtienen resultados idénticos. En el caso de modelos más complejos puede dar algún error, aunque es poco común, debido a que si por casualidad encuentra una solución óptima en los primeros instantes de la optimización Galapagos bombardea esta solución y los puntos alrededor de esta, dejando de analizar otras posibles soluciones óptimas.

En resumen, Karamba 3D es un programa idóneo para la fase inicial de diseño o predimensionado de una estructura, permite realizar el modelo más rápido que con otro programa de elementos finitos y además también nos permite optimizar parámetros como la posición de pilares y posición de apoyos como se ha desarrollado en este trabajo en función de minimizar o maximizar el parámetro que se desee obteniendo resultados coherentes.

Además, Karamba 3D permite exportar el modelo completo a otro programa de análisis estructural como por ejemplo RFEM, de esta manera se combina una rápida obtención de la estructura junto con resultados y optimizaciones con las que hacerse una primera idea de esta con la fiabilidad de los resultados que se pueden obtener con RFEM

haciendo uso del código técnico y aspectos de cálculo más avanzados (análisis de estabilidad, cálculo en teoría de 2º orden, ...).

6 Bibliografía

- [1] Preisinger, C. (2013), *Linking Structure and Parametric Geometry*. Architectural Design, 83: 110-113 DOI: 10.1002/ad.1564.
- [2] Karamba 3D <https://www.karamba3d.com/>
- [3] Karamba 3D, User manual 1.3.3, <https://manual.karamba3d.com/>
- [4] Rhinoceros, Features, <https://www.rhino3d.com/features/>
- [5] MacNeel Miami, About SudoHopper, <https://www.mcneelmiami.com/about>
- [6] Logo Grasshopper https://i.vimeocdn.com/portfolio_header/152561_740



Universidad
Zaragoza

Anexos

Simulación MEF en entornos de diseño paramétrico. Aplicación al diseño estructural

Finite Element Analysis in parametric design environments. Application to structural design

Autor

Guillermo Pinilla Gómez

Director

Sergio Puértolas Broto

Titulación del autor

Grado en Ingeniería Mecánica

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2021

1 Anexos

1.1 Anexo 1. Modelado guiado.

1.1.1 Primeros pasos.

Para comenzar a desarrollar los casos propuestos se debe abrir Rhinoceros 7 y llamar al módulo Grasshopper donde se definirá la geometría y el modelo MEF utilizando la pestaña Karamba 3D.

Para ello o bien accedemos desde herramientas o desde la pestaña de comandos como se indica en la figura.

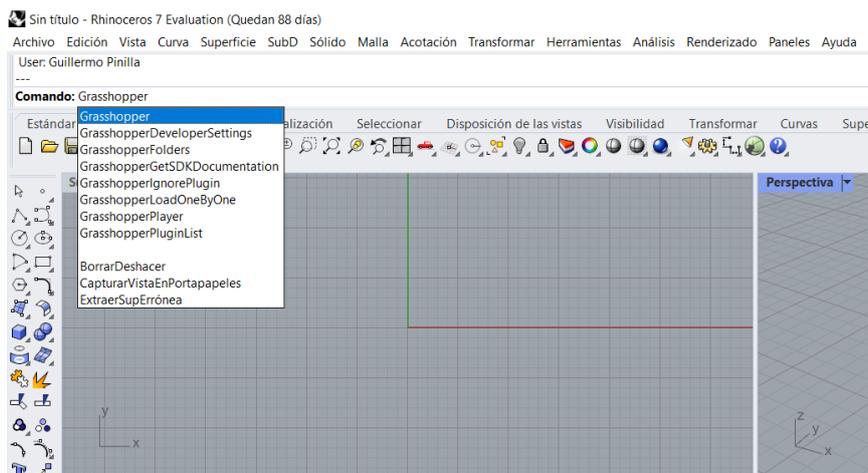


Figura 98 Acceso a Grasshopper desde barra de comandos.

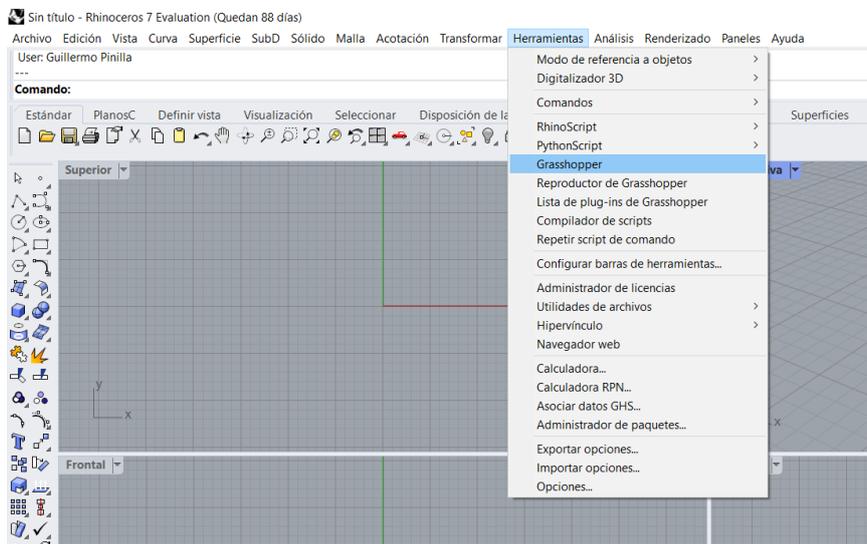


Figura 99 Acceso a Grasshopper desde herramientas.

Una vez ejecutado Grasshopper aparece la siguiente ventana donde se trabajará para el desarrollo de los casos.

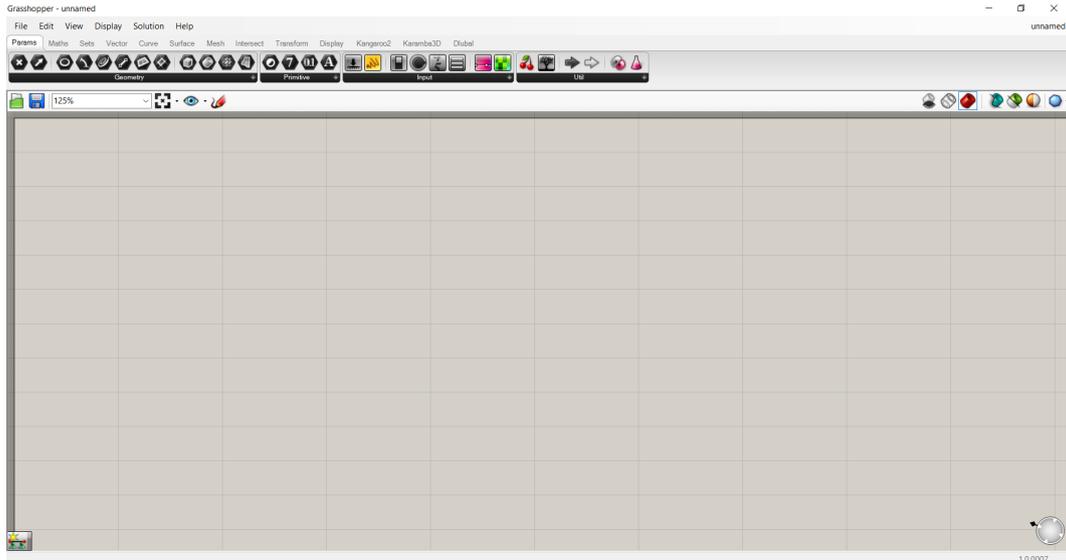


Figura 100 Ventana de Grasshopper.

Se recomienda disponer la pantalla en dos una para la en la parte izquierda se dispondrá la ventana de Rhino y en la derecha la ventana de Grasshopper. Con Grasshopper desarrollaremos el script de cada caso y con Rhino observaremos los resultados y en alguna ocasión se creará algún elemento de la geometría.

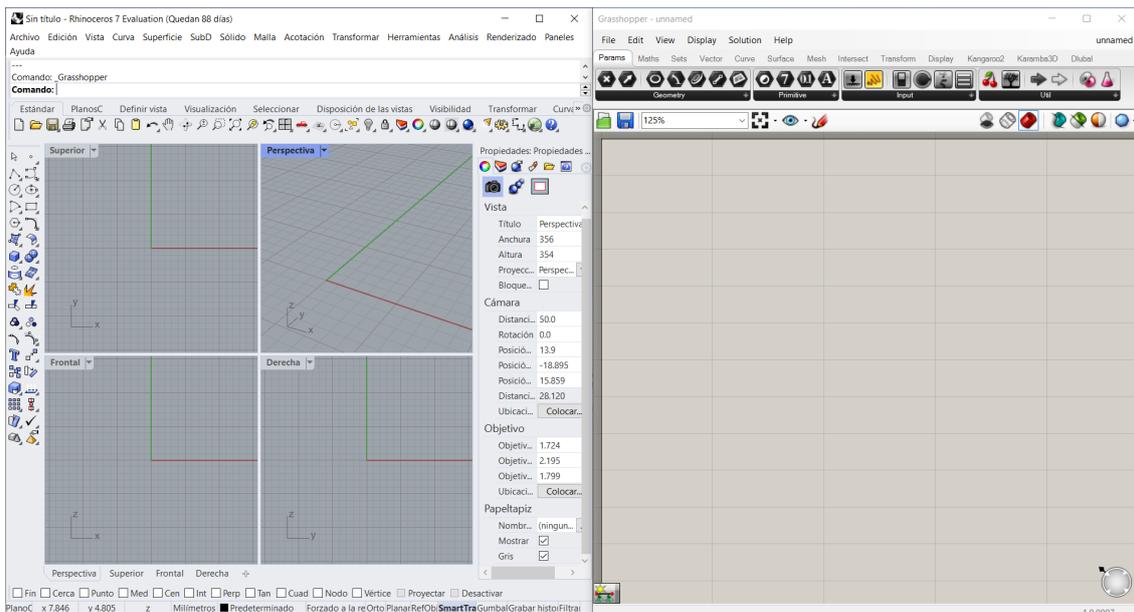


Figura 101 Ventanas de Rhinoceros y Grasshopper.

En la ventana de visualización de Rhino por defecto se muestran cuatro vistas del modelo a la vez, se recomienda maximizar una de las vistas para ver mejor el modelo que se desarrolla para ello hacemos click con el botón derecho sobre Perspectiva y se selecciona Maximizar o haciendo doble click con el botón izquierdo sobre Perspectiva. En la parte inferior izquierda se encuentran las vistas disponibles y haciendo click con el botón izquierdo sobre cualquiera de ellas se puede acceder a cada una de ellas.

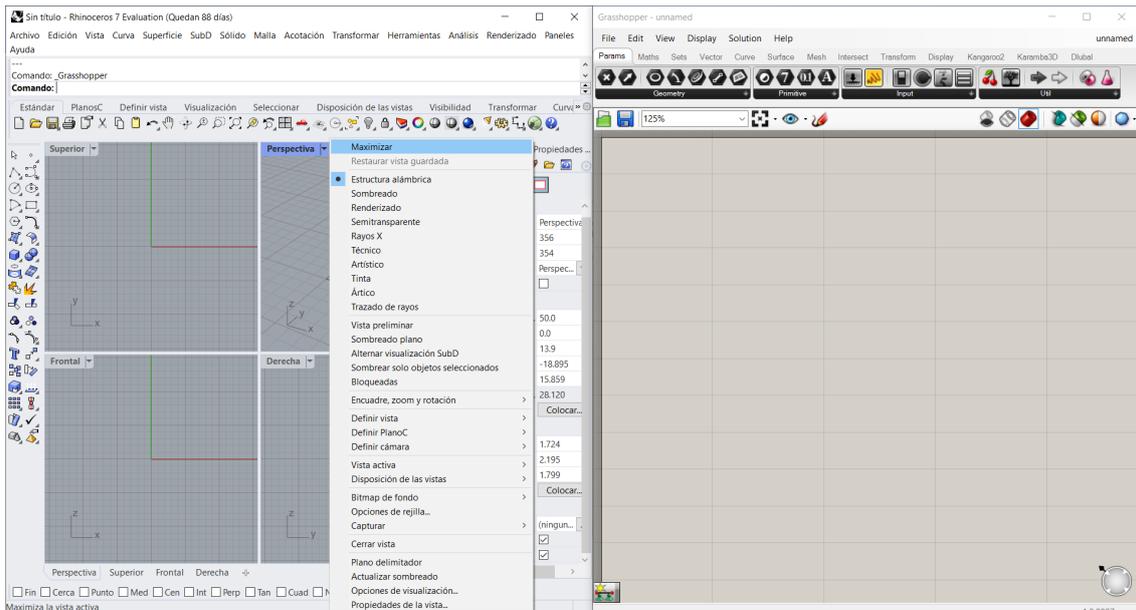


Figura 102 Ampliación de una de las vistas de la ventana de Rhinoceros.

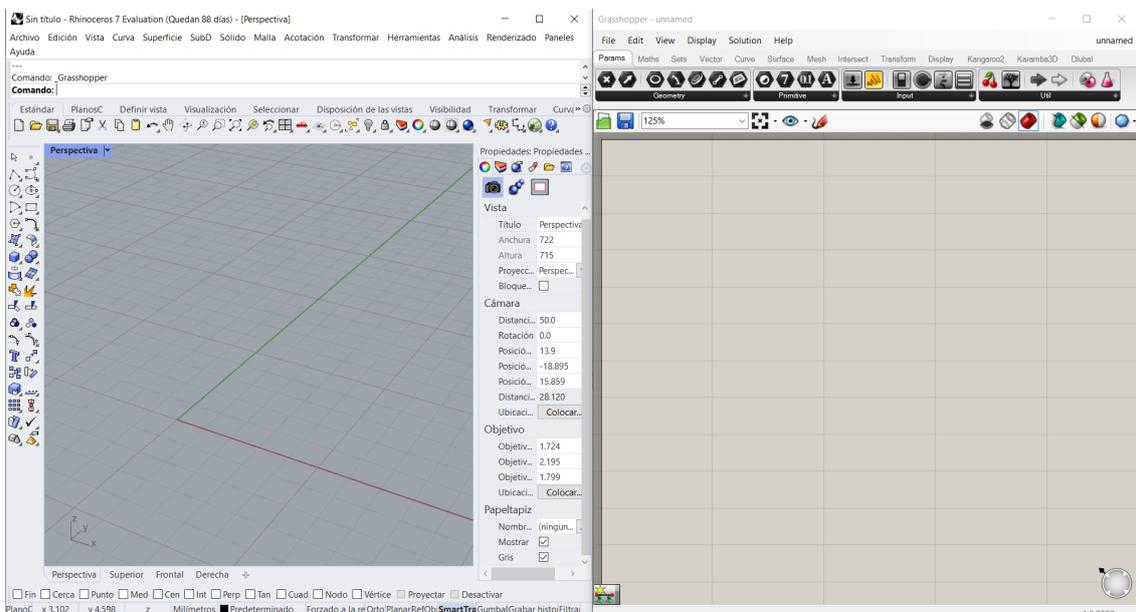


Figura 103 Ventana de Rhinoceros con la vista Perspectiva ampliada y ventana de Grasshopper.

1.1.2 Funciones del ratón y teclas

Con el botón izquierdo se selecciona cualquier módulo de Grasshopper o Karamba 3D, con el botón derecho del ratón se abren las opciones. Para crear conexiones mediante cables se hace click con el botón izquierdo y sin soltar se lleva hasta donde se quiere que se lleve la conexión. Con la tecla Control y creando el camino entre dos puntos conectados podemos eliminar un cable (conexión).

Con la tecla Shift y conectando dos puntos mediante un cable se puede añadir mas de una conexión a una entrada de algún modulo ya que por defecto solo permite una conexión por defecto.

Con el scroll se puede ampliar o disminuir la ventana de visualización tanto de Grasshopper como de Rhino. Además, en la ventana de visualización de Rhino en la vista de Perspectiva con el botón derecho del ratón se puede rotar la perspectiva.

1.1.3 Entorno de trabajo

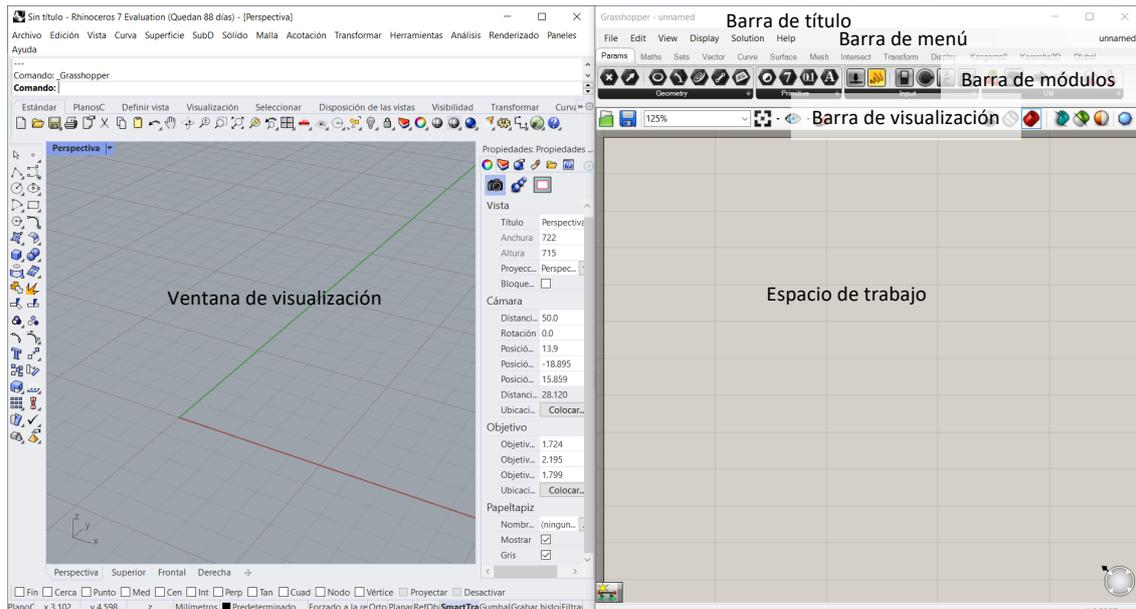


Figura 104 Entorno de trabajo.

En la ventana de visualización se observa la geometría que se va creando y los resultados cuando el script está completamente desarrollado.

En espacio de trabajo se realiza el script del modelo que se quiera analizar, con sus diferentes módulos y conexiones.

En la barra de módulos se tiene los diferentes módulos disponibles para la formación del script.

En la barra de visualización se tienen opciones básicas de visualización y un icono para guardar el archivo y otro para abrir documentos.

1.1.4 Creación de archivos y búsqueda de módulos.

Para seleccionar un módulo o bien se accede desde a el desde la barra de módulos o bien se busca con el buscador de módulos que aparece al hacer doble click con el botón izquierdo del ratón sobre el espacio de trabajo.

Por ejemplo, para seleccionar el módulo Loads (Karamba3D) o bien se localiza en la barra de módulos como se muestra en la figura o bien se busca con el buscador como se muestra en la figura. Se recomienda usar el buscador debido a que si no se tiene gran experiencia con el programa es difícil saber dónde se encuentran ubicados los módulos en la barra de módulos.

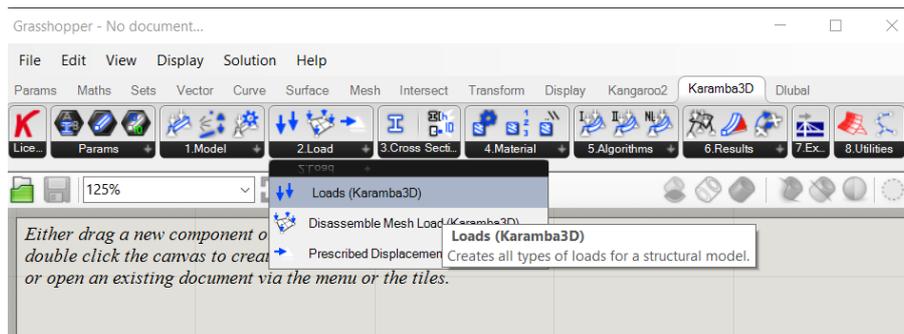


Figura 105 Acceso a módulo Loads desde barra de módulos.

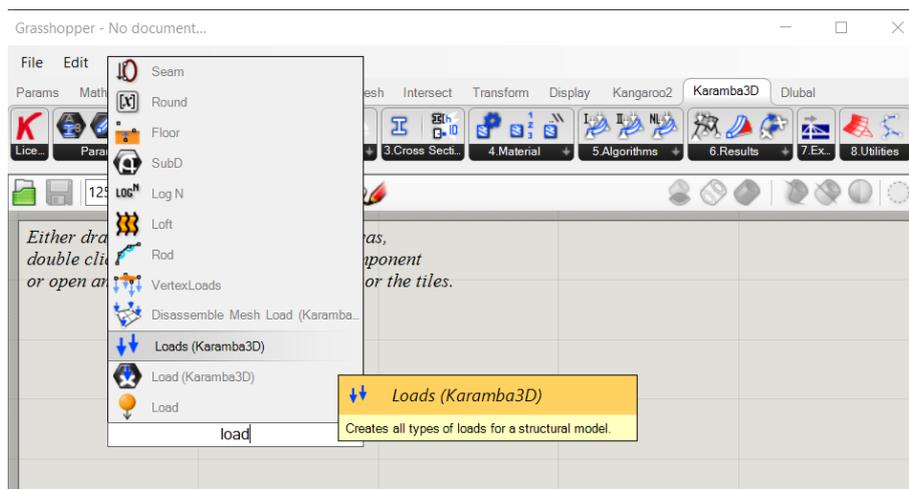


Figura 106 Acceso a módulo Loads desde buscador.

Para crear un documento nuevo y comenzar a desarrollar el modelo se hace click en File de la barra de menú y seguidamente en New Document. Posteriormente al guardar por primera vez se podrá seleccionar la ubicación y el nombre del archivo como en cualquier archivo de Windows.

Si la geometría no depende de elementos generados en Rhino solo será necesario guardar el archivo de Grasshopper.

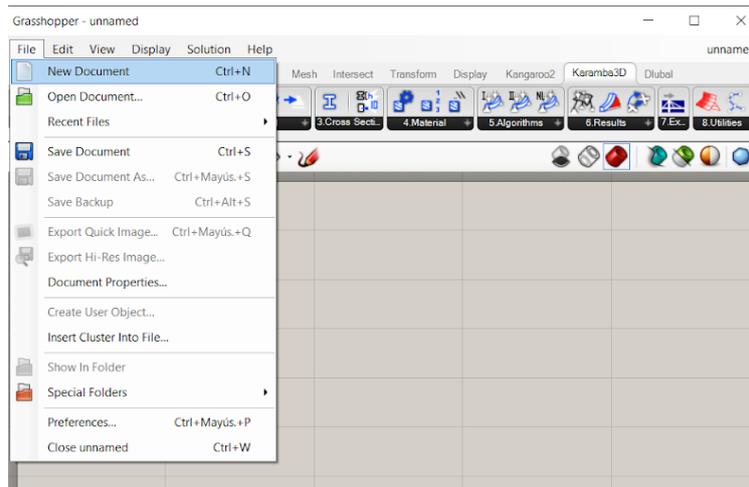


Figura 107 Creación de un documento nuevo.

1.1.5 Caso 1.

Como se desarrolló en la memoria se debe empezar por definir la geometría del modelo. Para ello se parte del punto origen (0,0,0) para ello utilizamos el modulo Point (Pt), se hace click sobre este con el botón derecho del ratón para desplegar las opciones del módulo y se hace click sobre Set one Point. En la ventana de comandos de Rhino nos pedirá que introduzcamos las coordenadas del punto en cuestión, una vez introducidas el punto origen quedara definido.

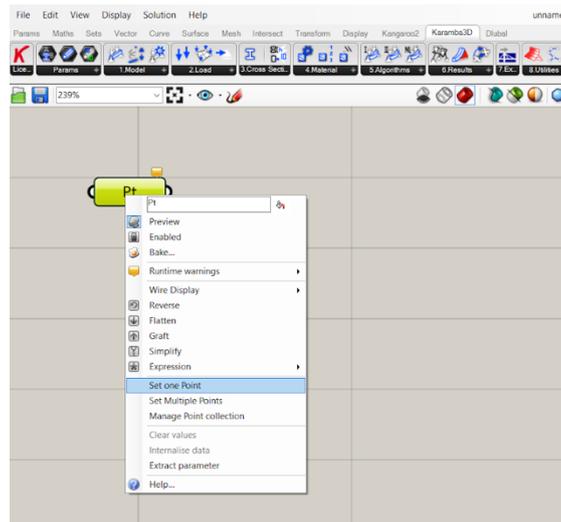


Figura 108 Creación del punto origen del caso 1.

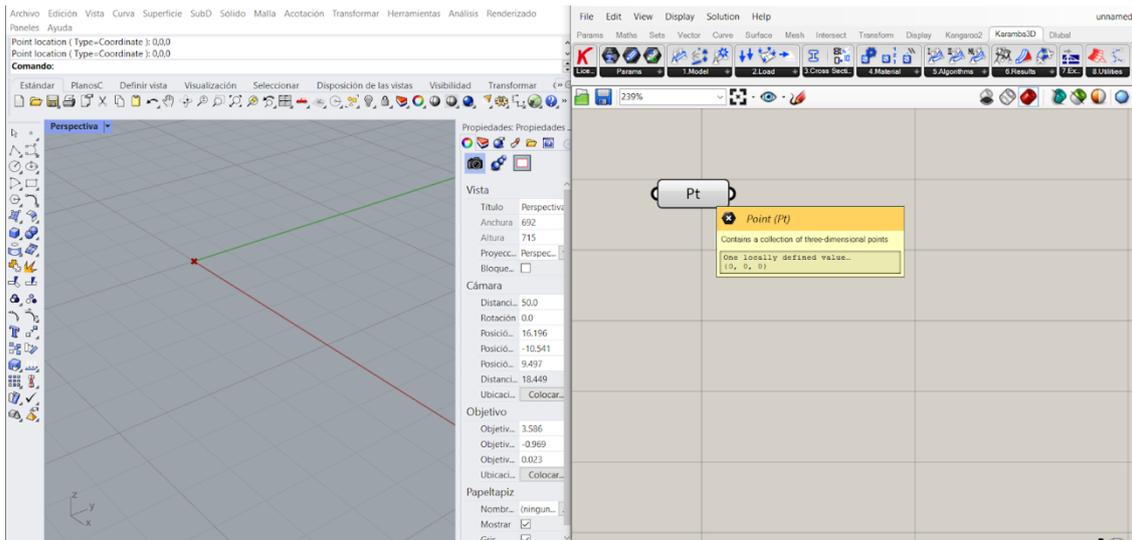


Figura 109 Introducción de coordenadas del punto origen.

A continuación, se deben crear los otros cuatro puntos que forman parte de la geometría. Para empezar, se comienza con los puntos $(0,0,4)$ y $(6,0,0)$, para ello se usa los módulos Number Slider, Unit X (X), Unit Z (Z) y el módulo Move. En el módulo Move introducimos la geometría base el punto origen y el vector de traslación que se consigue con el módulo Number Slider y Unit x en el caso del punto $(6,0,0)$ y Unit Z (Z) en el caso del punto $(0,0,4)$. Conectando estos módulos se obtienen los puntos que se querían como se puede ver en la figura.

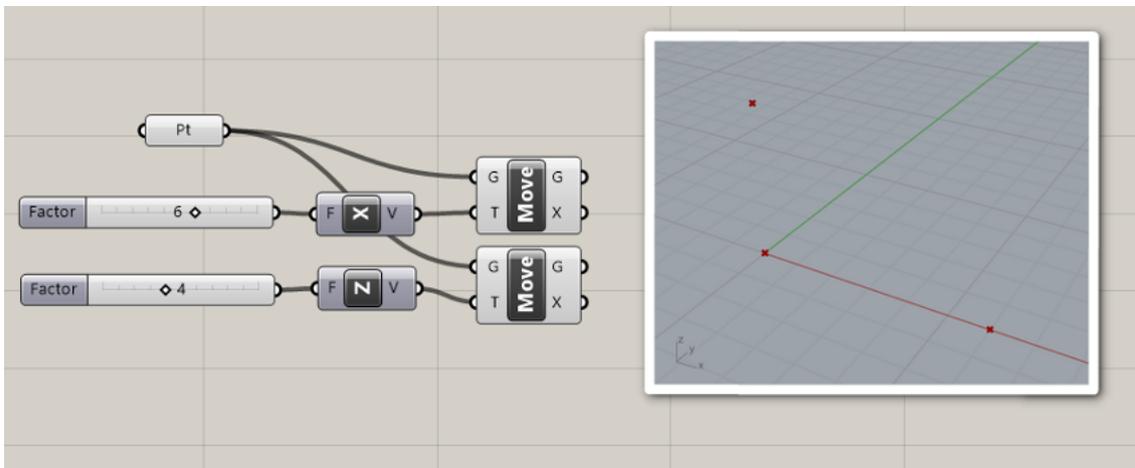


Figura 110 Creación del punto $(0,0,4)$ y $(6,0,0)$.

Se procede de la misma forma para crear el punto $(6,0,4)$, pero en este caso la geometría base será el punto $(6,0,0)$.

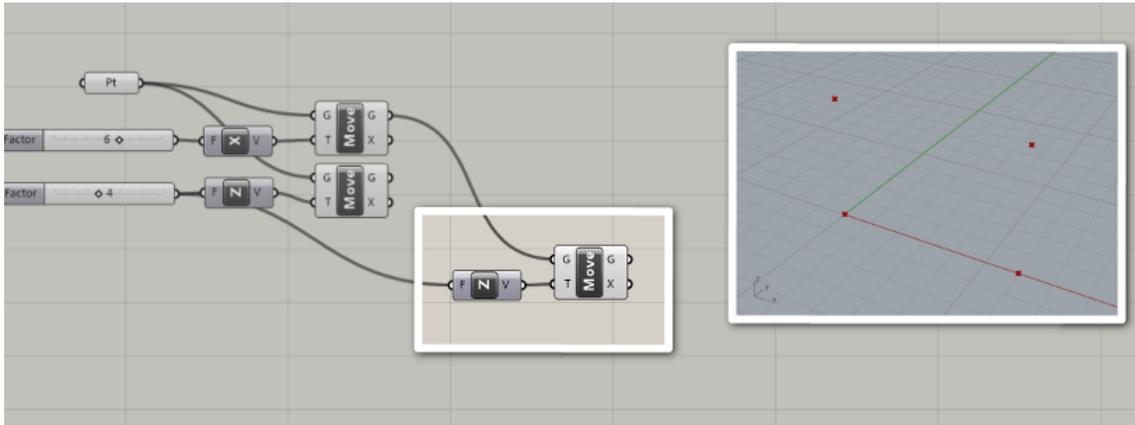


Figura 111 Creación del punto (6,0,4).

Para el punto de la cumbrera hay que hacer un pequeño script para que la altura de esta dependa del ángulo de la cubierta. Se usarán los módulos Number Slider, Radians (Rad), Tangent (Tan), Multiplication (A x B), Vector XYZ (Vec) y Move.

Para ello se introduce un Number Slider con valor la pendiente, 15 grados, se pasa a radianes con Radians y seguidamente se calcula la tangente de este ángulo y se multiplica por la mitad de la longitud del pórtico, resultante de la relación trigonométrica se obtiene así lo que sube el punto cumbrera en Z con respecto al punto (4,0,0), que actúa de geometría base en el Move. También en el vector traslación hay que añadir lo que se desplaza en X que se corresponde con la mitad de la longitud del pórtico. Con el módulo Vector XYZ se consigue el vector de traslación que se buscaba que introducido junto con el punto base en el módulo Move se obtiene el punto deseado.

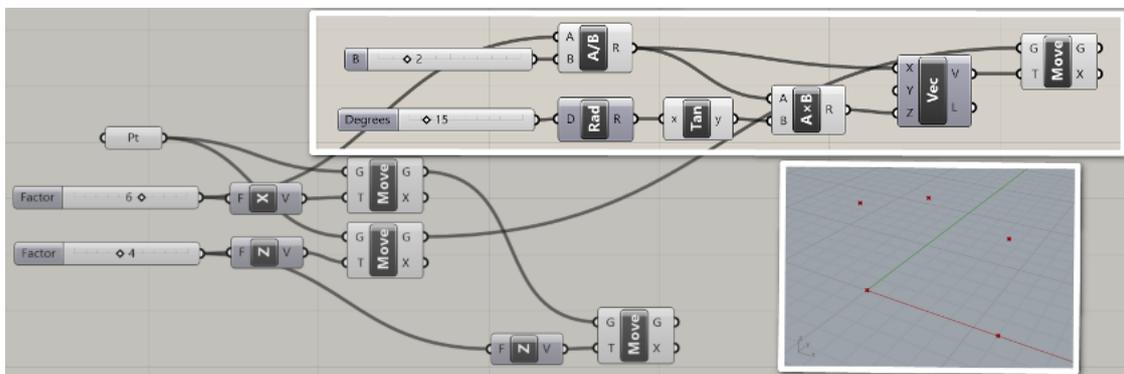


Figura 112 Creación del punto de la cumbrera.

Una vez se tienen los puntos creados, para finalizar la formación de la geometría solo falta unir los puntos mediante líneas. Para ello se usa el módulo Line (Ln), se van conectando los puntos inicial y final de cada línea y se consigue la geometría deseada preparada para su posterior uso. Hay que tener mucho cuidado con introducir los puntos en el orden correcto para no obtener líneas no deseadas. Si se desea se pueden usar varios módulos Line para que sea mas sencillo o para separar pilares de vigas.

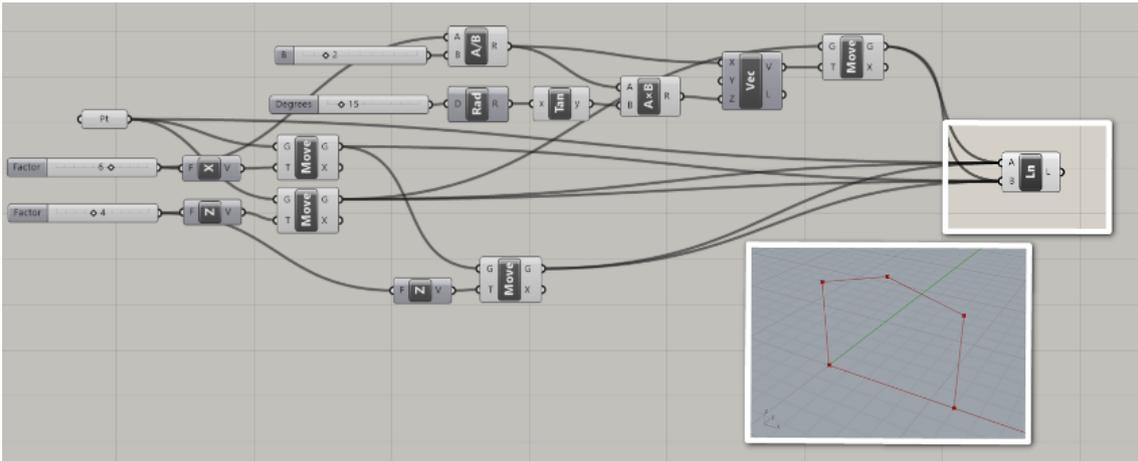


Figura 113 Creación de las líneas de la geometría.

A continuación, se pasa a la creación de elementos y selección de material y secciones. Se comienza creando las barras a partir de las líneas para ello se utiliza el módulo Line To Beam (LineToBeam) basta con conectar las líneas creadas con este.

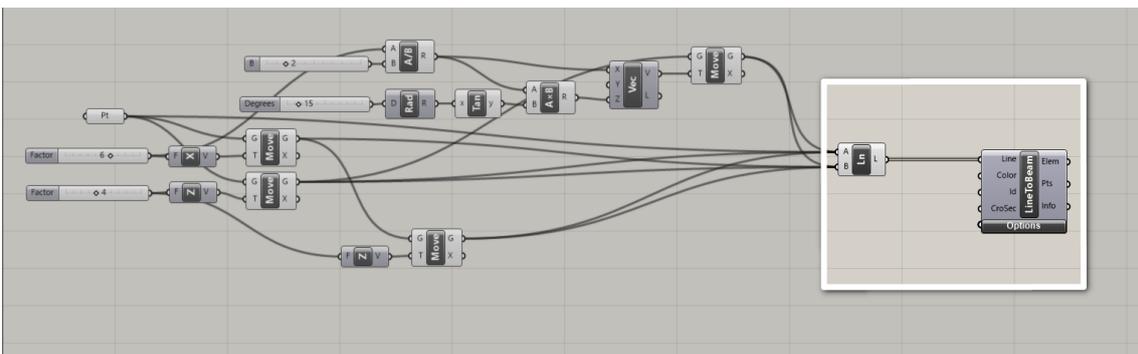


Figura 114 Creación de barras del caso 1.

Después se deben definir los apoyos mediante el módulo Support (Supp). También para que quede más claro se usara el módulo Merge con el que se unirán los dos puntos que son apoyos, (0,0,0) y (6,0,0). Para definir los apoyos se conectan estos puntos a Support y se seleccionan las traslaciones y rotaciones que se quieren que estén impedidas (Tx, Ty, Tz y Rx).

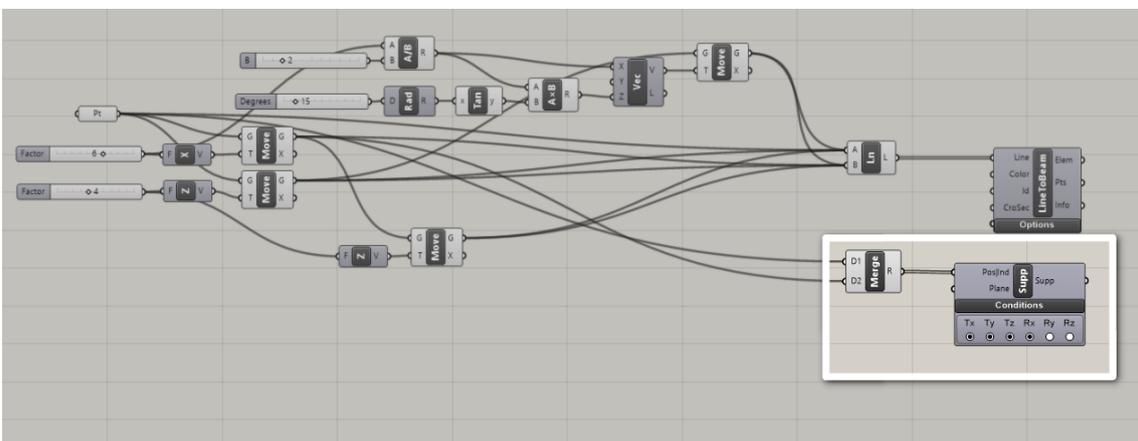


Figura 115 Creación de apoyos del caso 1.

Seguidamente se procede a definir las cargas para ello se utilizará el módulo Loads. Para empezar, se define la carga gravitatoria para ello basta con seleccionar en el desplegable Type of Load la opción Gravity ya que por defecto esta esta orienta en el sentido negativo del eje Z.

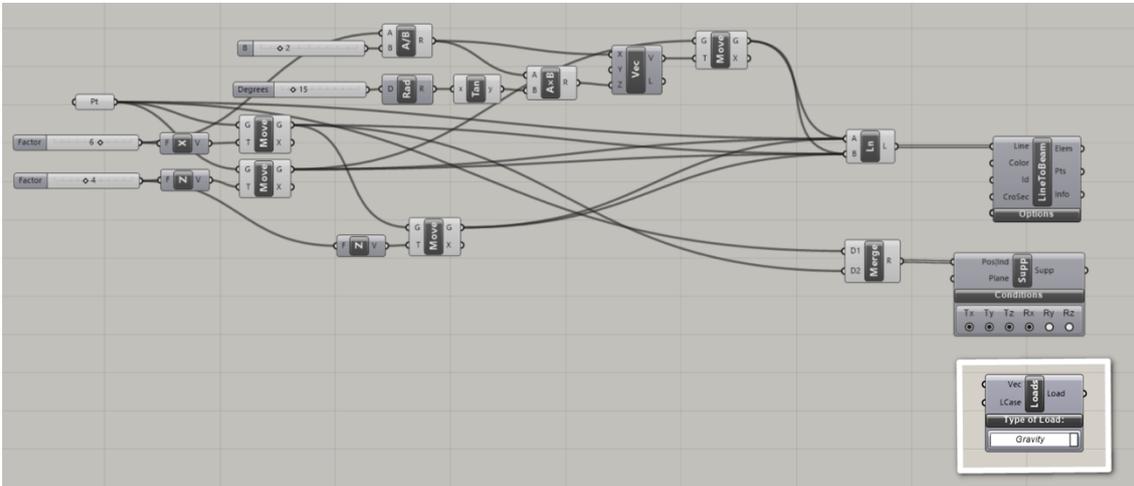


Figura 116 Creación de la carga de gravedad del caso 1.

Para definir las cargas puntuales se usará el módulo Loads, Unit X (X), Merge, List Item (Item) y Number Slider. Lo primero que se debe hacer es seleccionar la opción Point en el desplegable Type of Load. Se tiene que introducir la posición y el vector fuerza, para obtener la posición se unen todos los puntos con Merge y a través de List Item, que permite extraer elementos de una lista, y un Number Slider de valor 3, que permite elegir el elemento que se quiere de la lista creada con Merge, se consigue la posición que se buscaba (6,0,4). Para obtener el vector fuerza que es (-1,0,0) se utiliza un Number Slider de valor -1 y Unit X con el que se consigue el vector. Para la posición, también es posible introducir las coordenadas directamente, pero de esta forma se puede ver los diferentes efectos que tiene la carga en los diferentes puntos del modelo de forma sencilla.

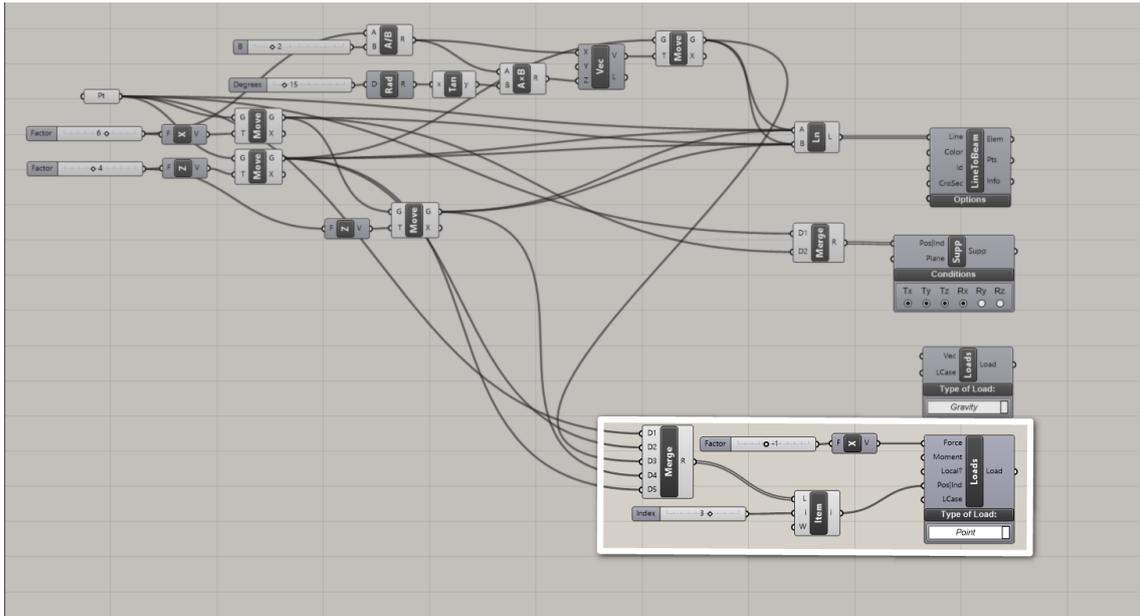


Figura 117 Creación de cargas puntuales del caso 1.

Para definir la carga uniforme lineal se usarán los módulos Loads, Number Slider y Unit Z (Z). Lo primero que se debe hacer es seleccionar Uniform Line en el desplegable de Type of Load del módulo Loads. Seguidamente se define el vector de la carga distribuida con un Number Slider de valor -2 y Unit Z y posteriormente se conecta un Number Slider a la entrada de BeamIds del módulo Loads para poder seleccionar la barra a la que se le aplica en este caso se corresponde con la barra número 0.

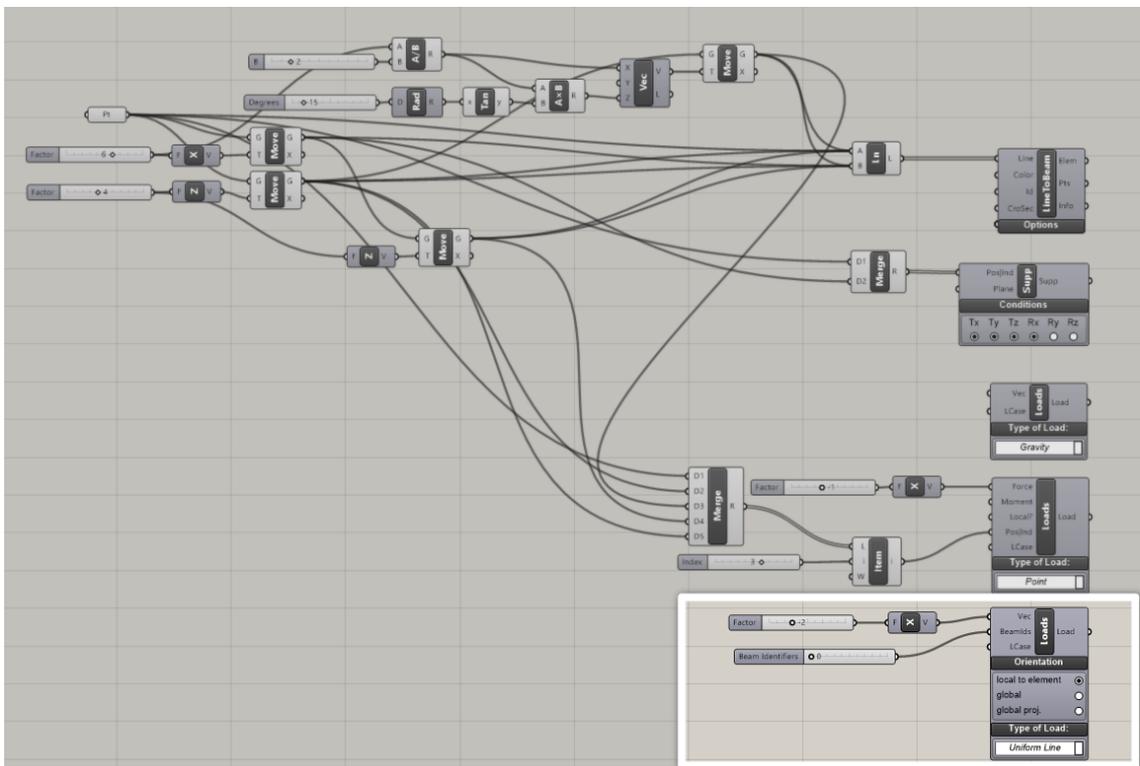


Figura 118 Creación de la carga uniforme lineal del caso 1.

Para la selección del material se usa el módulo Material Selection (MatSelect), para seleccionar el material de este caso que es el acero S235 basta con seleccionar en la pestaña de Family Steel y en la pestaña de Name S235.

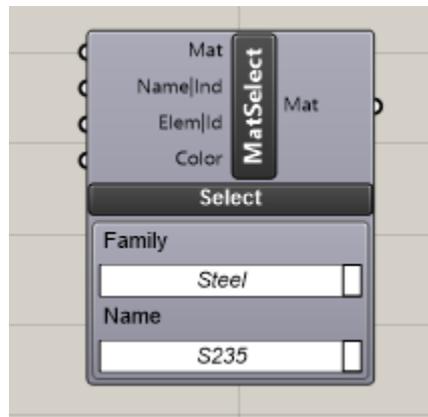


Figura 119 Selección del material del caso 1.

Para la selección de las secciones se usará el módulo Cross Section Selector (CroSecSelect). Se quieren los perfiles de la serie IPE que se corresponden con los valores del 0 al 17 de la biblioteca de Karamba, para seleccionar estos valores se crea una serie de números con el módulo Series y se introduce en el módulo Cross Section Selector en la entrada Name/Ids de esta manera se seleccionan los 18 perfiles de la serie IPE.

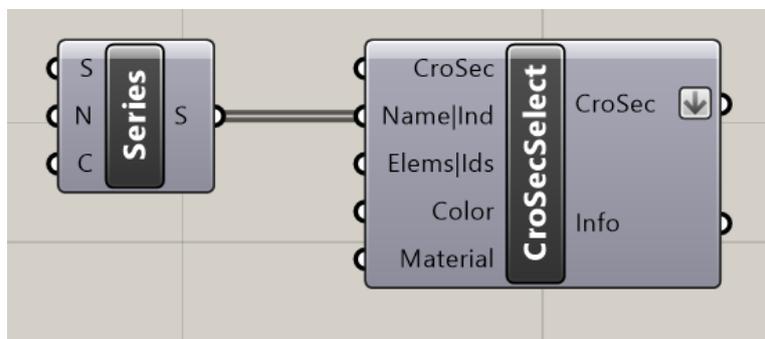


Figura 120 Selección de las secciones del caso 1.

Para crear la serie se debe hacer click con el botón derecho sobre la entrada Count (C) del módulo Series y se selecciona Set Integer donde se introduce el valor 18.

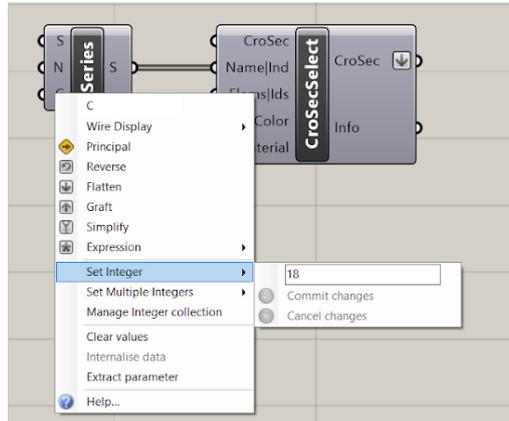


Figura 121 Creación de la serie de selección de secciones del caso 1.

Una vez creados los elementos y seleccionados el material y las secciones se procede a ensamblar el modelo y optimizar las secciones. Para ensamblar el modelo se usará el módulo Assemble Model (Assemble), basta con conectar las barras, apoyos, cargas, material y secciones.

Para que las cargas estén en un mismo caso de cargas se debe activar el Flatten en la entrada Load con la que se consigue que todos los parámetros introducidos estén en una única lista. De lo contrario el programa crearía un caso de carga para cada tipo de carga que se introduzca en el módulo.

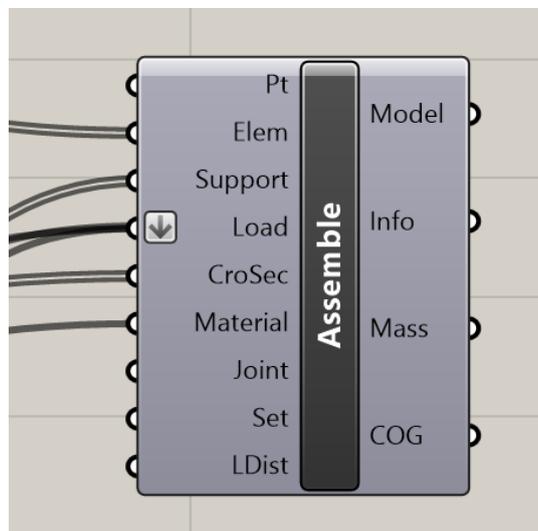


Figura 122 Ensamblaje del modelo del caso 1.

Seguidamente se procede a optimizar las secciones del modelo para ello se usa el módulo Optimize Cross Section (OptiCroSec). En el se introduce el modelo creado con Assemble, las secciones creadas y la condición de máximo desplazamiento.

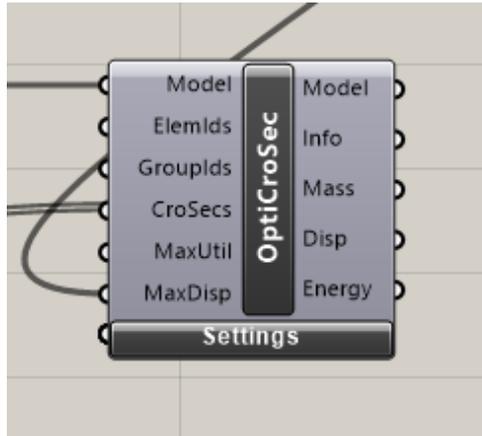


Figura 123 Optimización de las secciones del caso 1.

Para crear la condición de máximo desplazamiento $\frac{d}{300}$ [m], hay que saber cual es la barra mas larga del modelo. Para su obtención se usarán los módulos Length (Len), Sort List (Sort), List Item (Item), Division (A/B) y Number Slider.

Primero se hace pasar las líneas que creamos en la geometría por Length, donde obtenemos la longitud de estas, seguidamente se conectan a Sort List donde se ordena la lista de menor a mayor, como se quiere obtener el mayor valor en la salida de este módulo se activa Reverse, a continuación, se introduce esta lista ordenada en List Item que por defecto selecciona el primer valor de la lista (el mayor).

Finalmente se utiliza Division para dividir la longitud de la barra más larga entre 300 como se en el módulo Optimize Cross Section se debe introducir la condición en cm, por ello utilizamos un Number Slider entre 3 en vez de entre 300.

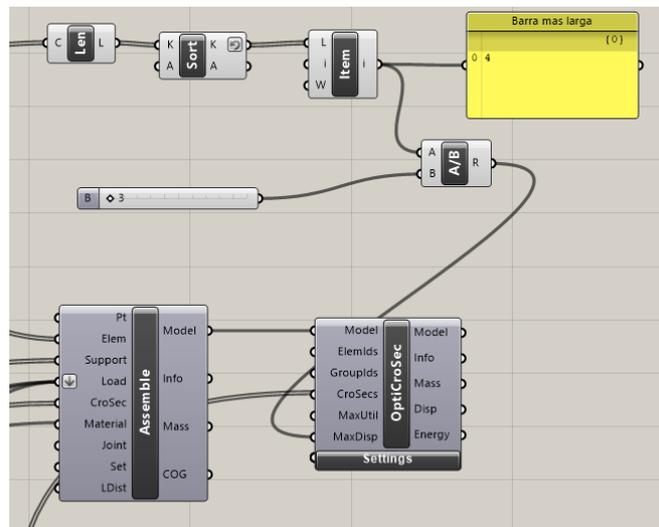


Figura 124 Creación de la condición de desplazamiento para la optimización de las secciones del caso 1.

En esta parte se consigue ver el modelo y barras renderizadas y se permite visualizar diferentes resultados con valores numéricos y con leyendas de colores.

Para visualizar el modelo se hace pasar el modelo por el módulo Model View (ModelView) con el que se ven todos los elementos del modelo como cargas, nodos apoyos, deformación del modelo y barras sin renderizar.

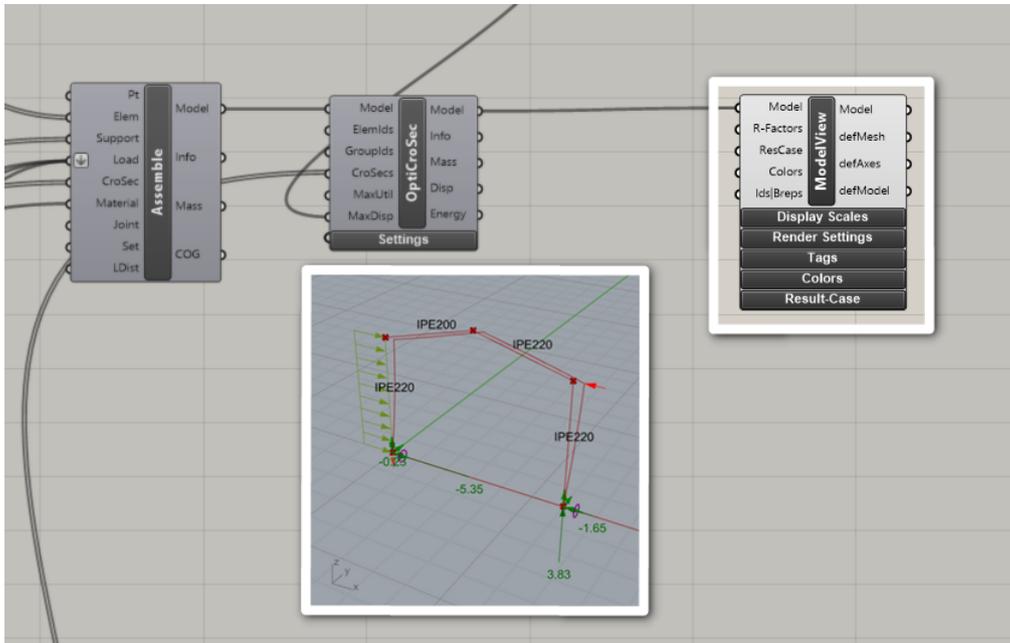


Figura 125 Visualización del modelo del caso 1.

A continuación, se hace pasar el modelo por el módulo Beam View (BeamView) con el que se consigue la renderización de las barras con el que se incluye las fuerzas que soportan las secciones.

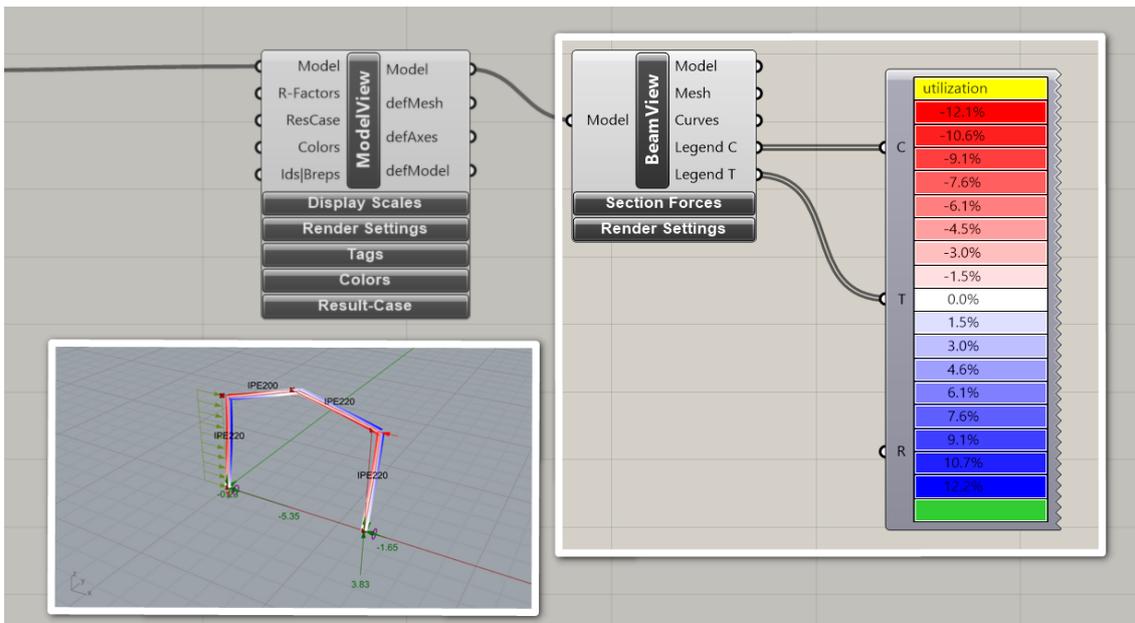


Figura 126 Renderización de las barras del caso 1.

También con el uso del módulo Beam Resultant Forces (B-Res-Force) introduciendo en el modelo se consigue los valores máximos de axil, cortante y momento que actúan sobre cada una de las barras. Con un panel se pueden observar estos valores en una lista como se ve en la figura.

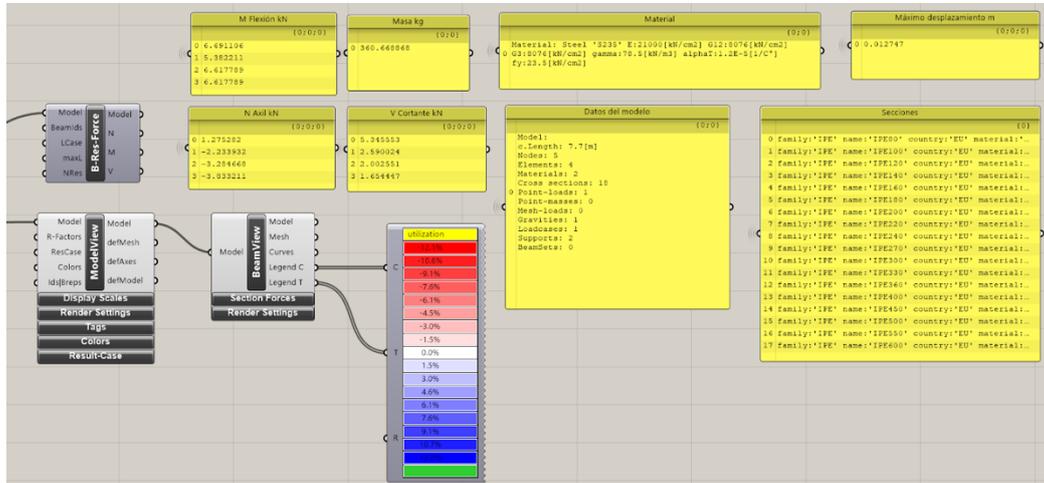


Figura 127 Visualización de resultados del caso 1.

1.1.6 Caso 2.

Como se desarrolló en la memoria se debe empezar por definir la geometría del modelo. Para ello se parte del punto origen (0,0,0) para ello utilizamos el modulo Point (Pt), se hace click sobre este con el botón derecho del ratón para desplegar las opciones del módulo y se hace click sobre Set one Point. En la ventana de comandos de Rhino nos pedirá que introduzcamos las coordenadas del punto en cuestión, una vez introducidas el punto origen quedara definido.

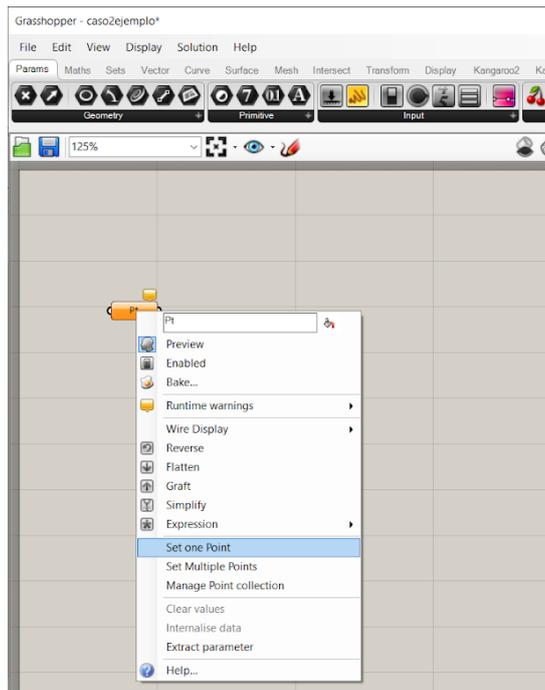


Figura 128 Creación del punto origen del caso 2.

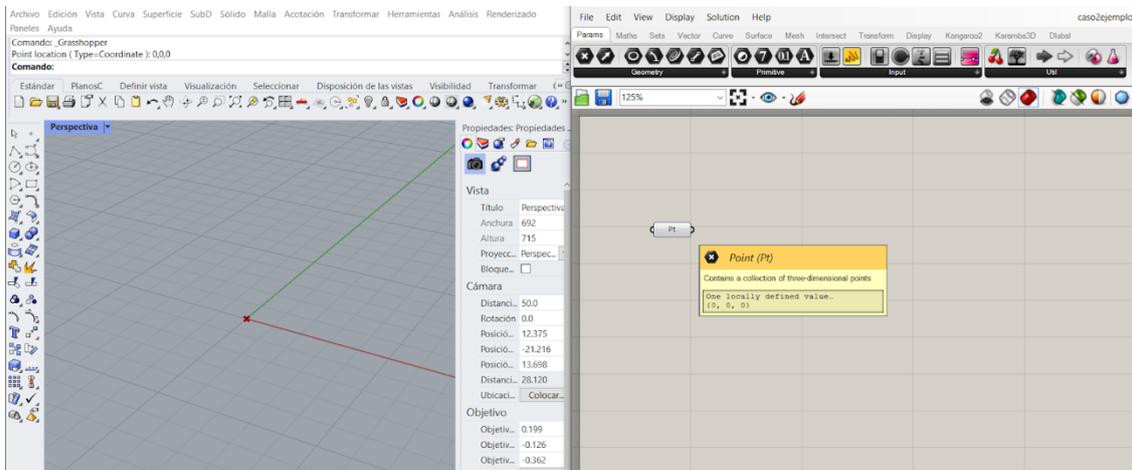


Figura 129 Introducción de coordenadas del punto origen del caso 2.

A continuación, se deben generar los otros tres puntos que forman la geometría el punto final de la barra (7,0,0) y los dos apoyos que se optimizara su posición. Para ello usamos los módulos Gene Pool (Genes), Number Slider, Unit X (X) y Move. Para el punto final se usa Move, como geometría base se tiene el punto origen y el vector de traslación se genera con un Number Slider de valor 7 y Unit X.

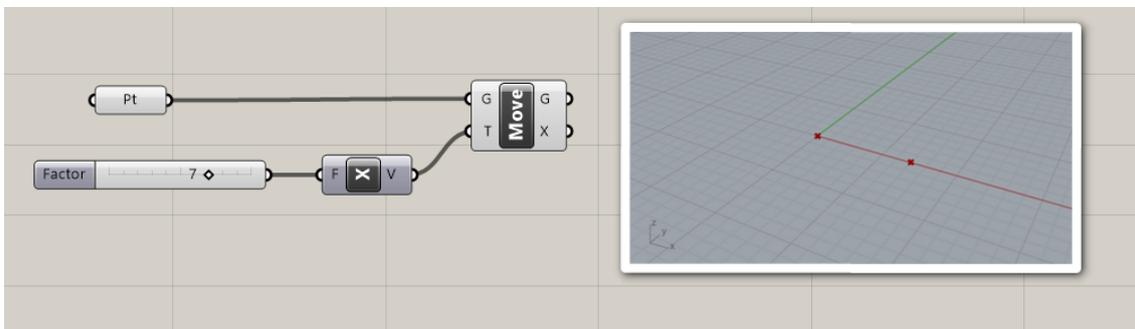


Figura 130 Creación del punto final de la barra (7,0,0) del caso 2.

Para generar los puntos de los apoyos se utiliza también Move y como geometría base el punto origen, pero los vectores de traslación se generan con Gene Pool y con Unit X. Se dan valores aleatorios para los Sliders del Gene Pool. Para usar el Gene Pool se debe configurar adaptándolo a los parámetros que necesitamos.

Haciendo doble click con el botón izquierdo del ratón sobre Gene Pool aparece su menú, en Gene Count se debe poner 2 porque se tienen dos apoyos y como mínimo y máximo se debe introducir la longitud de la barra, 0 y 7 respectivamente.

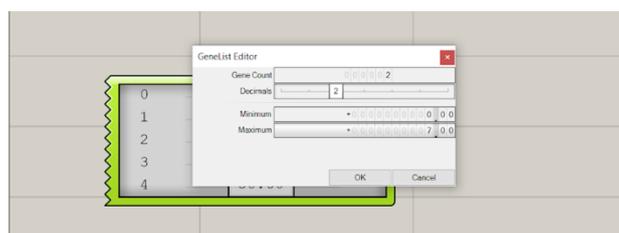


Figura 131 Configuración del Gene Pool del caso 2.

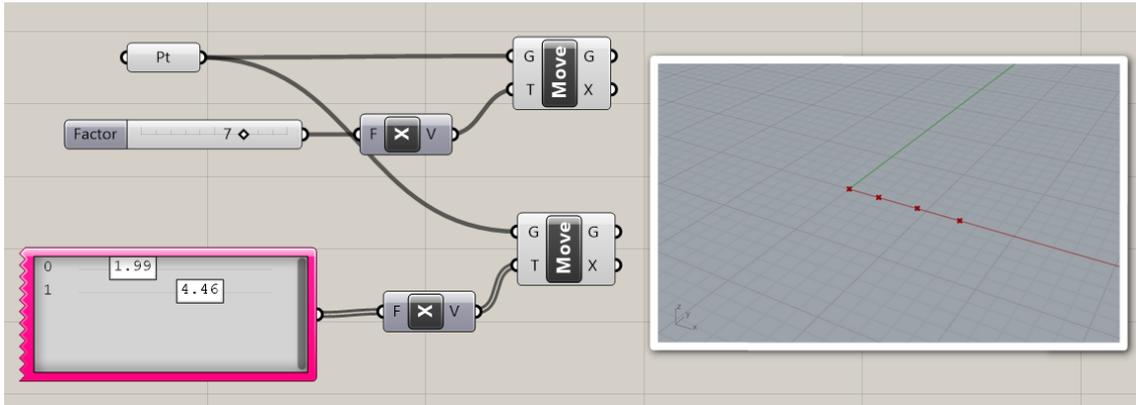


Figura 132 Creación de los puntos de los apoyos.

Una vez se tienen los puntos creados, para finalizar la formación de la geometría solo falta unir los puntos mediante líneas. Para ello se usa el módulo Line (Ln), se van conectando los puntos inicial y final de cada línea y se consigue la geometría deseada preparada para su posterior uso. Hay que tener mucho cuidado con introducir los puntos en el orden correcto para no obtener líneas no deseadas.

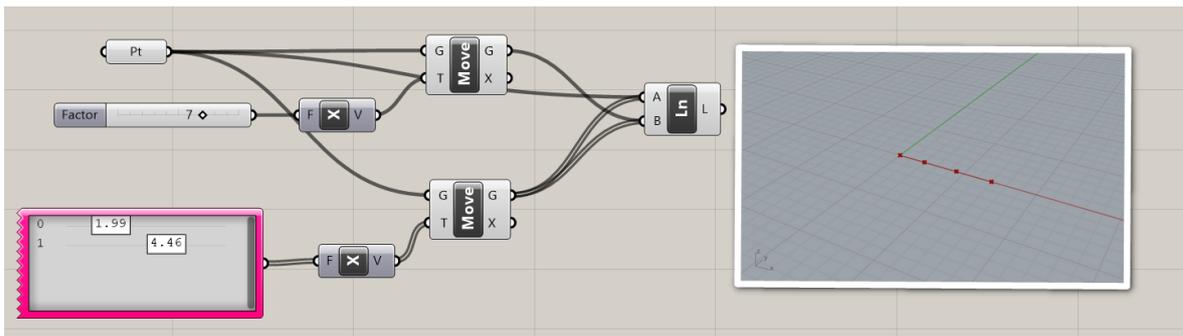


Figura 133 Creación de las líneas de la geometría del caso 2.

A continuación, se pasa a la creación de elementos y selección de material y secciones. Se comienza creando las barras a partir de las líneas para ello se utiliza el módulo Line To Beam (LineToBeam) basta con conectar las líneas creadas con este.

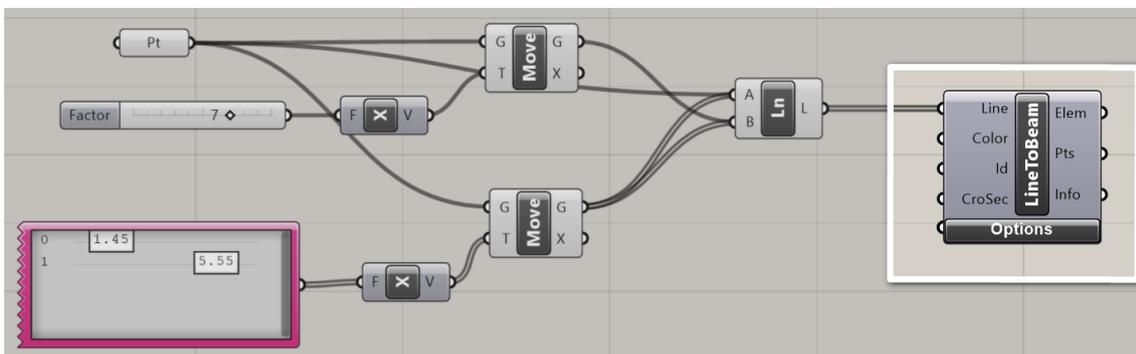


Figura 134 Creación de barras del caso 2.

Después se deben definir los apoyos mediante el módulo Support (Supp). Para definir los apoyos se conectan los puntos creados con el Gene Pool a Support y se seleccionan las traslaciones y rotaciones que se quieren que estén impedidas (Tx, Ty, Tz y Rx).

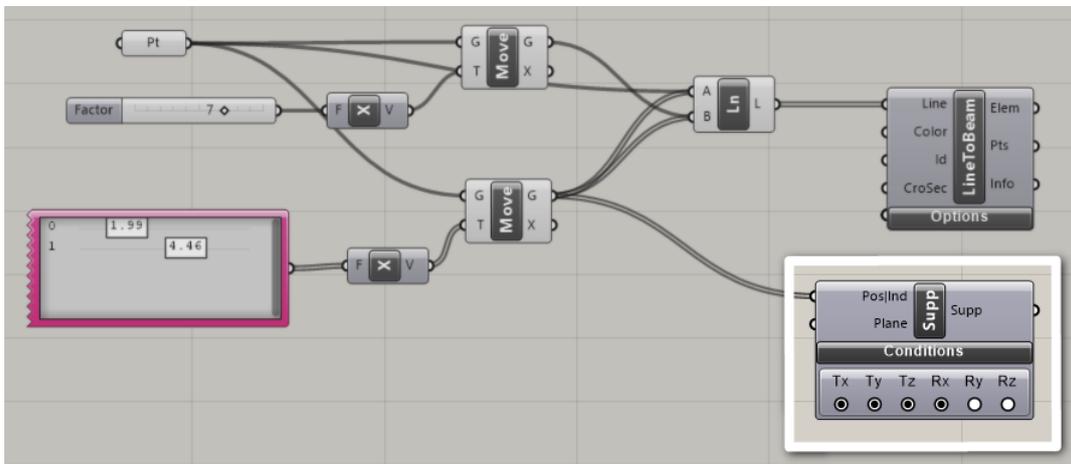


Figura 135 Creación de apoyos del caso 2.

Seguidamente se procede a definir las cargas para ello se utilizará el módulo Loads. Para empezar, se define la carga gravitatoria para ello basta con seleccionar en el desplegable Type of Load la opción Gravity ya que por defecto esta esta orienta en el sentido negativo del eje Z.

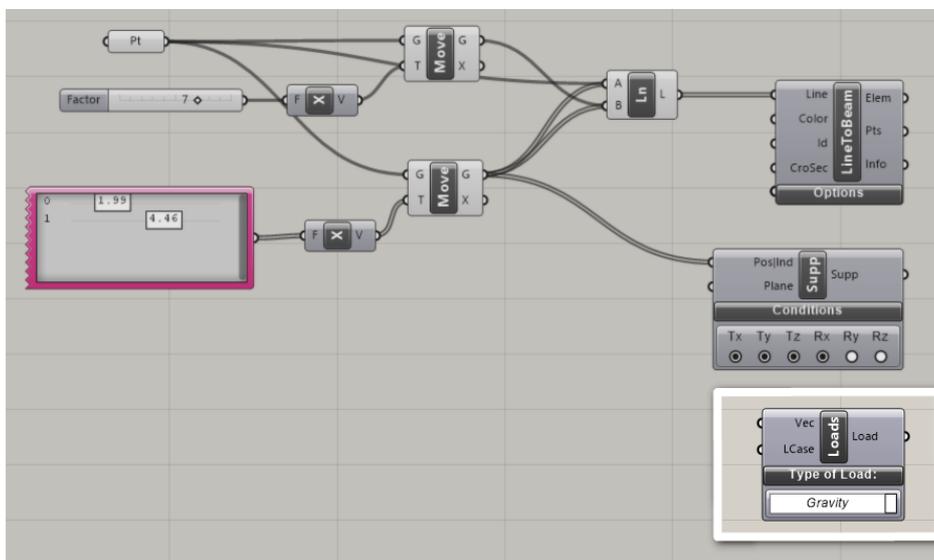


Figura 136 Creación de la carga de gravedad del caso 2.

Para definir la carga uniforme lineal se usarán los módulos Loads, Number Slider y Unit Z (Z). Lo primero que se debe hacer es seleccionar Uniform Line en el desplegable de Type of Load del módulo Loads. Seguidamente se define el vector de la carga distribuida con un Number Slider de valor -2 y Unit X, por defecto se aplica la carga uniforme a todas las barras del modelo que es lo que se busca.

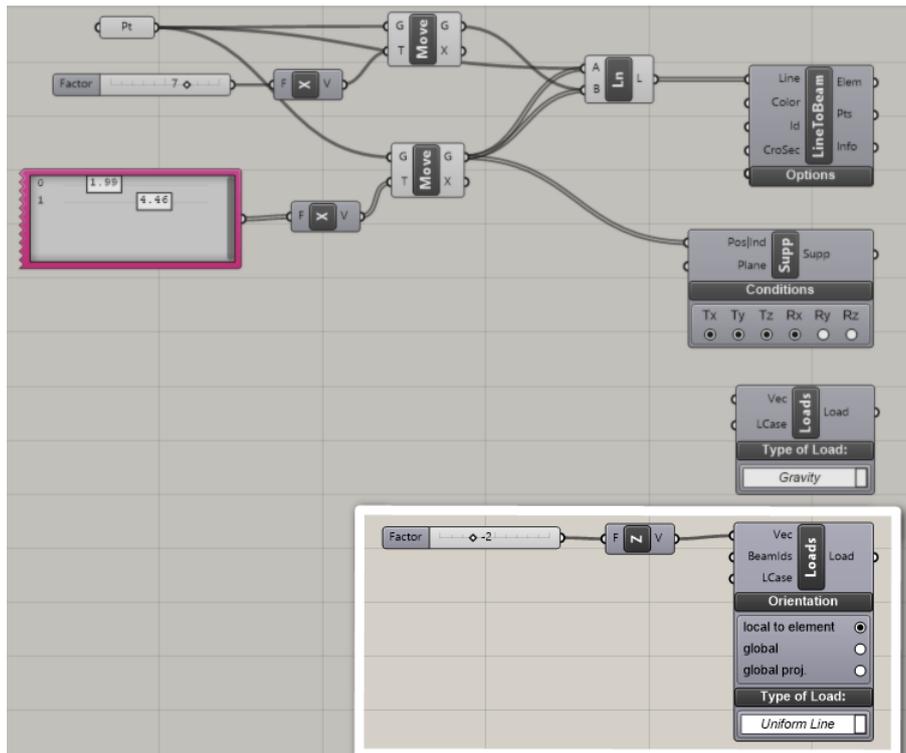


Figura 137 Creación de la carga uniforme lineal del caso 2.

Para la selección del material se usa el módulo Material Selection (MatSelec), para seleccionar el material de este caso que es el acero S235 basta con seleccionar en la pestaña de Family Steel y en la pestaña de Name S235.



Figura 138 Selección del material del caso 2.

Para la selección de las secciones se usará el módulo Cross Section Selector (CroSecSelect). Se quieren los perfiles de la serie IPE que se corresponden con los valores del 0 al 17 de la biblioteca de Karamba, para seleccionar estos valores se crea una serie de números con el módulo Series y se introduce en el módulo Cross Section Selector en la entrada Name/Ids de esta manera se seleccionan los 18 perfiles de la serie IPE.

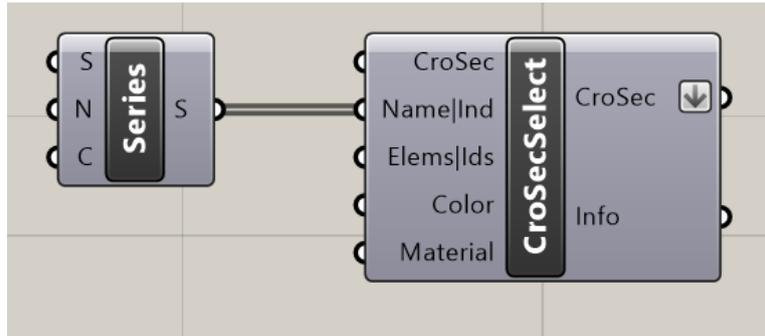


Figura 139 Selección de las secciones del caso 2.

Para crear la serie se debe hacer click con el botón derecho sobre la entrada Count (C) del módulo Series y se selecciona Set Integer donde se introduce el valor 18.

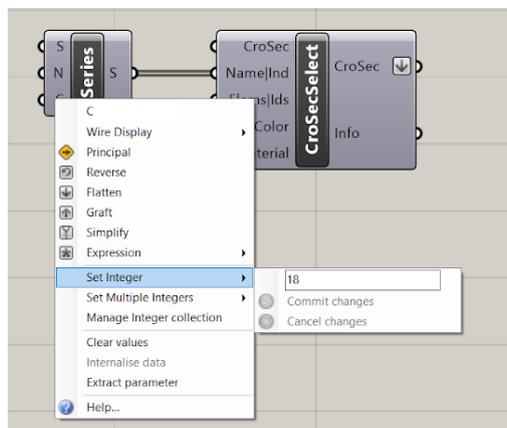


Figura 140 Creación de la serie de selección de secciones del caso 2.

Una vez creados los elementos y seleccionados el material y las secciones se procede a ensamblar el modelo y optimizar las secciones. Para ensamblar el modelo se usará el módulo Assemble Model (Assemble), basta con conectar las barras, apoyos, cargas, material y secciones.

Para que las cargas estén en un mismo caso de cargas se debe activar el Flatten en la entrada Load con la que se consigue que todos los parámetros introducidos estén en una única lista. De lo contrario el programa crearía un caso de carga para cada tipo de carga que se introduzca en el módulo.

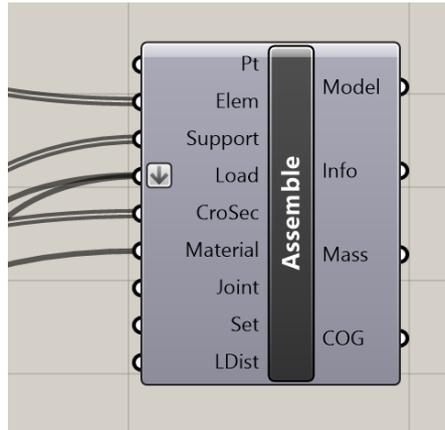


Figura 141 Ensamblaje del modelo del caso 2.

Seguidamente se procede a optimizar las secciones del modelo para ello se usa el módulo Optimize Cross Section (OptiCroSec). En el se introduce el modelo creado con Assamble, las secciones creadas y la condición de máximo desplazamiento.

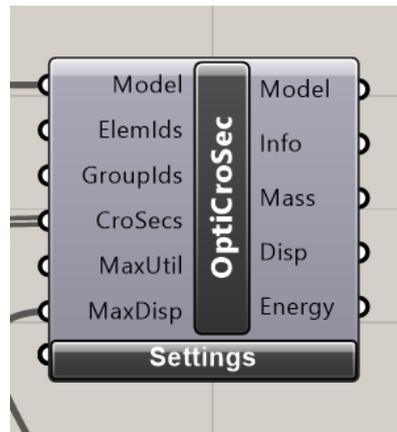


Figura 142 Optimización de las secciones del caso 2.

Para crear la condición de máximo desplazamiento $\frac{d}{300}$ [m] se usarán los módulos Division (A/B) y Number Slider.

Como se sabe que la barra más larga tiene una longitud de 7 m se utiliza Division para dividir la longitud de esta entre 300, pero como en el módulo Optimize Cross Section se debe introducir la condición en cm, se utiliza un Number Slider de valor 3 en vez de 300.

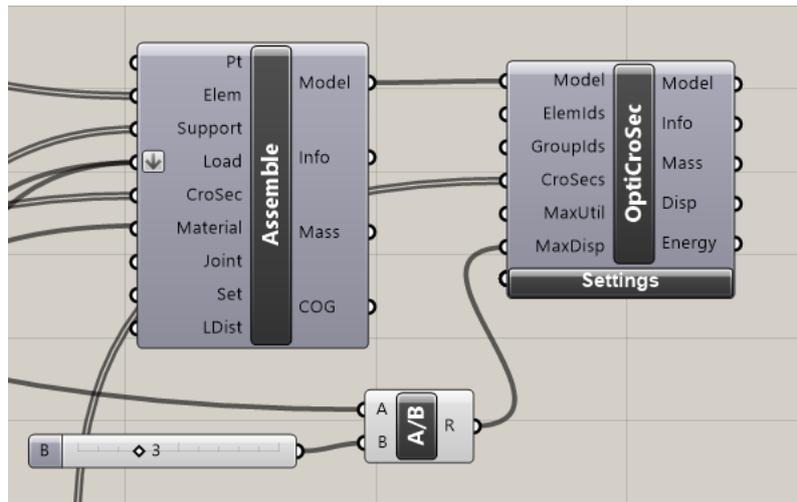


Figura 143 Creación de la condición de desplazamiento para la optimización de las secciones del caso 2.

En esta parte se consigue ver el modelo y barras renderizadas y se permite visualizar diferentes resultados con valores numéricos y con leyendas de colores.

Para visualizar el modelo se hace pasar el modelo por el módulo Model View (ModelView) con el que se ven todos los elementos del modelo como cargas, nodos apoyos, deformación del modelo y barras sin renderizar.

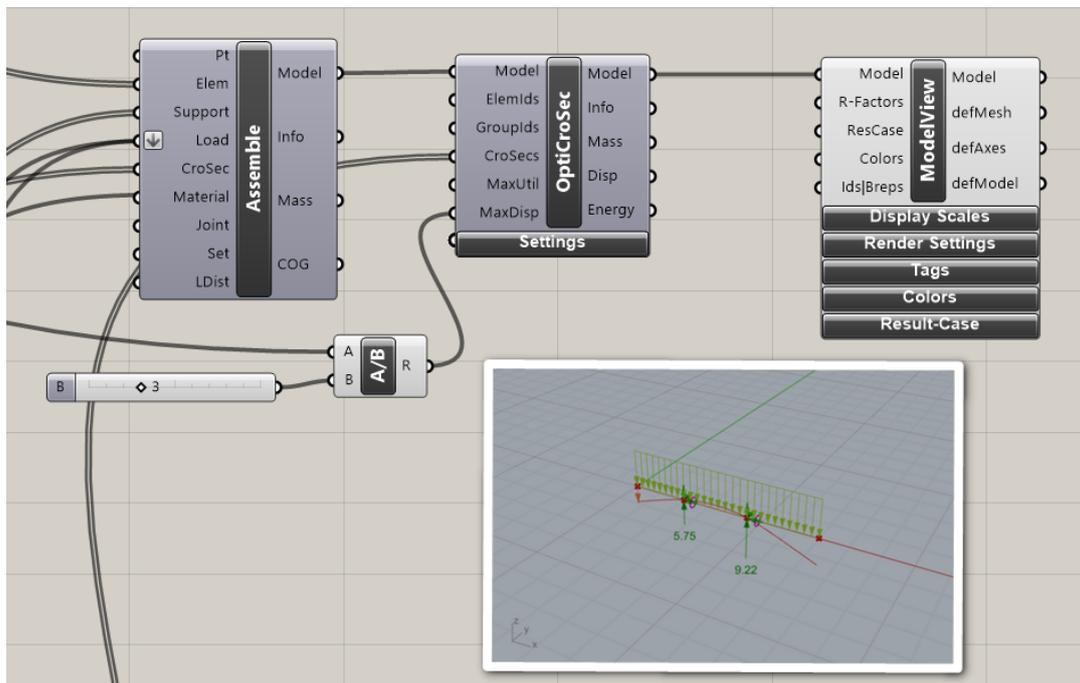


Figura 144 Visualización del modelo del caso 2.

A continuación, se hace pasar el modelo por el módulo Beam View (BeamView) con el que se consigue la renderización de las barras con el que se incluye las fuerzas que soportan las secciones.

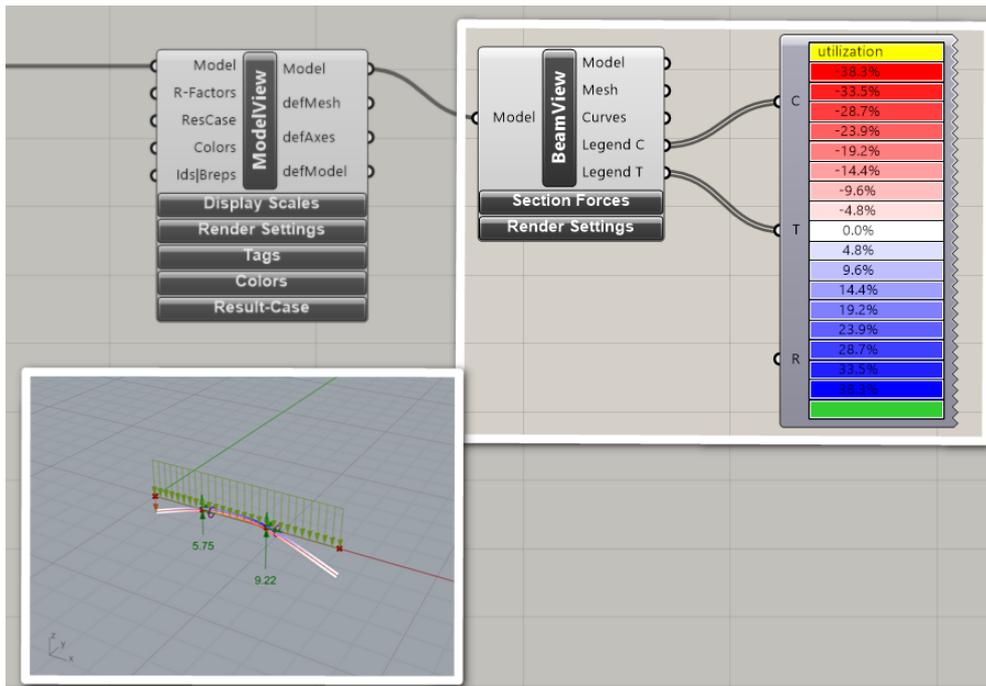


Figura 145 Renderización de las barras del caso 2.

También con el uso del módulo Beam Resultant Forces (B-Res-Force) introduciendo en el el modelo se consigue los valores máximos de axil, cortante y momento que actúan sobre cada una de las barras. Con un panel se pueden observar estos valores en una lista como se ve en la figura.

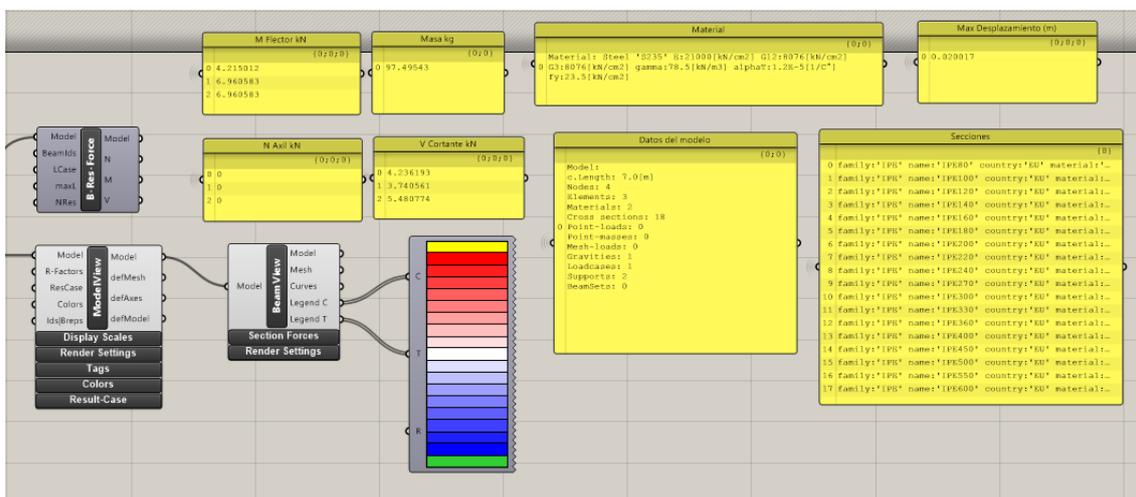


Figura 146 Visualización de resultados del caso 2.

Para finalizar se usa el módulo Galapagos, que es un optimizador con algoritmos genéticos. Para comenzar el Fitness es lo que se quiere optimizar en este caso el momento que se obtiene en el módulo Beam Resultant Force y el Genome es lo que se modifica para conseguir la optimización en este caso el Gene Pool. Conectando estos al módulo Galapagos ya se tiene listo para hacer la optimización.

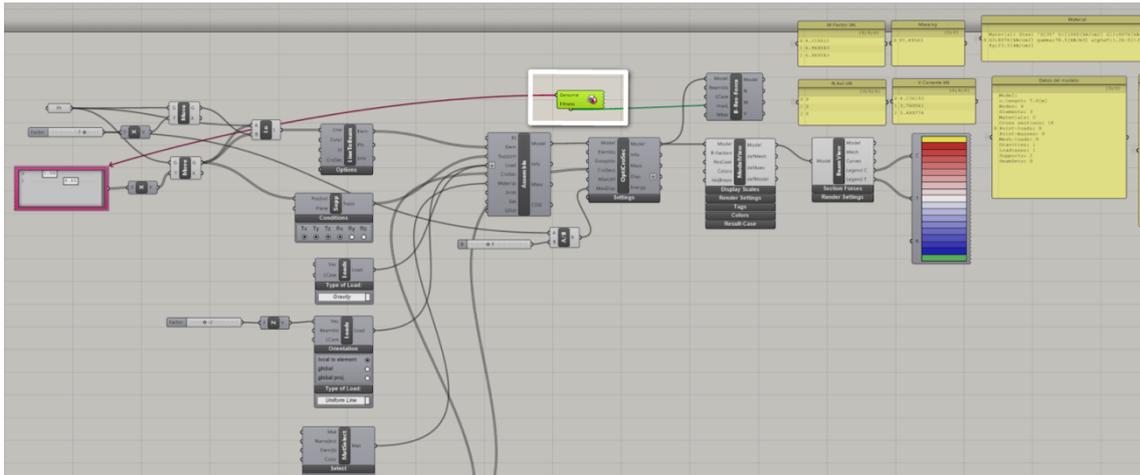


Figura 147 Conexión de Galapagos en el caso 2.

Para ello se hace doble click con el botón izquierdo sobre Galapagos y aparece el menú del módulo. En la pestaña de Options seleccionamos Minimize en el parámetro Fitness, a continuación, pasamos a la pantalla solvers y hacemos click sobre Start Solver.

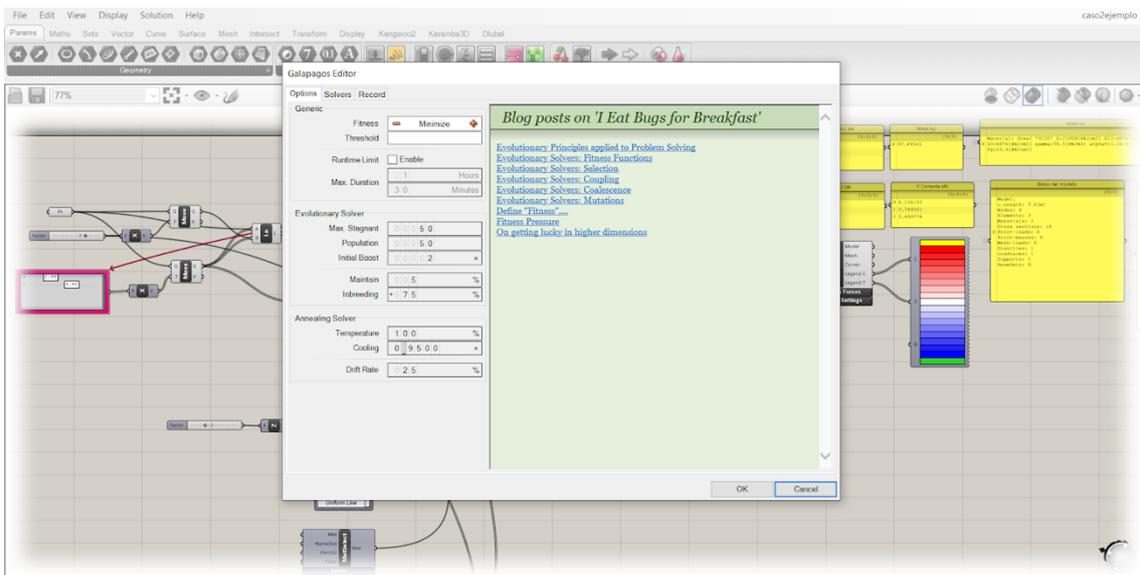


Figura 148 Options del menú de Galapagos del caso 2.

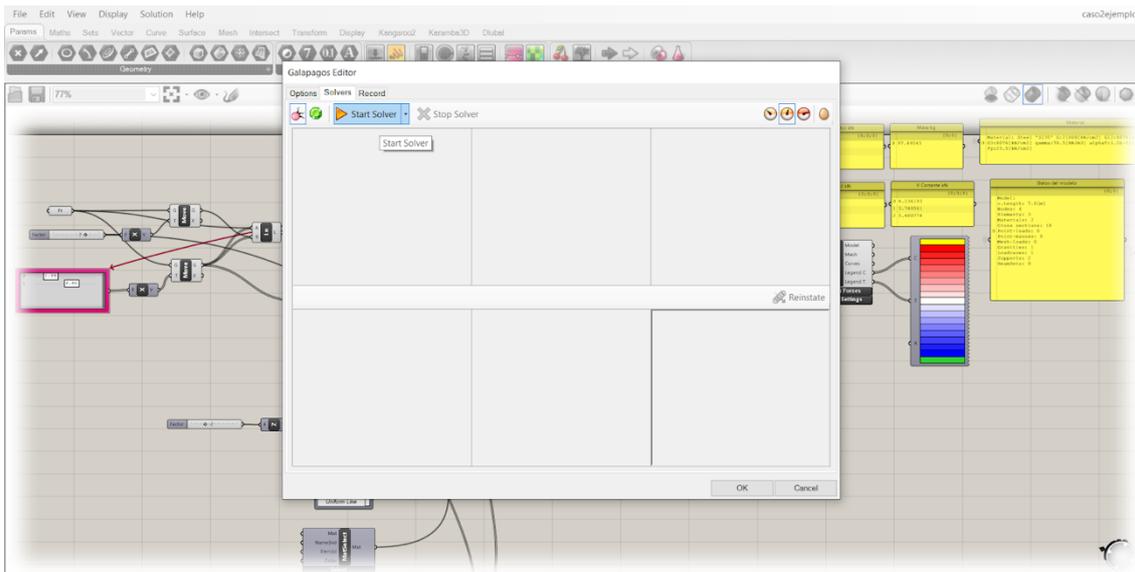


Figura 149 Inicio de la optimización mediante Galapagos del caso 2.

Una vez finalizada la optimización con sus diferentes iteraciones obtenemos que la posición en que el momento es mínimo es 1,45 para el primer apoyo y 5,55 para el segundo.

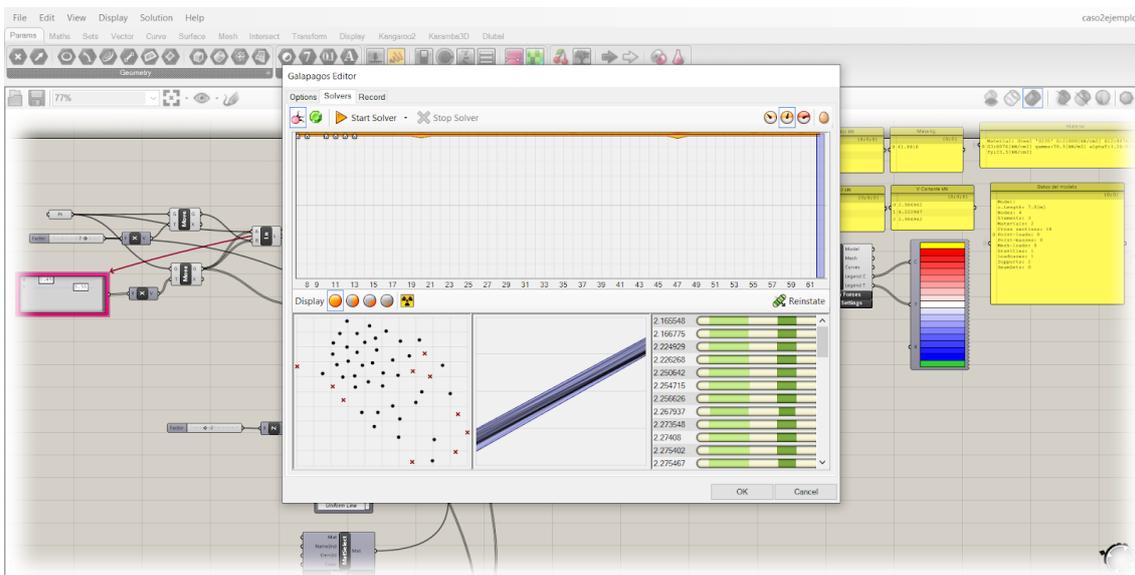


Figura 150 Resultados de la optimización de Galapagos del caso 2.

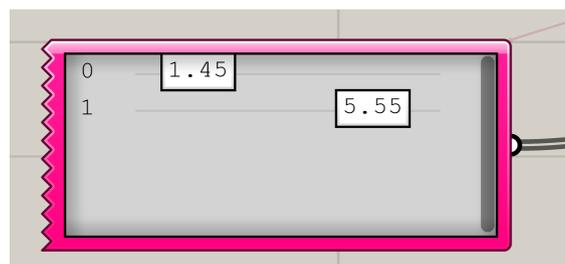


Figura 151 Resultado de la optimización de los apoyos.

1.1.7 Caso 3.

Como se desarrolló en la memoria se debe empezar por definir la geometría del modelo. Para ello se parte del punto origen (0,0,0) para ello utilizamos el modulo Point (Pt), se hace click sobre este con el botón derecho del ratón para desplegar las opciones del módulo y se hace click sobre Set one Point. En la ventana de comandos de Rhino nos pedirá que introduzcamos las coordenadas del punto en cuestión, una vez introducidas el punto origen quedara definido.

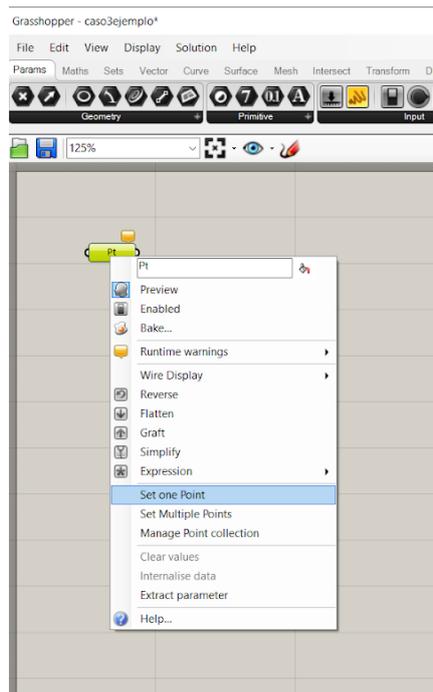


Figura 152 Creación del punto origen del caso 3.

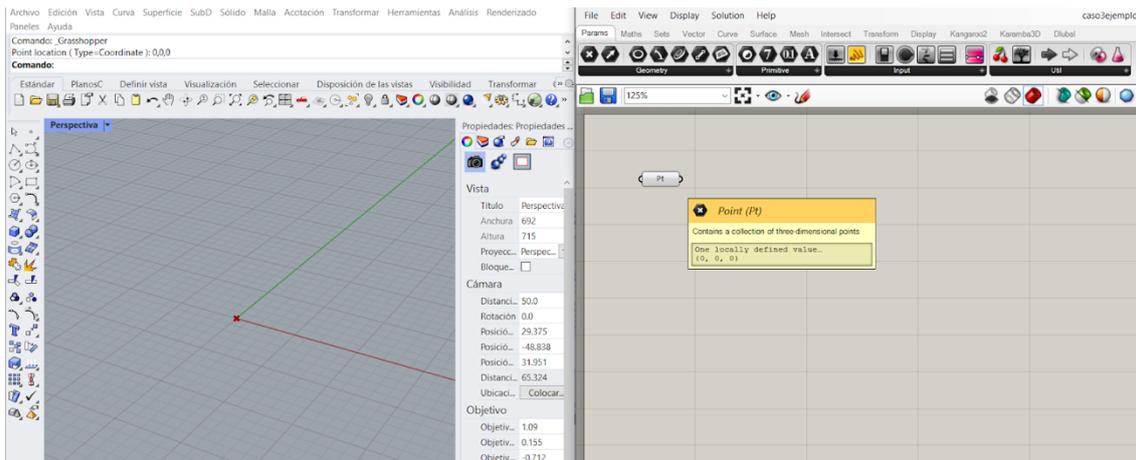


Figura 153 Introducción de coordenadas del punto origen del caso 3.

A continuación, se crearán los puntos donde estarán los pilares para ello hay que tener en cuenta que en el dominio de 4 a 7 no se podrá incluir ningún pilar. Se utilizarán los módulos Move, Unit X (X), Sort List (Sort), Cull Pattern (Cull), Includes (Inc), Construct Domain (Dom), Number Slider y Gene Pool.

Para empezar, se utiliza un Gene Pool con cuatro Sliders y con un rango de 0 a 15, estos serán las posiciones de los pilares que se busca optimizar con Galapagos. Se le dan valores aleatorios a estos Sliders.

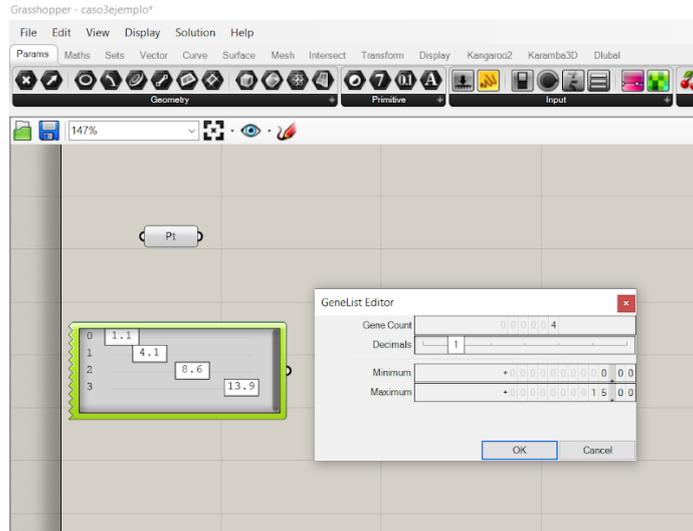


Figura 154 Configuración del Gene Pool del caso 3.

Seguidamente se debe crear un dominio y un pequeño script para saber que valores del Gene Pool están dentro del dominio y deben ser eliminados. Para crear el dominio usamos Construct Domain (Dom) y dos Number Slider de valor 4 y 7 que se corresponden con el inicio y el final del dominio.

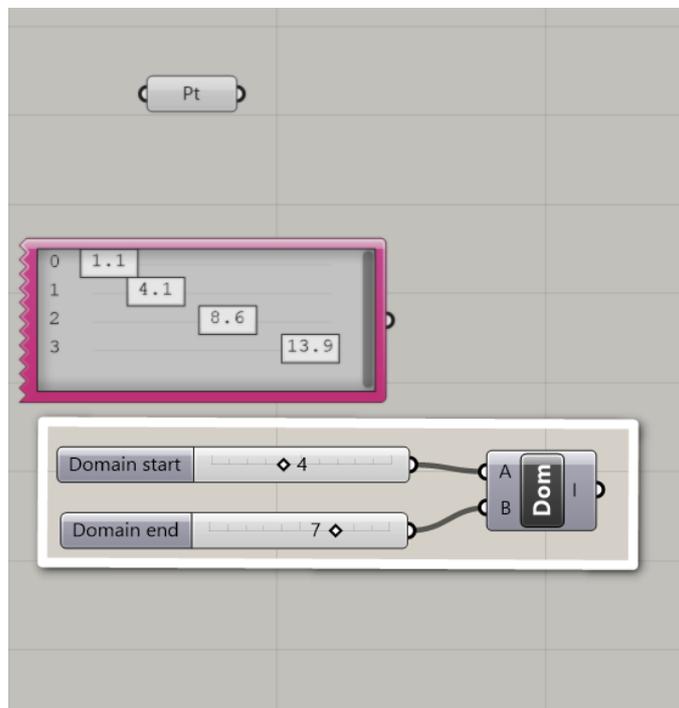


Figura 155 Creación del dominio donde esta la puerta.

Para saber que valores están dentro del dominio y deben ser eliminados se usa Includes en el que introduciendo la lista de valores del Gene Pool y el dominio devolviendo una lista True/False de cada valor del Gene Pool True si está dentro del dominio y False si esta fuera. Después usando Pattern Cull, que permite eliminar valores de una lista siguiendo un patrón dado, se introduce la lista de valores del Gene Pool y el patrón que es la lista de True/False creada anteriormente. En este caso queremos eliminar los valores que están dentro del dominio y por defecto elimina los valores asociados a False que se corresponden con los que están fuera del dominio, para cambiar los True por False y los False por True se activa en la entrada del patrón la opción Invert.

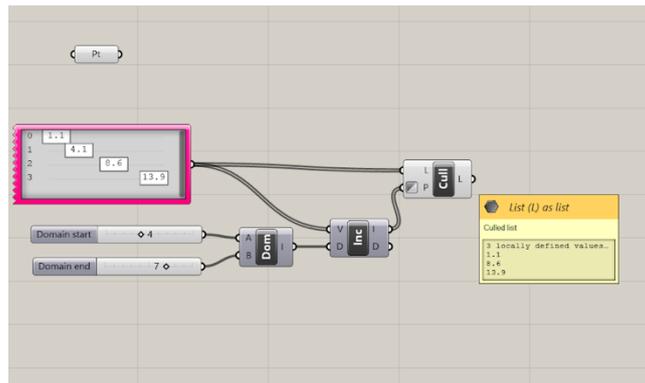


Figura 156 Script para borrar valores que se encuentren dentro del dominio.

Seguidamente se debe añadir el punto final de la estructura donde también habrá pilar y se crearan los puntos. Para ello se usará Sort List (Sort) donde se conecta un Number Slider de valor 15, referente al punto final y la lista de valores obtenidos con el Cull Pattern (Cull), este módulo permite añadir el valor del punto final y ordenar los valores de menor a mayor. Después y a partir del punto origen que se usara como geometría base y creando vectores de traslación a través de Unit X (X), como en los casos anteriores, se consigue a través de Move crear los puntos deseados.

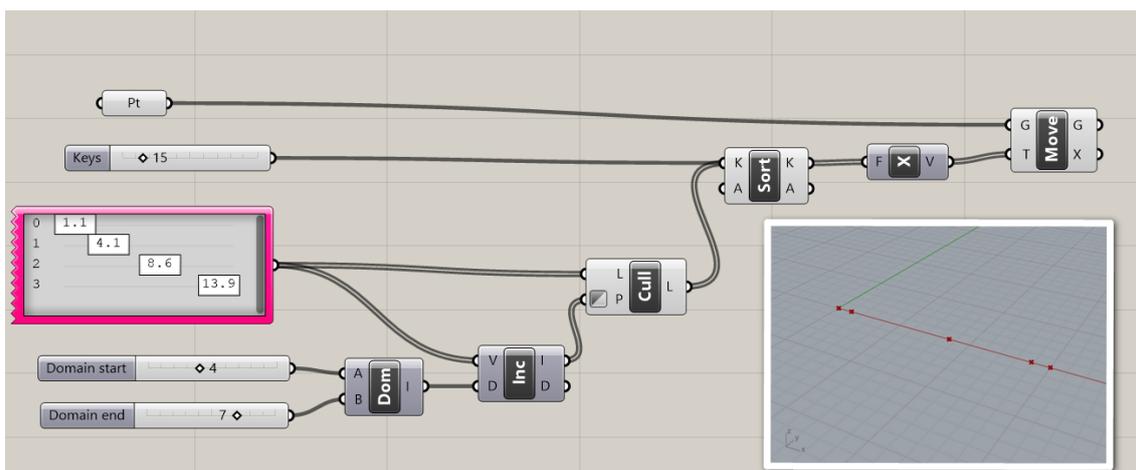


Figura 157 Creación de los puntos correspondientes a la cabeza de los pilares.

Para crear la base de los pilares lo que se hará es trasladar los puntos creados hacia abajo con Move. La Geometría base serán los puntos obtenidos hasta el momento

incluido el punto origen y con un Number Slider de valor -5 y un Unit Z (Z) se conseguirá el vector de traslación para estos puntos.

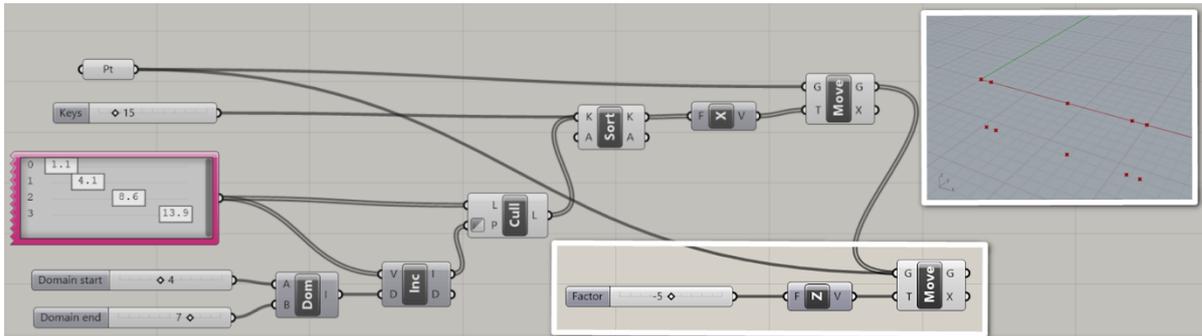


Figura 158 Creación de los puntos correspondientes a la base de los pilares.

Una vez creados todos los puntos se deben crear las líneas para el caso de los pilares es muy sencillo, se usará el módulo Line (Ln). Uniremos en primer lugar el inicio de los pilares incluyendo el punto origen y posteriormente el punto final que son los puntos creados en el apartado anterior. Hay que tener especial cuidado en esta parte si para crear la base de los pilares se introdujo en primer lugar el vector origen como geometría base a la hora de crear estas líneas debe hacerse de igual forma para no obtener barras no deseadas.

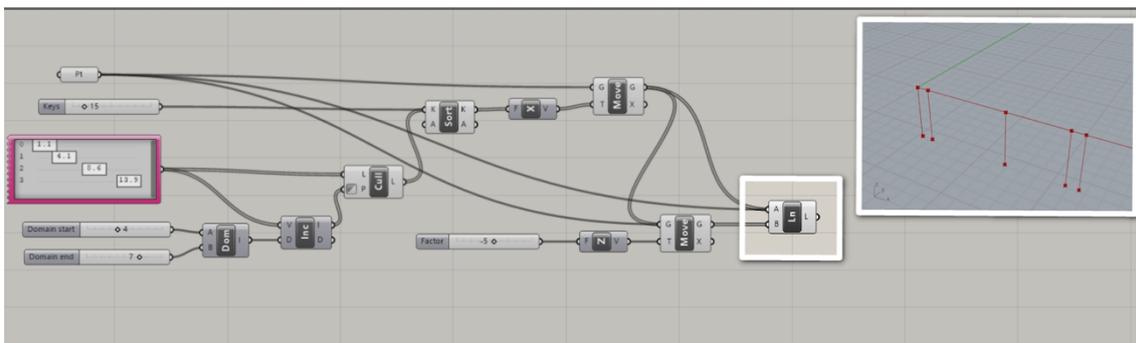


Figura 159 Creación de las líneas correspondientes a los pilares.

Lo siguiente será crear las líneas de las vigas para ello hay que hacer un pequeño script que ayudará a ordenar los puntos adecuadamente para evitar barras no deseadas. Para ello se utilizarán los módulos Sort Points (Sort Pt), Merge, Shift List (Shift), List Length (Lng), Cull Index (Cull i) y Line (Ln).

Además, se tendrán crear los puntos que en los que se aplicaran las cargas puntuales debido a que en Karamba no se pueden aplicar cargas en puntos intermedios de barras, por lo que utilizaremos los modulos Number Slider, Unit X (X) y Move. Los puntos se realizarán como siempre, a través de la geometría base del punto origen y un vector traslación creado con Number Slider y Unit X (X).

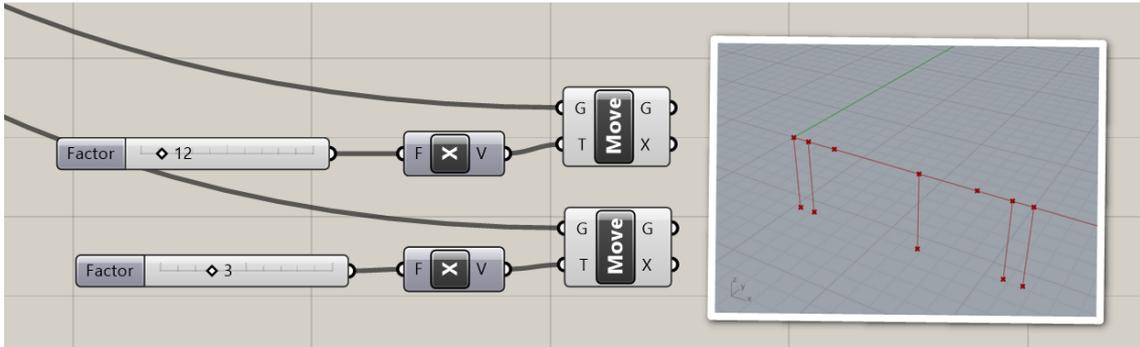


Figura 160 Creación de los puntos de aplicación de las cargas puntuales.

A continuación, se usa Sort Points (Sort Pt) para ordenar los puntos de menor a mayor que se tienen en la horizontal exceptuando el punto origen. Posteriormente se une a estos el punto origen con Merge, el punto origen se introduce en D1 para no alterar el orden conseguido con Sort Points (Sort Pt).

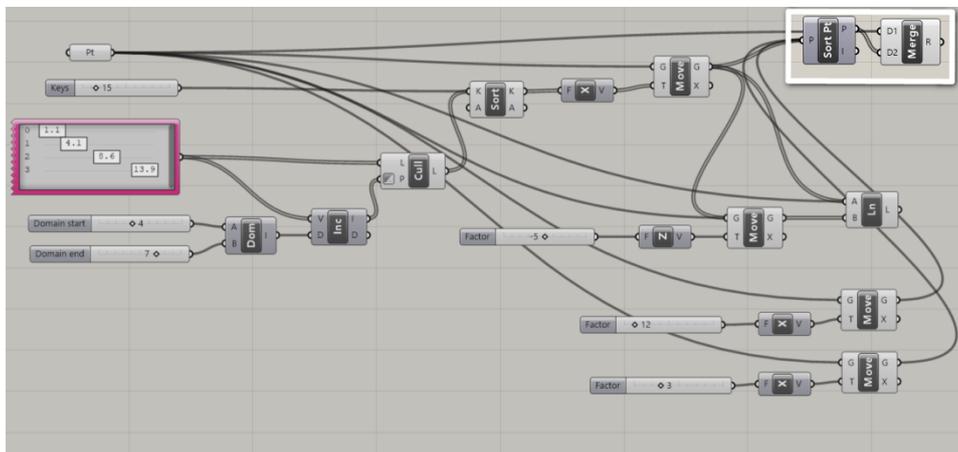


Figura 161 Organización y unión de todos los puntos correspondientes a las vigas.

Para usar Line (Ln) y conseguir las líneas de las vigas se deben conseguir dos listas una con todos los puntos menos el ultimo (15,0,0) y otra con todos los puntos menos el primero (0,0,0), la primera de las listas será el inicio de cada barra y la segunda el final de estas.

Para crear la primera de estas listas se usará List Length (Lng) y Cull Index (Cull i). Cull Index (Cull i) permite borrar elementos de una lista a través de un valor, el módulo conservara los primeros valores que sean igual a este valor y el resto los eliminara. Teniendo en cuenta esto lo que se quiere es que conserve todos los valores menos el ultimo, entonces se necesitan la longitud de la lista menos uno como valor. Como el número de valores de la lista puede cambiar al optimizar la posición de los pilares con Galapagos, se usa List Length (Lng) con una expresión en su salida. Se conecta la lista de puntos a este módulo y se obtiene el número de los valores que tiene y en la salida se introduce la expresión $x-1$.

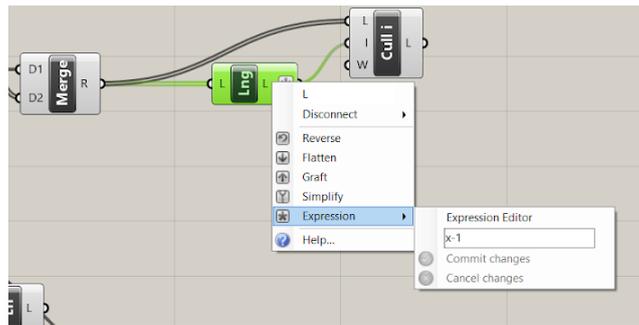


Figura 162 Creación de la expresión del módulo Length (Lng).

Para finalizar se introduce la lista de puntos y la salida de List Length (Lng) y se consigue el objetivo.

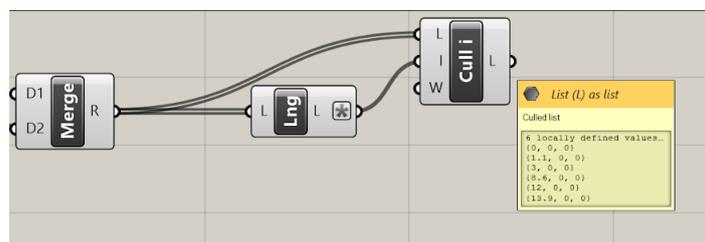


Figura 163 Creación de la lista de puntos correspondiente a los puntos iniciales de las vigas.

Para crear la segunda lista se hace de igual forma que la primera, pero añadiendo el módulo Shift List (Shift) que permite modificar el orden de los valores en la lista. Se quiere que el primer valor sea cambiado al último lugar en la lista casualmente es el cambio que realiza este módulo por defecto. Entonces para conseguir la lista bastara con conectar la lista de puntos a este módulo y seguir los pasos de creación de la primera lista, pero con la lista de puntos obtenida con el módulo Shift List (Shift).

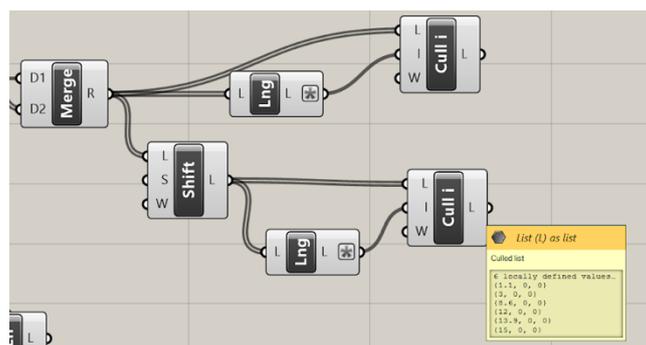


Figura 164 Creación de la lista de puntos correspondiente a los puntos finales de las vigas.

Para finalizar la geometría se conectan estas listas con el módulo Line (Ln) y se obtienen las líneas de las vigas.

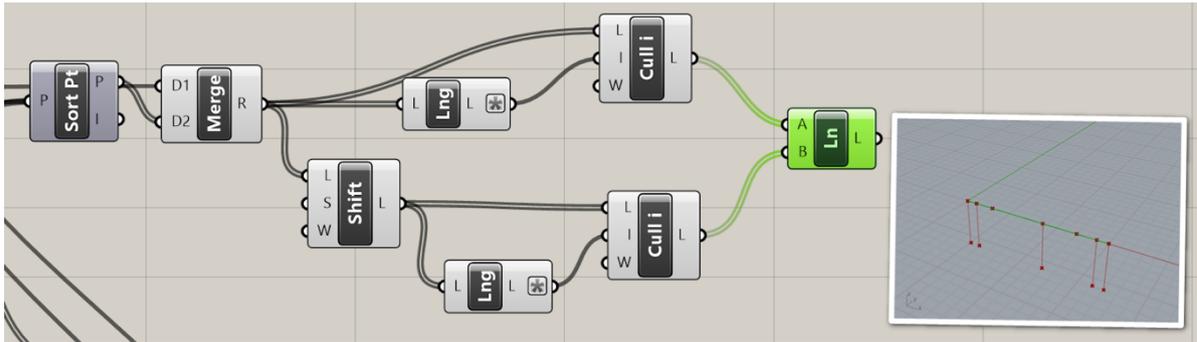


Figura 165 Creación de las líneas correspondientes a las vigas.

A continuación, se pasa a la creación de elementos y selección de material y secciones. Se comienza creando las barras a partir de las líneas para ello se utiliza el módulo Line To Beam (LineToBeam) basta con conectar las líneas creadas con este. En este caso se utiliza uno para las vigas y otro para los pilares. El de las vigas debe de tener en la entrada Line la opción Flattened activada de lo contrario puede dar problemas con las cargas puntuales.

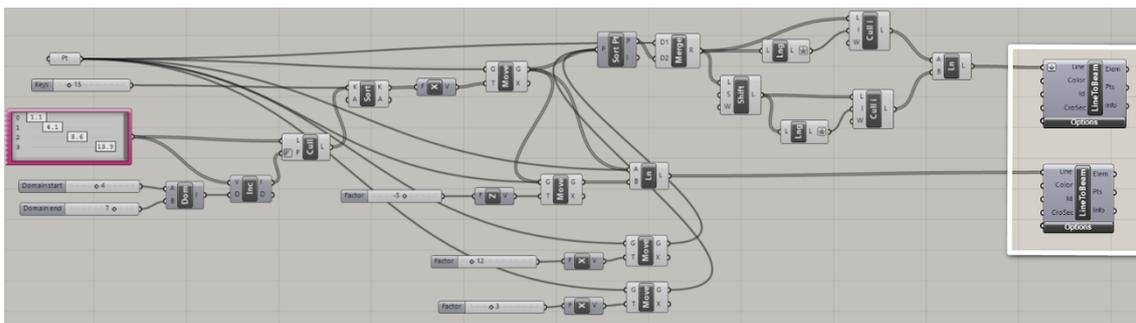


Figura 166 Creación de barras del caso 3.

Además, se dan nombres a las barras para la aplicación de la carga uniforme lineal. Se hace click con el botón derecho del ratón sobre Id, se selecciona Set Multiple Text y se introduce el nombre que se le quiere dar a las barras. En este caso se ha optado por letras de la A a la F.

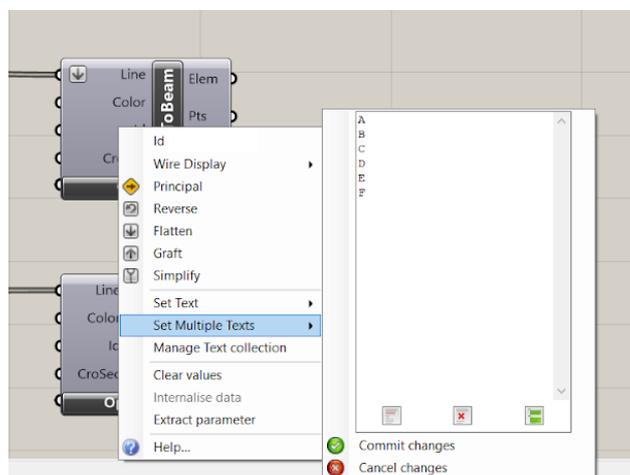


Figura 167 Introducción de texto en la entrada Id del módulo Line to Beam.

Después se deben definir los apoyos mediante el módulo Support (Supp). En este caso se los apoyos se quieren en los puntos creados como base de los pilares. Para definir los apoyos se conectan estos puntos a Support y se seleccionan las traslaciones y rotaciones que se quieren que estén impedidas (Tx, Ty, Tz y Rx).

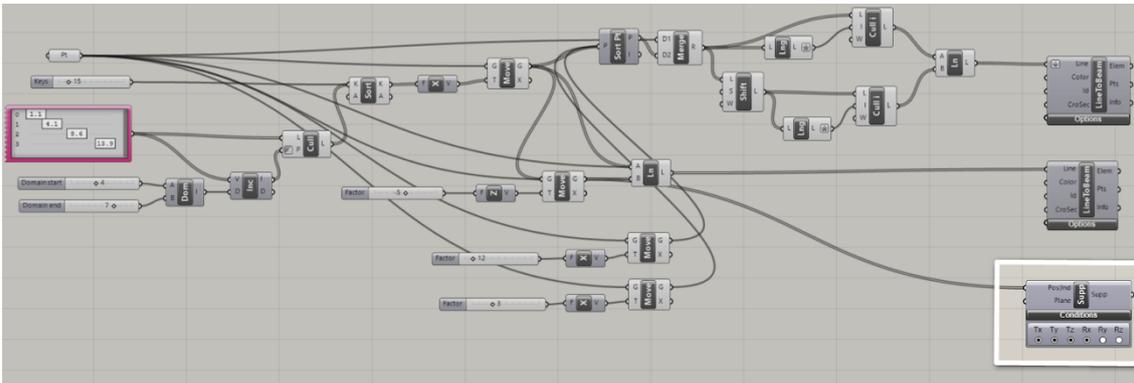


Figura 168 Creación de apoyos del caso 3.

Seguidamente se procede a definir las cargas para ello se utilizará el módulo Loads. Para empezar, se define la carga gravitatoria para ello basta con seleccionar en el desplegable Type of Load la opción Gravity ya que por defecto esta esta orienta en el sentido negativo del eje Z.

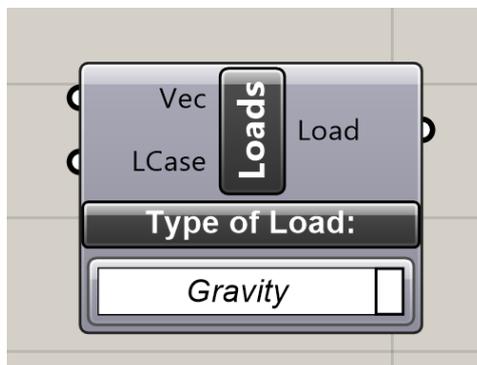


Figura 169 Creación de la carga de gravedad del caso 3.

Para definir las cargas puntuales se usará el módulo Loads, Unit Z (Z), Multiplication (AxB) y Number Slider. Lo primero que se debe hacer es seleccionar la opción Point en el desplegable Type of Load. Se tiene que introducir la posición y el vector fuerza, la posición se corresponde con los puntos creados en la geometría el punto (3,0,0) punto donde esta aplicada la carga puntual de -3 kN y el punto (12,0,0) donde resulta aplicada la carga uniforme lineal de -3kN/m aplicada de 11,5 m a 13,5 m al pasarla a carga puntual. Para obtener los vectores fuerza, en la primera carga (0,0,-3) simplemente se utiliza un Number Slider de valor -3 conectado a Unit Z (Z) y para la segunda carga se utilizan dos Number Slider uno correspondiente con la intensidad de la fuerza uniforme

lineal de valor -3kN/m y otro correspondiente con la longitud de aplicación de valor 3m estos se multiplican con Multiplication (AxB) y se obtiene un valor de -9 que con Unit Z (Z) se consigue el vector fuerza $(0,0,-9)$.

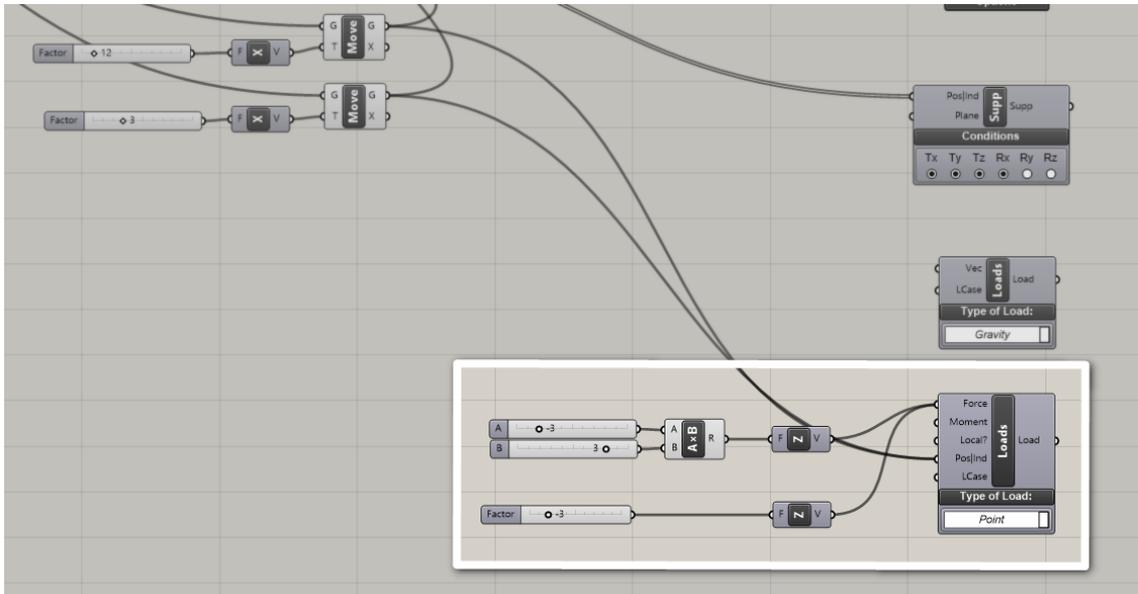


Figura 170 Creación de cargas puntuales del caso 3.

Para definir la carga uniforme lineal se usarán los módulos Loads, Number Slider y Unit Z (Z) y Dissassemble Element (Dissassemble). Lo primero que se debe hacer es seleccionar Uniform Line en el desplegable de Type of Load del módulo Loads. Seguidamente se define el vector de la carga distribuida con un Number Slider de valor -3 y Unit Z (Z). Al módulo Dissassemble se conectan las barras correspondientes a las vigas, de este se obtienen los identificadores de las vigas, que se conectan a la entrada BeamIds, ya que esta carga esta aplicada sobre todas las vigas.

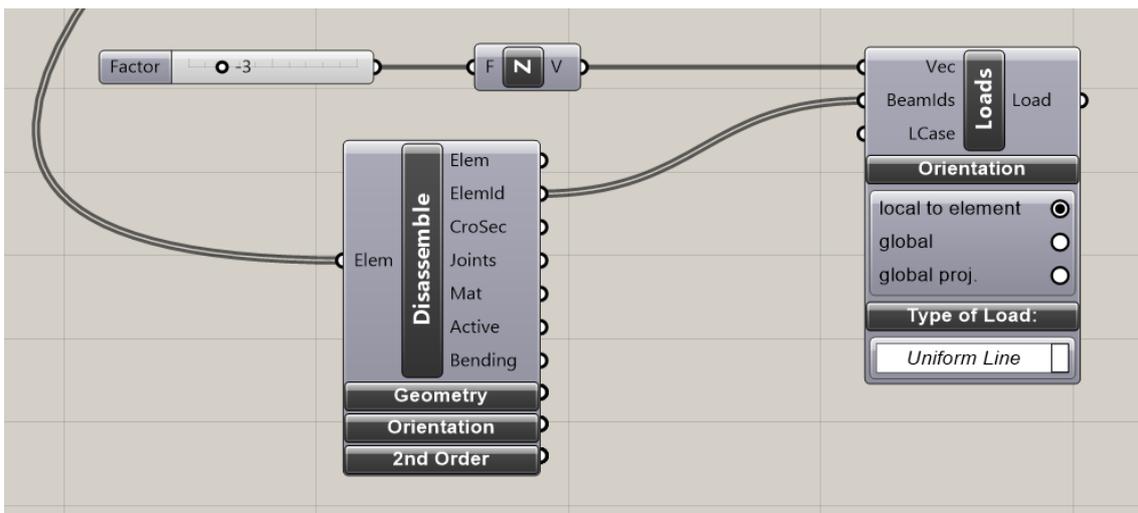


Figura 171 Creación de la carga uniforme lineal del caso 3.

Para la selección del material se usa el módulo Material Selection (MatSelect), para seleccionar el material de este caso que es el acero S235 basta con seleccionar en la pestaña de Family Steel y en la pestaña de Name S235.



Figura 172 Selección del material del caso 3.

Para la selección de las secciones se usará el módulo Cross Section Selector (CroSecSelect). Se quieren los perfiles de la serie IPE que se corresponden con los valores del 0 al 17 de la biblioteca de Karamba, para seleccionar estos valores se crea una serie de números con el módulo Series y se introduce en el módulo Cross Section Selector en la entrada Name/Ids de esta manera se seleccionan los 18 perfiles de la serie IPE.

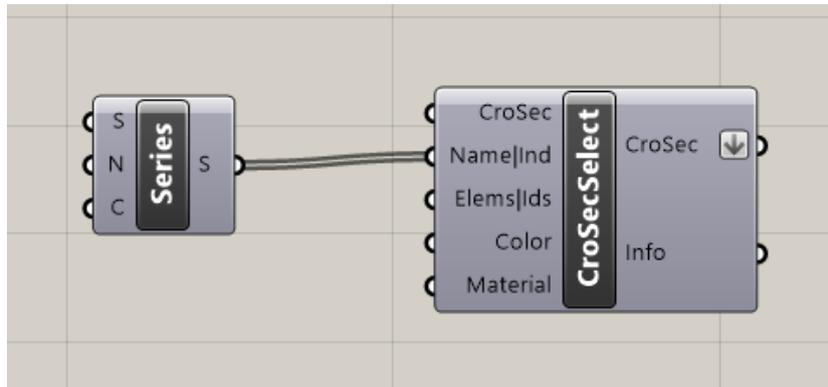


Figura 173 Selección de las secciones del caso 3.

Para crear la serie se debe hacer click con el botón derecho sobre la entrada Count (C) del módulo Series y se selecciona Set Integer donde se introduce el valor 18.

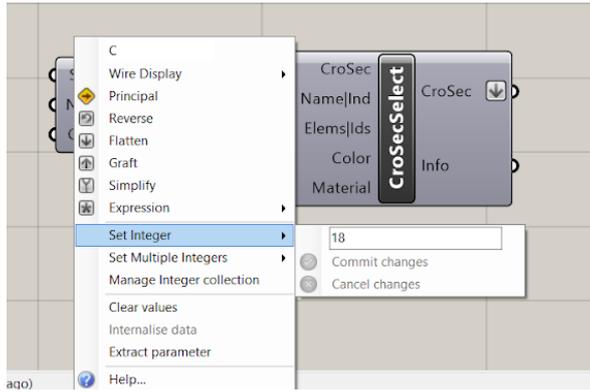


Figura 174 Creación de la serie de selección de secciones del caso 2.

Una vez creados los elementos y seleccionados el material y las secciones se procede a ensamblar el modelo y optimizar las secciones. Para ensamblar el modelo se usará el módulo Assemble Model (Assemble), basta con conectar las barras, apoyos, cargas, material y secciones.

Para que las cargas estén en un mismo caso de cargas se debe activar el Flatten en la entrada Load con la que se consigue que todos los parámetros introducidos estén en una única lista. De lo contrario el programa crearía un caso de carga para cada tipo de carga que se introduzca en el módulo.

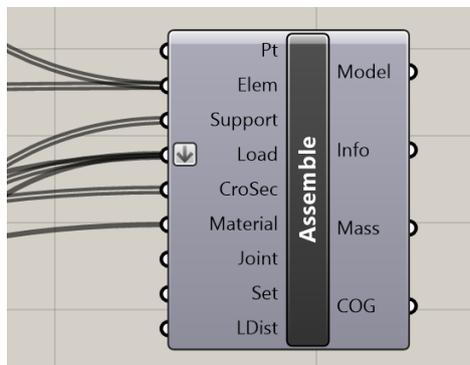


Figura 175 Ensamblaje del modelo del caso 3.

Seguidamente se procede a optimizar las secciones del modelo para ello se usa el módulo Optimize Cross Section (OptiCroSec). En el se introduce el modelo creado con Assemble, las secciones creadas y la condición de máximo desplazamiento.

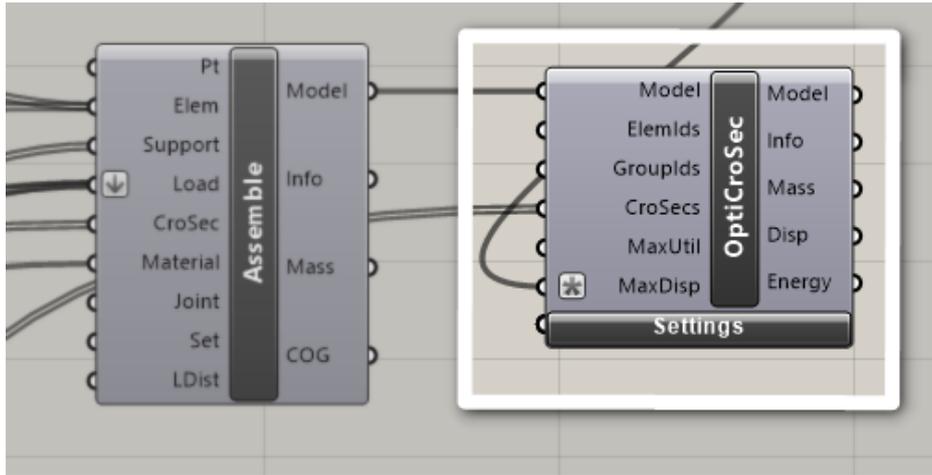


Figura 176 Optimización de las secciones del caso 3.

Para crear la condición de máximo desplazamiento $\frac{d}{300}$ [m], hay que saber cual es la barra mas larga del modelo. Para su obtención se usarán los módulos Length (Len), Sort List (Sort), List Item (Item), Division (A/B) y Number Slider.

Primero se hace pasar las líneas que creamos en la geometría por Length, donde obtenemos la longitud de estas, seguidamente se conectan a Sort List donde se ordena la lista de menor a mayor, como se quiere obtener el mayor valor en la salida de este módulo se activa Reverse, a continuación, se introduce esta lista ordenada en List Item que por defecto selecciona el primer valor de la lista (el mayor).

Finalmente se utiliza Division para dividir la longitud de la barra más larga entre 300 como se en el módulo Optimize Cross Section se debe introducir la condición en cm, por ellos en este caso utilizamos una expresión en la entrada MasDisp del módulo Optimize Cross Section (OptiCroSec) igual a $x*100$.

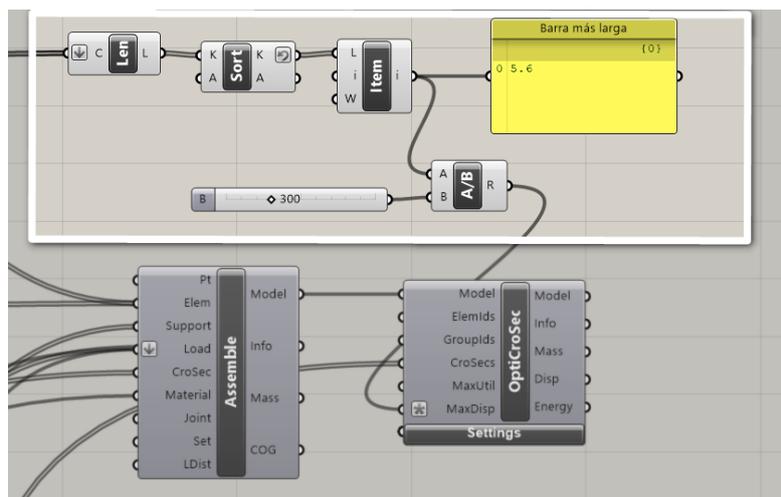


Figura 177 Creación de la condición de desplazamiento para la optimización de las secciones del caso 3.

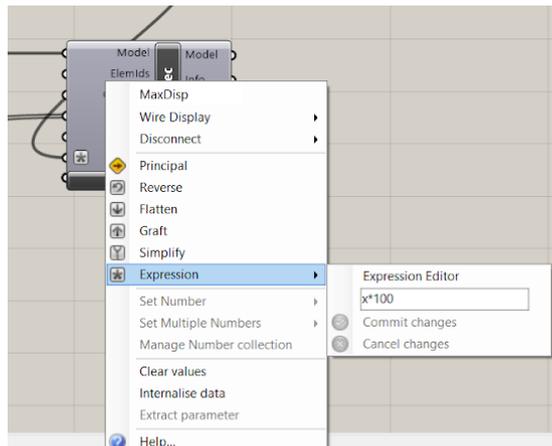


Figura 178 Introducción de expresión para pasar de m a cm en entrada MaxDisp.

En esta parte se consigue ver el modelo y barras renderizadas y se permite visualizar diferentes resultados con valores numéricos y con leyendas de colores.

Para visualizar el modelo se hace pasar el modelo por el módulo Model View (ModelView) con el que se ven todos los elementos del modelo como cargas, nodos apoyos, deformación del modelo y barras sin renderizar.

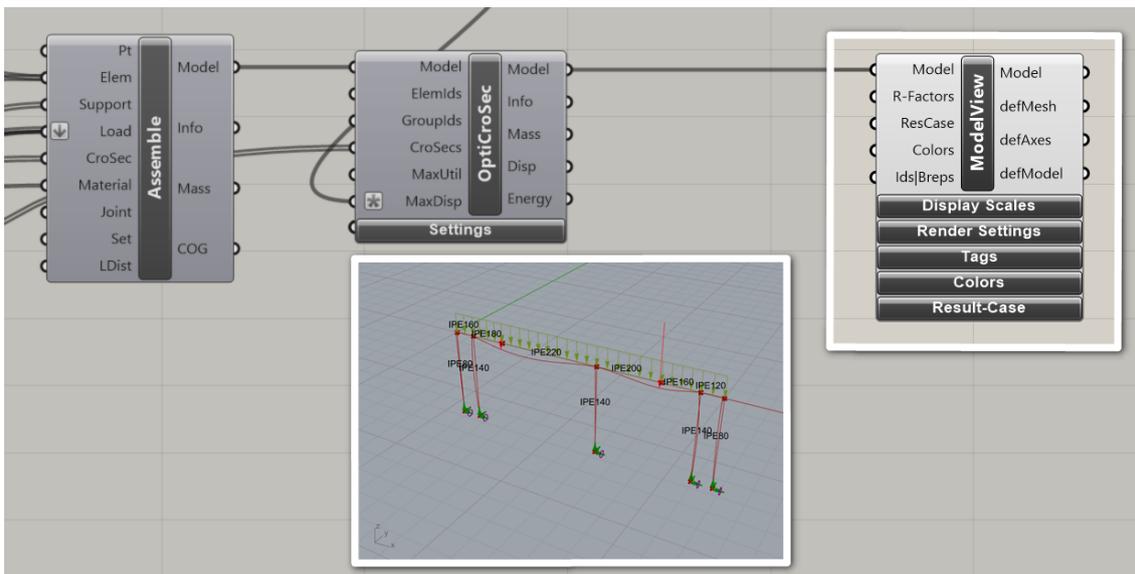


Figura 179 Visualización del modelo del caso 3.

A continuación, se hace pasar el modelo por el módulo Beam View (BeamView) con el que se consigue la renderización de las barras con el que se incluye las fuerzas que soportan las secciones.

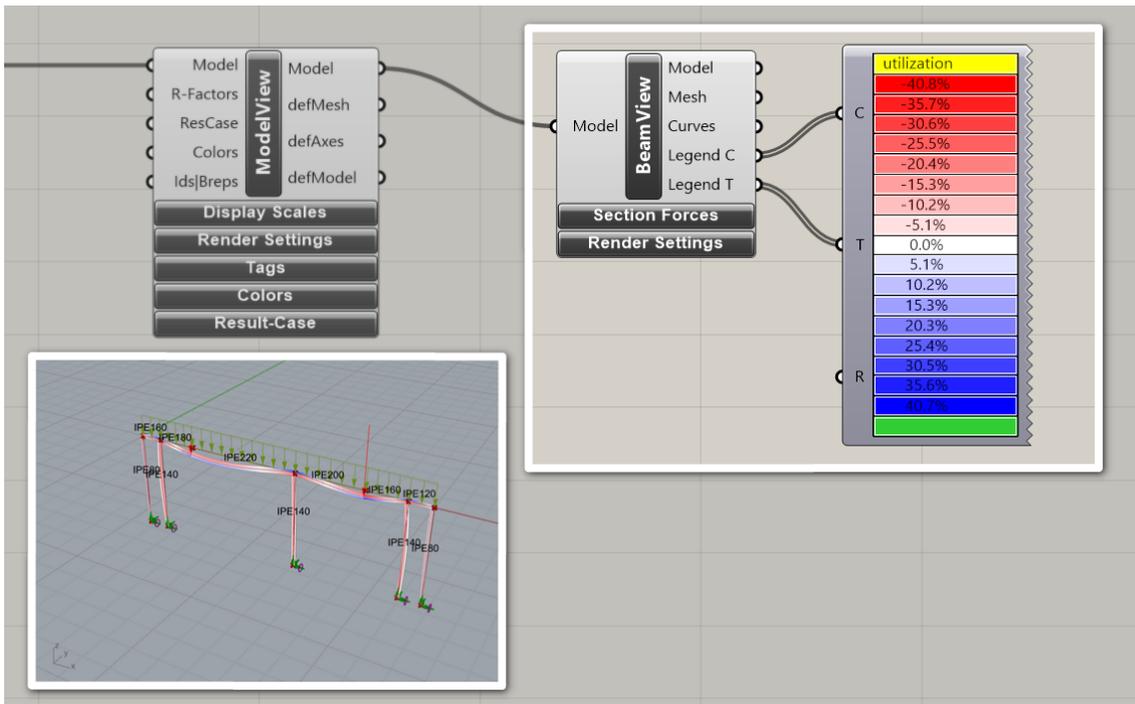


Figura 180 Renderización de las barras del caso 3.

También con el uso del módulo Beam Resultant Forces (B-Res-Force) introduciendo en el modelo se consigue los valores máximos de axil, cortante y momento que actúan sobre cada una de las barras. Con un panel se pueden observar estos valores en una lista como se ve en la figura.

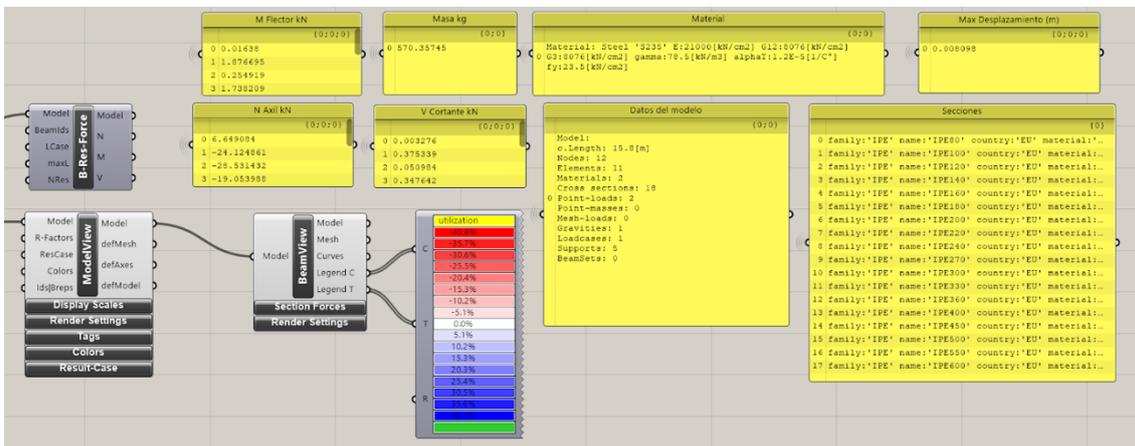


Figura 181 Visualización de resultados del caso 3.

Para finalizar se usa el módulo Galapagos, que es un optimizador con algoritmos genéticos. Para comenzar el Fitness es lo que se quiere optimizar en este caso la masa que se obtiene en el módulo Optimize Cross Section y el Genome es lo que se modifica para conseguir la optimización en este caso el Gene Pool. Conectando estos al módulo Galapagos ya se tiene listo para hacer la optimización.

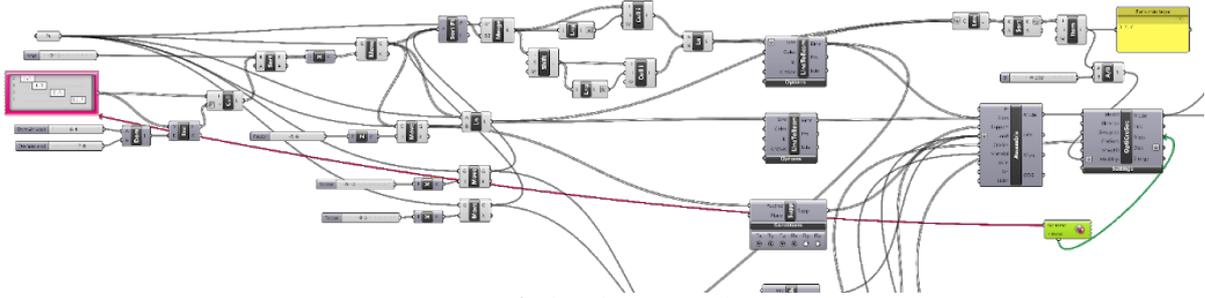


Figura 182 Conexión de Galapagos en el caso 3.

Para ello se hace doble click con el botón izquierdo sobre Galapagos y aparece el menú del módulo. En la pestaña de Options seleccionamos Minimize en el parámetro Fitness, a continuación, pasamos a la pantalla solvers y hacemos click sobre Start Solver.

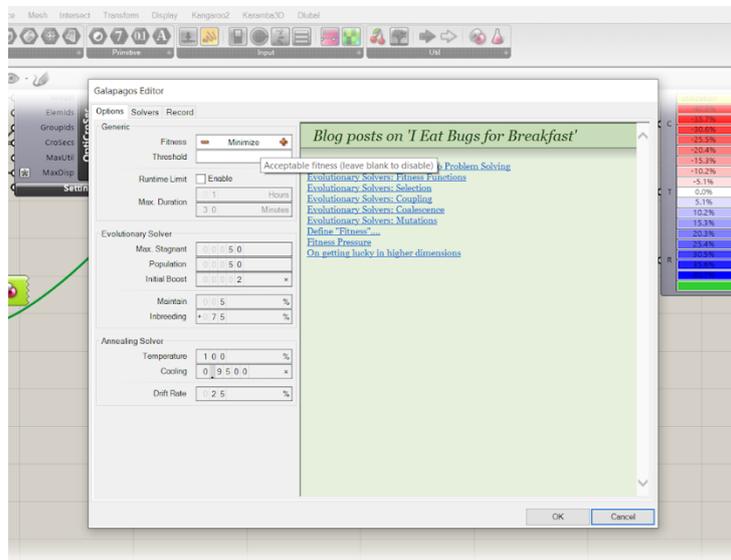


Figura 183 Options del menú de Galapagos del caso 3.

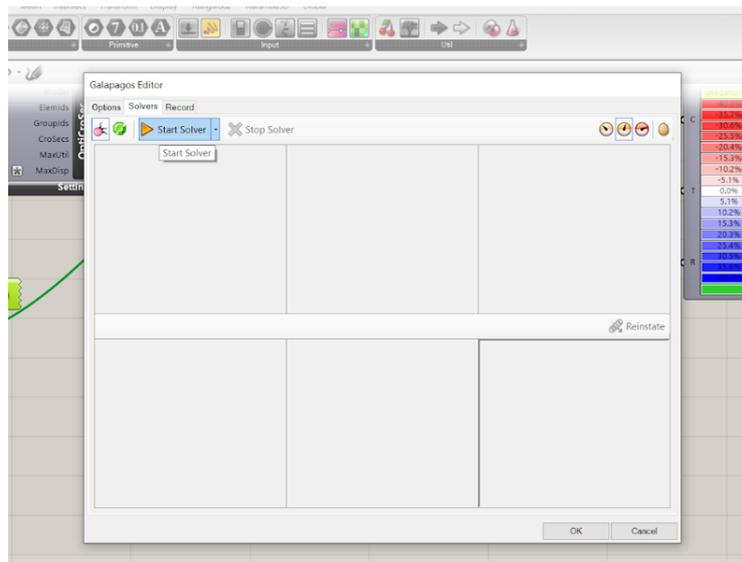


Figura 184 Inicio de la optimización mediante Galapagos del caso 3.

Una vez finalizada la optimización con sus diferentes iteraciones obtenemos que la posición en que la masa es mínima es 8,8 para el primer apoyo intermedio y 3,5 para el segundo y 12,1 para el tercero.

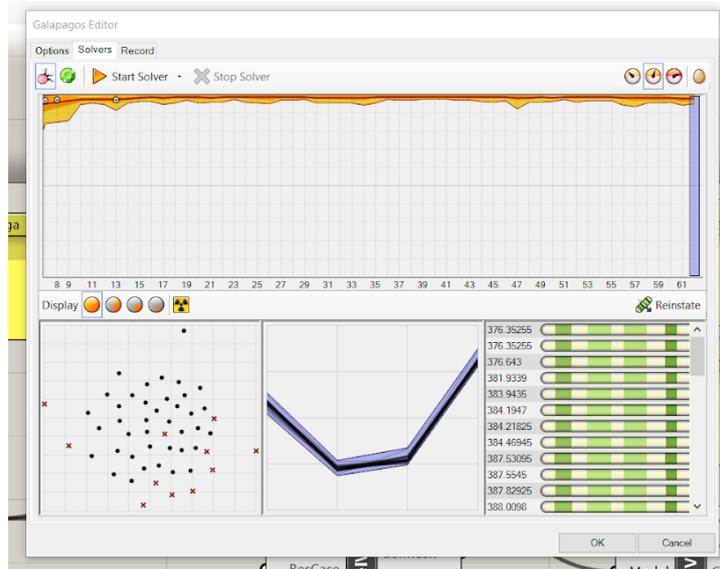


Figura 185 Resultados de la optimización de Galapagos del caso 3.



Figura 186 Resultados en la optimización de los pilares.

1.1.8 Caso 4

Como se desarrolló en la memoria se debe empezar por definir la geometría del modelo. Para ello se comienza creando dos curvas en la ventana de Rhinoceros a partir de las cuales se formará la cubierta, para crear estas curvas se selecciona curva de puntos de control y se van marcando puntos con la forma que se quiera de la curva, si se quiere modificar se selecciona mostrar puntos de control de objeto y se le da la forma que se quiere esta operación se repite dos veces.

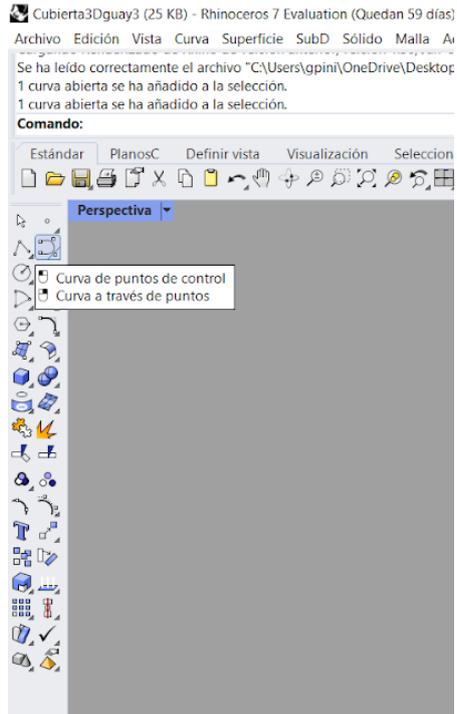


Figura 187 Curva de puntos de control.

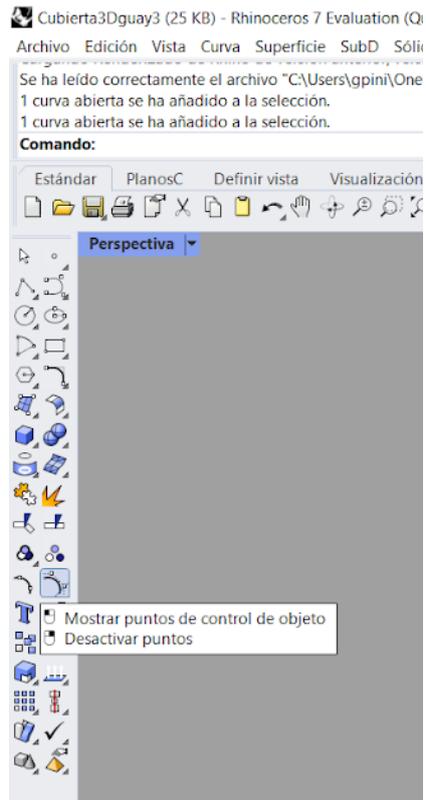


Figura 188 Mostrar puntos de control.

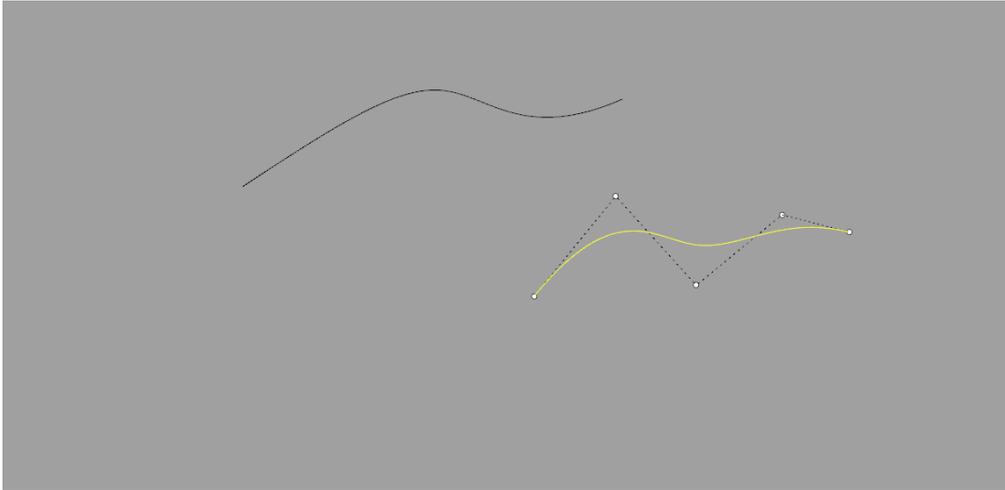


Figura 189 Creación de las 2 curvas base de la cubierta.

Una vez creadas estas curvas se introducen a Grasshopper a partir del módulo Curve (Crv), para ello se hace click con el botón derecho del ratón sobre este y se selecciona Set Multiples Curves, se seleccionan las curvas y se le da al enter.

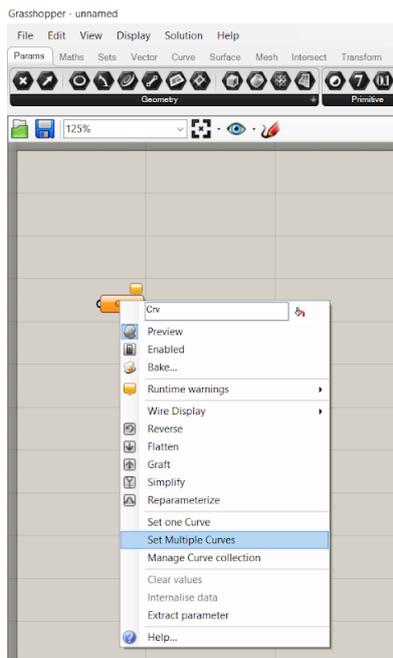


Figura 190 introducción de curvas en Grasshopper.



Figura 191 Curvas introducidas en Grasshopper.

El siguiente paso será crear una superficie a partir de las curvas esto se consigue con el módulo Loft. A partir de esta superficie se desarrollará toda la geometría.

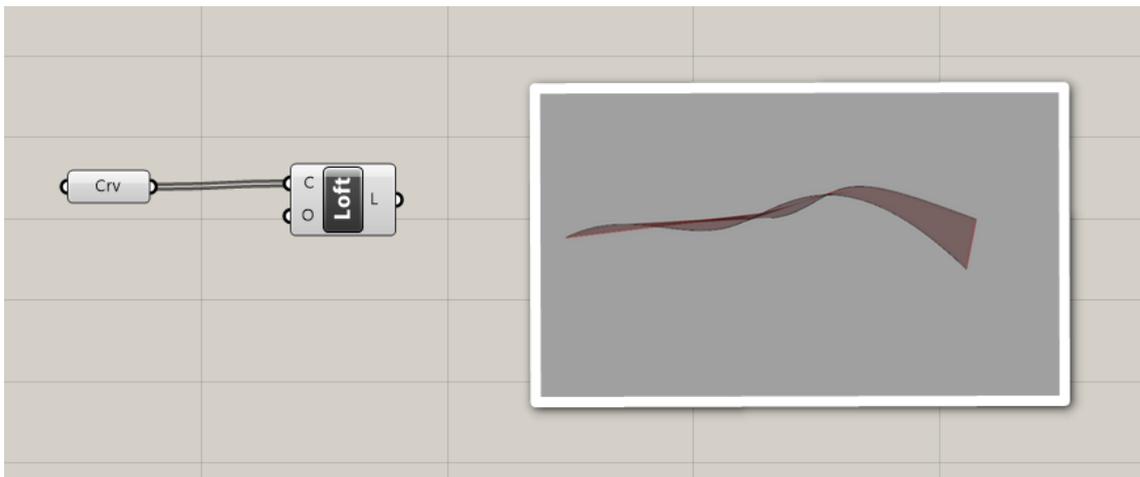


Figura 192 Creación de superficie a partir de dos curvas.

A continuación, se quiere dividir la superficie en pequeñas superficies divididas en 10x10 esto se utilizará para formar las líneas de la parte superior de la cubierta y seguir desarrollando el resto de ella. Para ello se utiliza el módulo Divide Domain2 (Divide) con el que se consigue realizar la división a partir de dos Number Slider de valor 10 y la superficie creada en Loft y el módulo Isotrim (SubSrf) en el que conectando la superficie y la división creada en Divide Domain2 (Divide) se consigue dividir la superficie en pequeñas superficies.

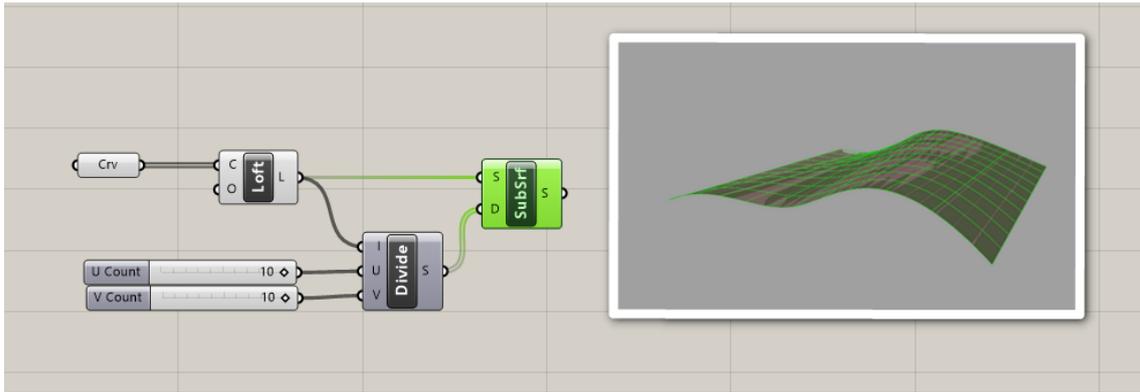


Figura 193 División de la superficie en pequeñas superficies.

El siguiente paso será deconstruir estas superficies a partir del módulo Deconstruct Brep (DeBrep) con el que se obtienen caras, aristas y vértices de estas.

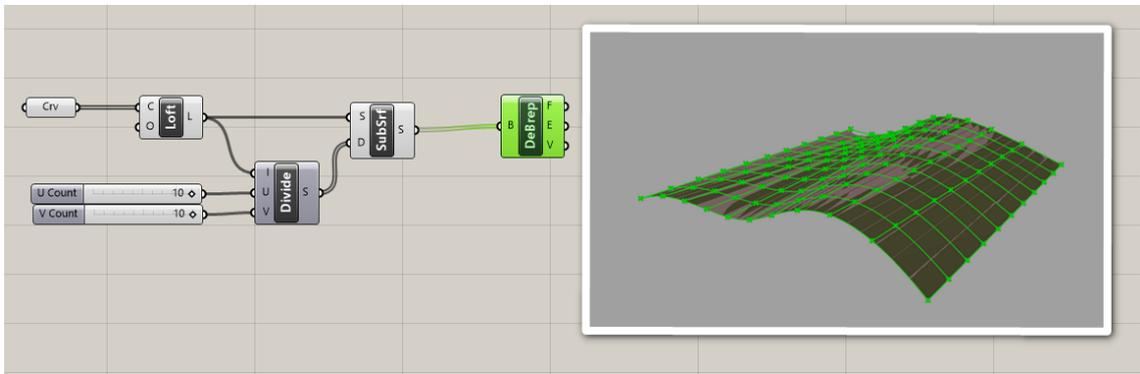


Figura 194 Deconstrucción de las superficies.

A partir de los vértices obtenidos se pueden crear las líneas de la parte superior de la cubierta, utilizando el módulo PolyLine (PLine) se obtienen polilíneas de la parte superior, como se quieren segmentos mas pequeños correspondientes a cada barra se utiliza el módulo Explode con el que las polilíneas se dividen en segmentos entre los vértices. Además, al hacer el Explode se consiguen segmentos rectos mientras que las polilíneas son segmentos curvos que siguen la forma de la superficie.

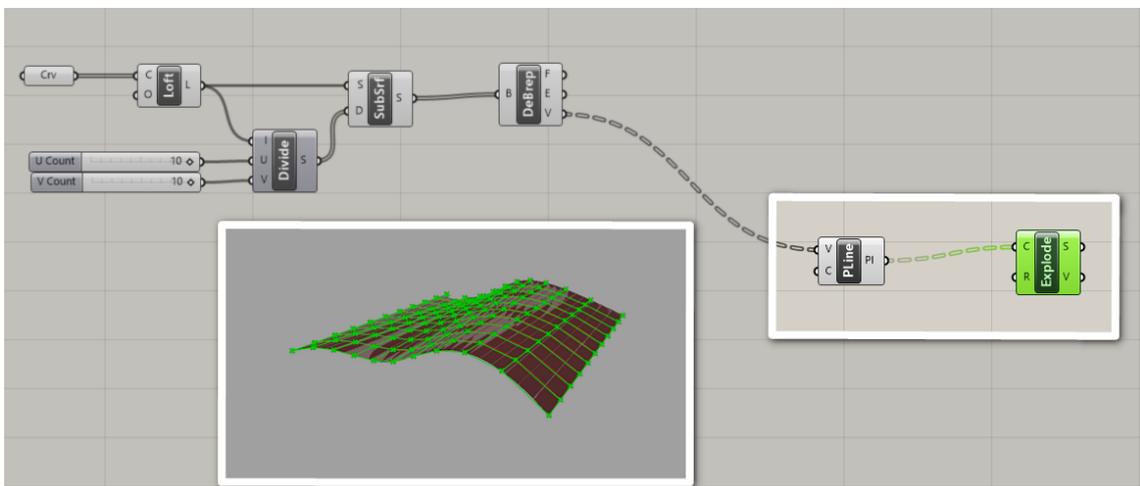


Figura 195 Creación de líneas correspondientes a la parte superior de la cubierta.

El siguiente paso deberá ser la creación de las líneas inferiores e intermedias de la cubierta. Para ello habrá que usar los centroides de las superficies superiores y desplazarlos hacia abajo en dirección Z negativa y a partir de esto formar las líneas que faltan de la cubierta. Para la formación de los centroides se utiliza el módulo Area al que se conecta las caras obtenidas en Deconstruc Brep (DeBrep), estos centroides se desplazan a partir del módulo Move al que se conectan los centroides como geometría base y el vector de traslación se forma a partir de un Number Slider de valor -1 m (grosor de la cubierta) y Unit Z. Estos centroides se corresponden con los vértices de la parte inferior de la cubierta.

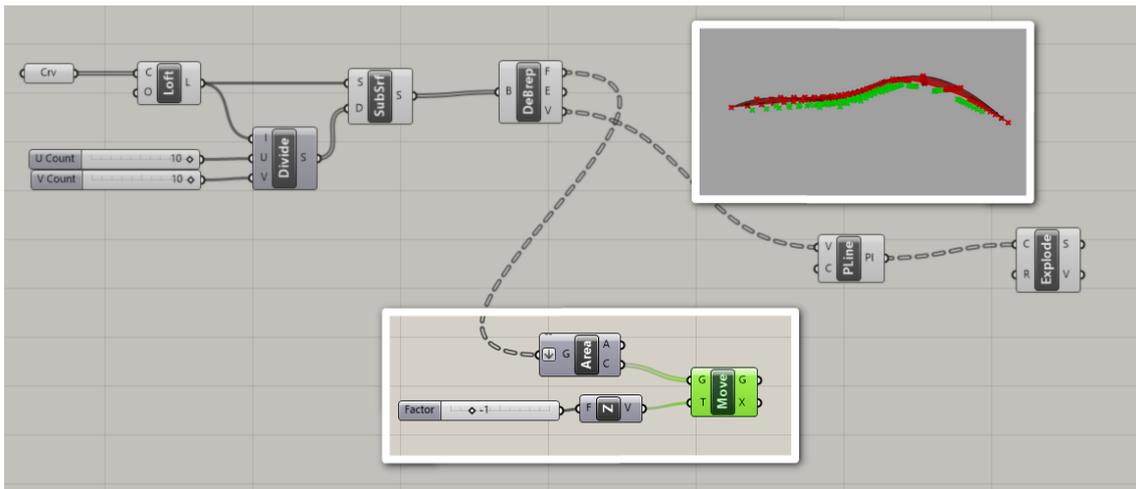


Figura 196 Creación de vértices de la parte inferior de la cubierta.

Para la creación de las líneas de la parte inferior de la cubierta se vértices creados anteriormente se hacen pasar por el módulo Path Mapper para conseguir que las líneas se realicen correctamente se debe introducir una relación en el menú del Path Mapper. Para ello se hace doble click con el botón izquierdo sobre el módulo para acceder en el que introducimos que la fuente que es un entero $\{A\}(i)$ debe de estar dividida en 10 como la parte superior de la cubierta $\{i\}10$, con esto se consigue que al usar el módulo PolyLine (PLine) se creen líneas indeseadas.

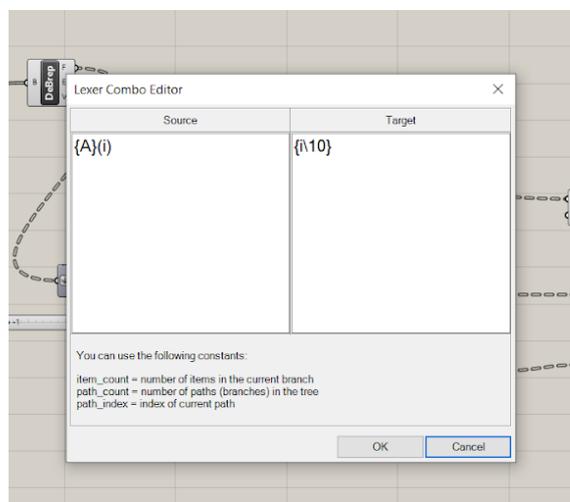


Figura 197 Configuración del módulo Path Mapper.

Seguidamente se conecta la salida de Path Mapper con el módulo PolyLine (PLine) y seguidamente este con Explode obteniendo las líneas en la dirección de las curvas de creación de la cubierta, después se usa el módulo Flip para cambiar de dirección la formación de las líneas al que se conecta la salida de Path Mapper y a continuación se usan los módulos PolyLine (PLine) y Explode para formar los segmentos en dirección perpendicular a las curvas de creación de la cubierta. Finalmente se unen las salidas de los módulos Explode mediante el módulo Merge y se consiguen los segmentos de la parte inferior de la cubierta agrupando los segmentos longitudinales y transversales.

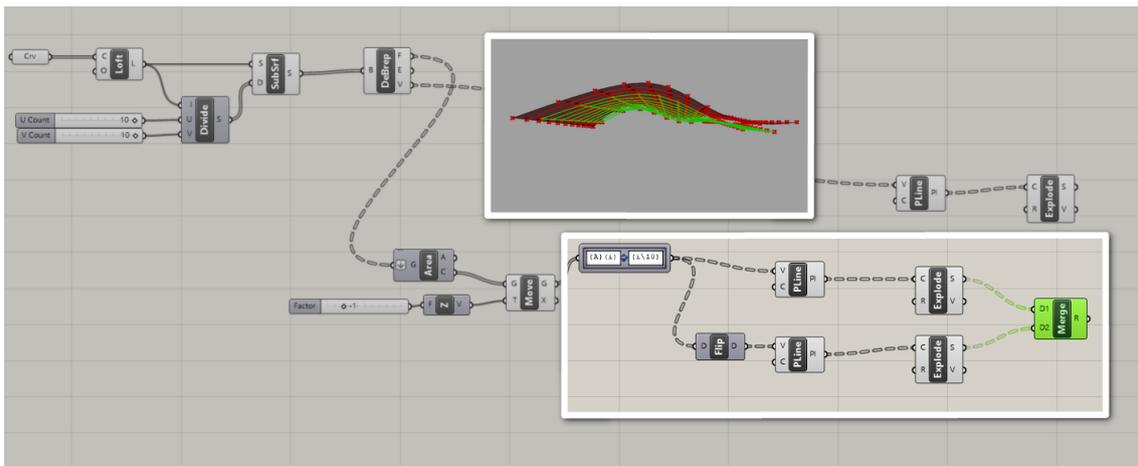


Figura 198 Creación de las líneas correspondientes a la parte inferior de la cubierta.

Para finalizar la cubierta se tienen que crear los segmentos de la parte intermedia de esta, para ello se usa el módulo Line (Ln) al que conectaremos los vértices obtenidos en Deconstruct Brep (DeBrep) y los vértices de la parte inferior obtenidos con Move. En la entrada de estos últimos en el módulo Line (Ln) se debe seleccionar la opción Graft para que se creen correctamente las líneas de lo contrario se formarían numerosas líneas indeseadas.

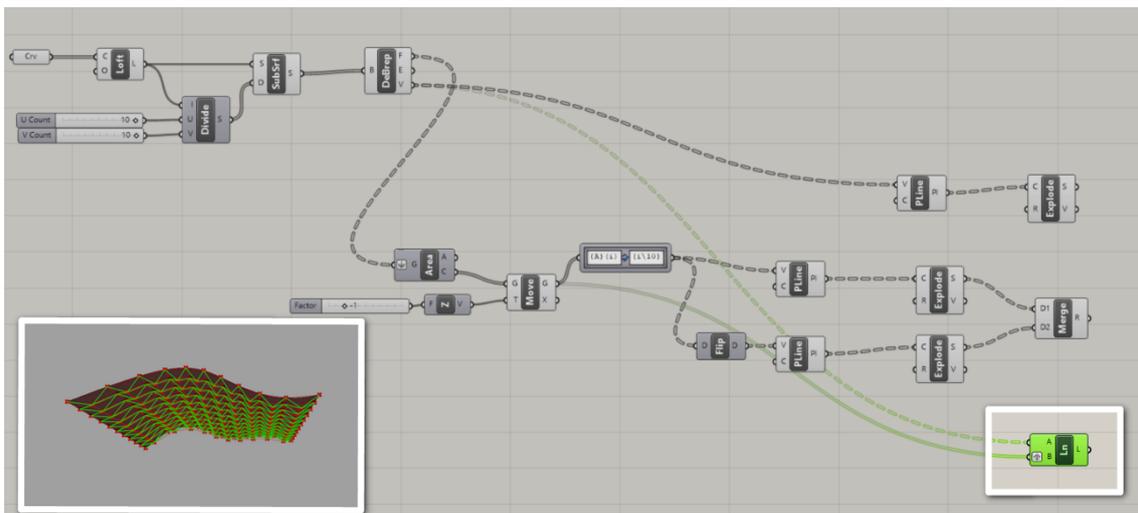


Figura 199 Creación de las líneas correspondientes a la parte intermedia de la cubierta.

Una vez creada la cubierta, se deben crear los pilares. En este caso los pilares son de longitud variable por la forma de la cubierta por lo que para la creación de estos se creara un plano xy a 6 m por debajo del origen, donde se ubica la cubierta, y se calculara la intersección de cuatro líneas que parten desde los vértices de la parte inferior de la cubierta en dirección Z negativa hacia el plano xy creado. Por último, bastara con crear líneas entre los vértices seleccionados de la parte inferior de la cubierta y los puntos de intersección obtenidos en el plano.

Para crear el plano auxiliar se utiliza el módulo Point (Pt) donde se introduce el punto origen, seguidamente este punto se desplaza en dirección Z hasta el valor que interese esto se consigue con el módulo Move con el punto origen como geometría base y un vector de traslación formado por un Number Slider de valor -6 y Unit Z. A continuación, se conecta la salida de Move con el módulo PlaneSurface (PlaneSrf) y se consigue este plano.

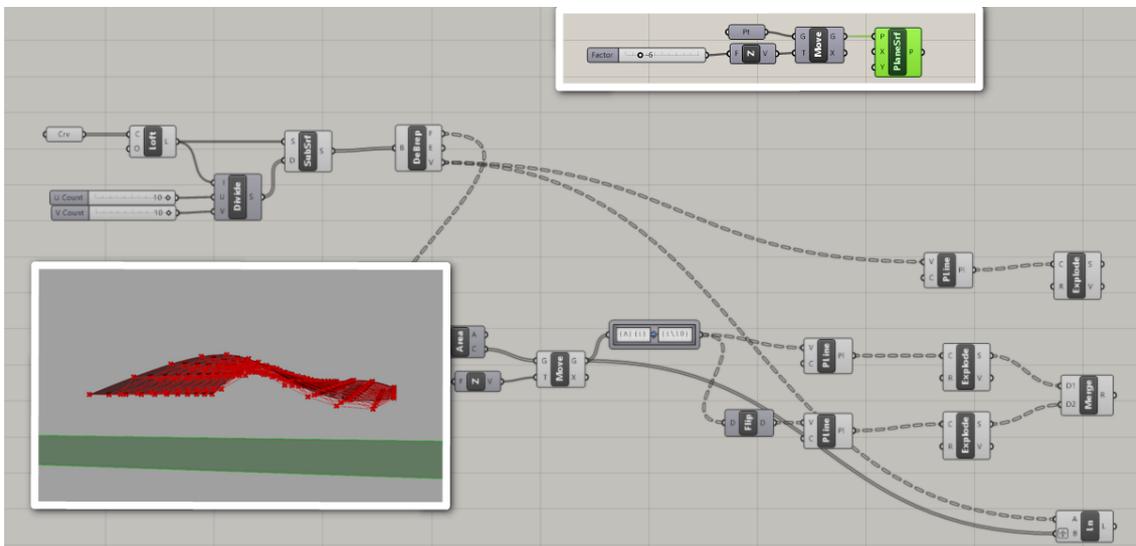


Figura 200 Creación del plano auxiliar.

Ahora se tienen que crear las líneas auxiliares que interseccionaran con el plano auxiliar para ello se usa en primer lugar el módulo List item (Item) para elegir los puntos donde estarán los pilares dentro de los vértices de la parte inferior de la cubierta. Se conectan los vértices a este como la lista base y un Gene Pool con cuatro Sliders y un rango de 100 (número de vértices de la parte inferior) que será lo que permita seleccionar los vértices donde partirán los pilares y ser optimizados con el módulo Galapagos. Para terminar la creación de las líneas auxiliares se utiliza el módulo Line SDL (Line) donde se conectan los puntos obtenidos en List ítem (Item) y la longitud que se le quiere dar a partir de un Number Slider en este caso 18 para asegurarse la intersección de esta con el plano.

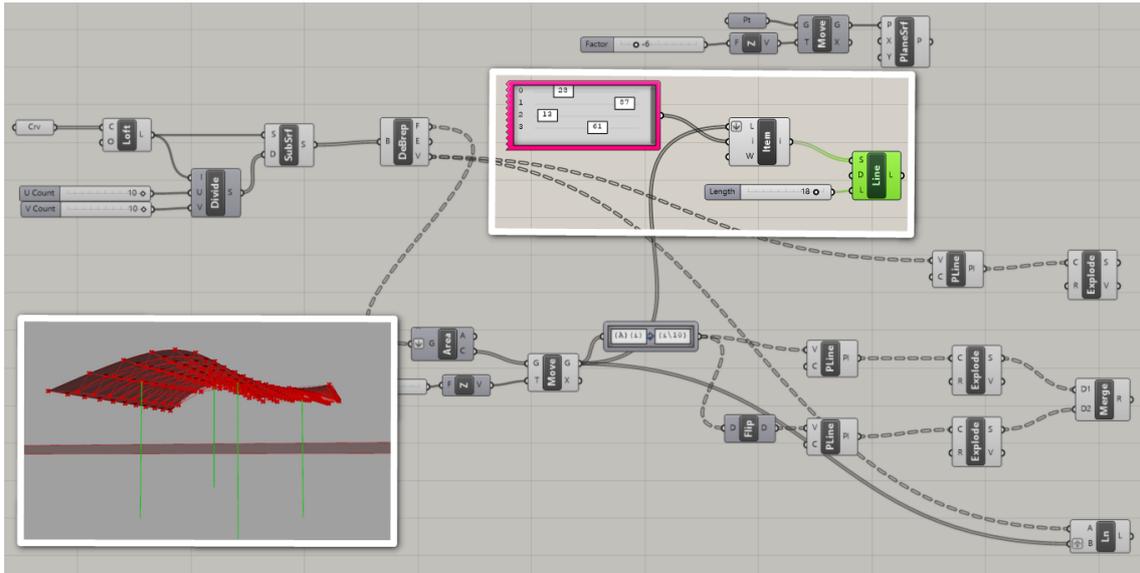


Figura 201 Creación de las líneas auxiliares.

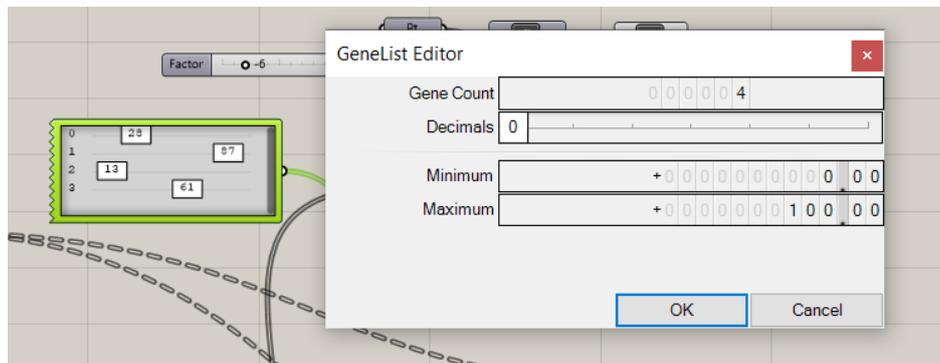


Figura 202 Configuración del Gene Pool.

Por último, se calcula intersección con el módulo Surface / Line (SLX), en el que se introduce el plano y las líneas auxiliares obteniendo los puntos de intersección entre estos. Para crear las líneas de los pilares se utiliza el módulo Line (Ln) al que se conectan los puntos seleccionados en List ítem (Item) y los puntos de intersección.

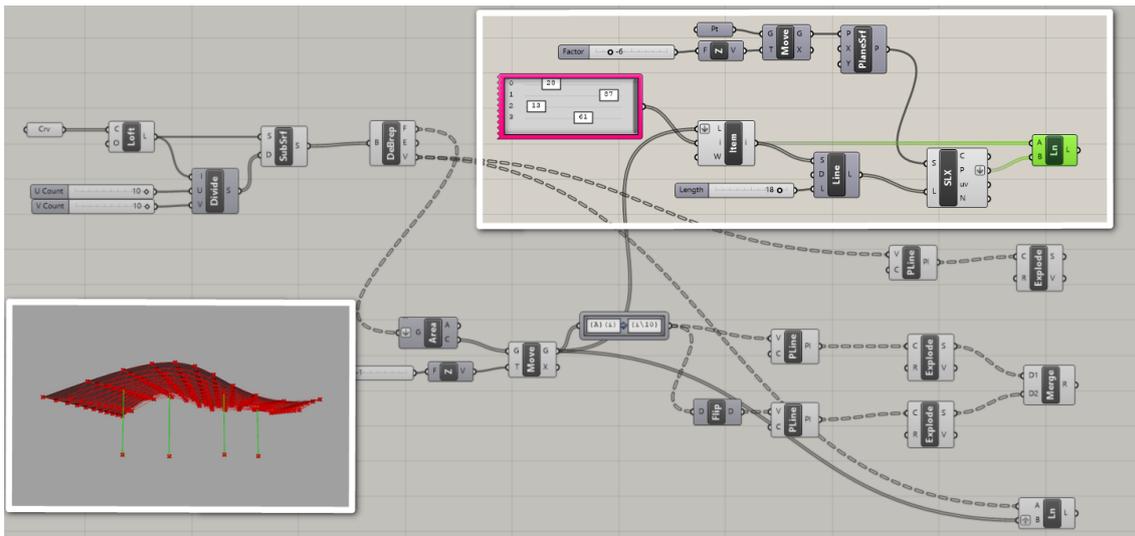


Figura 203 Creación de las líneas pertenecientes a los pilares.

A continuación, se pasa a la creación de elementos y selección de material y secciones. Se comienza creando las barras a partir de las líneas para ello se utiliza el módulo Line To Beam (LineToBeam) basta con conectar las líneas creadas con este. En este caso se utiliza uno para los pilares, otro para la parte superior de la cubierta, otro para la parte intermedia de la cubierta o diagonales y otro para parte inferior de la cubierta.

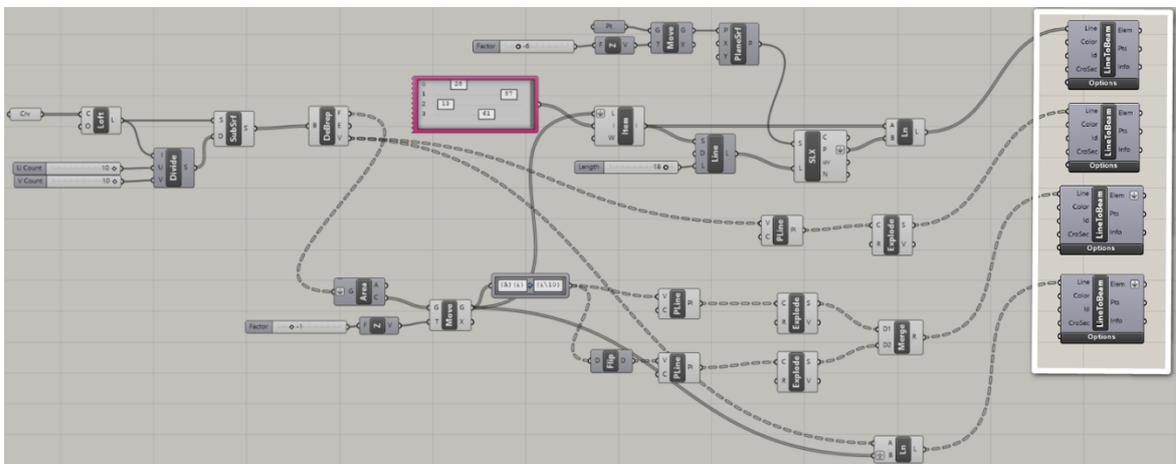


Figura 204 Creación de barras del caso 4.

Además, se dan nombres a las barras para la creación de grupos de elementos a posteriori. Se hace click con el botón derecho del ratón sobre Id, se selecciona Set Text y se introduce el nombre que se le quiere dar a las barras. En este caso a cada módulo se les ha puesto los siguientes nombres: Pilar, Superior, Diagonal y Inferior.

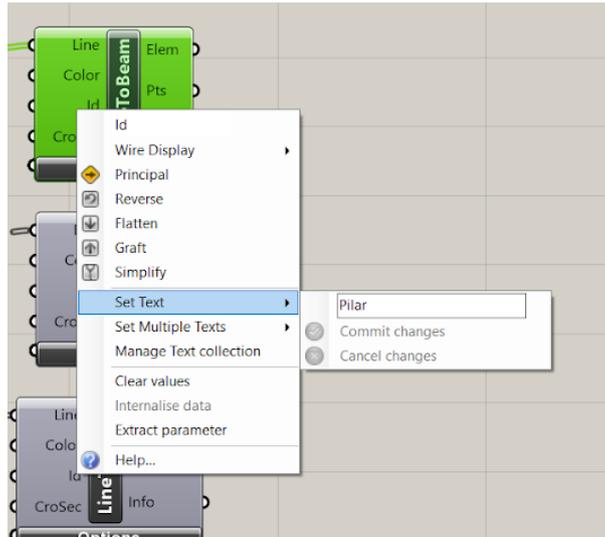


Figura 205 Introducción de texto en la entrada Id del módulo Line to Beam del caso 4.

También después de seleccionar las secciones se conectará estos módulos las secciones que les correspondan en la entrada CroSec.

Después se deben definir los apoyos mediante el módulo Support (Supp). En este caso los apoyos se quieren en los puntos creados como base de los pilares correspondientes a los puntos intersección. Para definir los apoyos se conectan estos puntos a Support y se seleccionan las traslaciones y rotaciones que se quieren que estén impedidas (Tx, Ty, Tz y Rx, Ry, Rz).

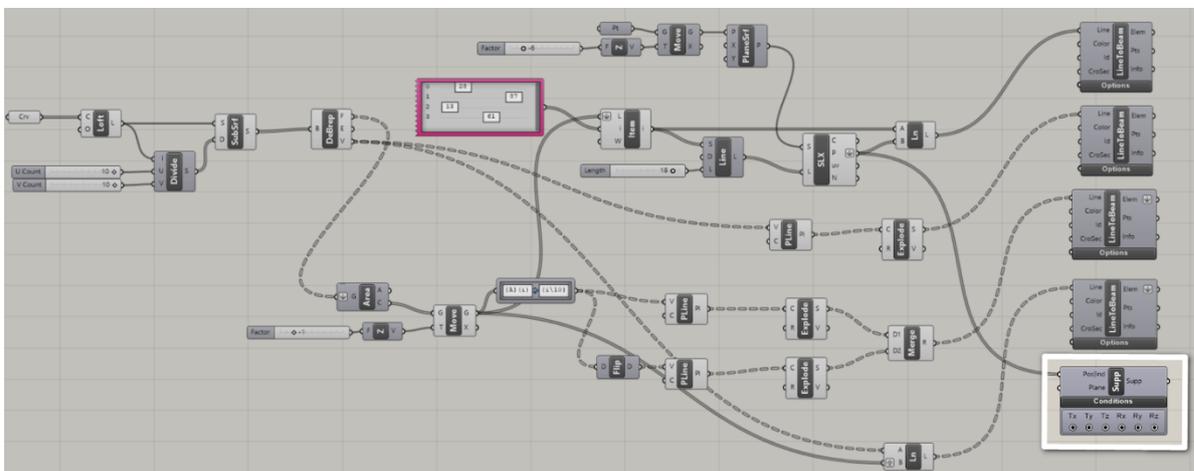


Figura 206 Creación de apoyos del caso 4.

Seguidamente se procede a definir las cargas para ello se utilizará el módulo Loads. Para empezar, se define la carga gravitatoria para ello basta con seleccionar en el desplegable Type of Load la opción Gravity ya que por defecto esta esta orienta en el sentido negativo del eje Z.

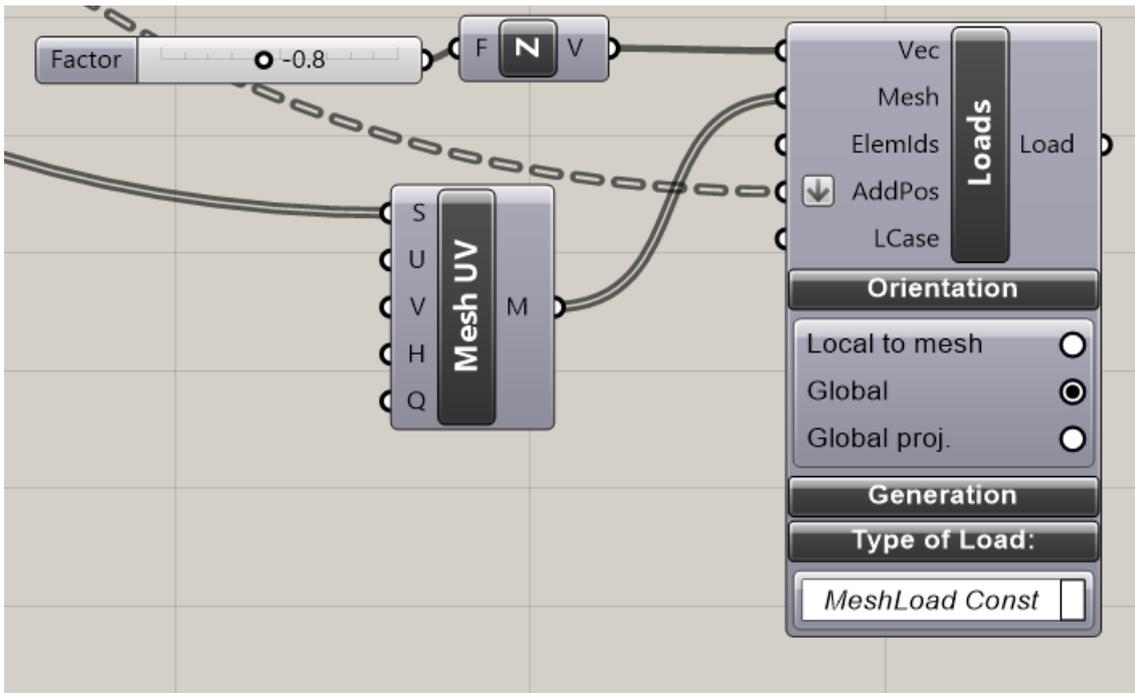


Figura 209 Creación de la carga de malla constante del caso 4 ampliada.

Para la selección del material se usa el módulo Material Selection (MatSelect), para seleccionar el material de este caso que es el acero S275 basta con seleccionar en la pestaña de Family Steel y en la pestaña de Name S275.



Figura 210 Selección de material del caso 4.

Para la selección de las secciones se usará el módulo Cross Section Range Selector (CroSecRSelect). Para seleccionar los perfiles basta con elegir el país en County, la forma en Shape y la familia en Family. En este caso se utilizan perfiles HEB para los pilares y perfiles QRO para la celosía de la cubierta.

Se debe unir las secciones con los módulos Line to Beam según corresponda, ya que en este caso los perfiles son diferentes.

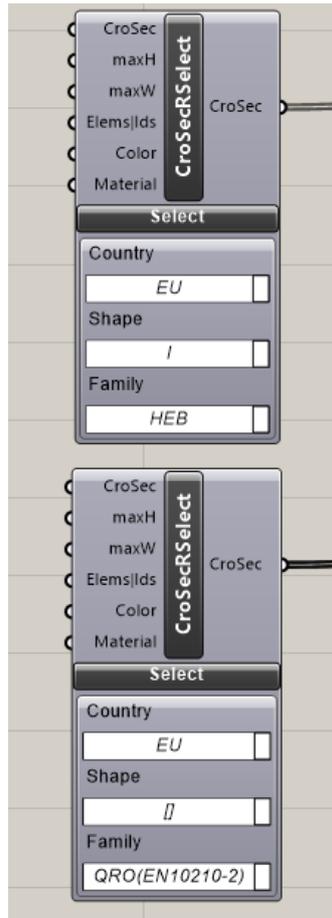


Figura 211 Selección de las secciones del caso 4.

En este caso también se crean grupos de elementos para definirlos se usan los módulos Make Element-Set (MkSet), Disassemble Element (Disassemble) y Panel.

Primero se conectan los elementos creados con Disassemble Element (Disassemble) y después se conecta la salida ElemId a la entrada ElemIds de Make Element-Set (MkSet). Para el grupo se define un nombre haciendo click con botón derecho sobre SetId y seleccionando Set Text, en este caso se ponen los siguientes nombres: Pilares, CSuperior, CInferior y Diagonal. También se le da color a los grupos a través de un panel con el nombre del color que se desee en inglés.

Esto permite optimizar las secciones por grupos y aportarles color para identificar los grupos.

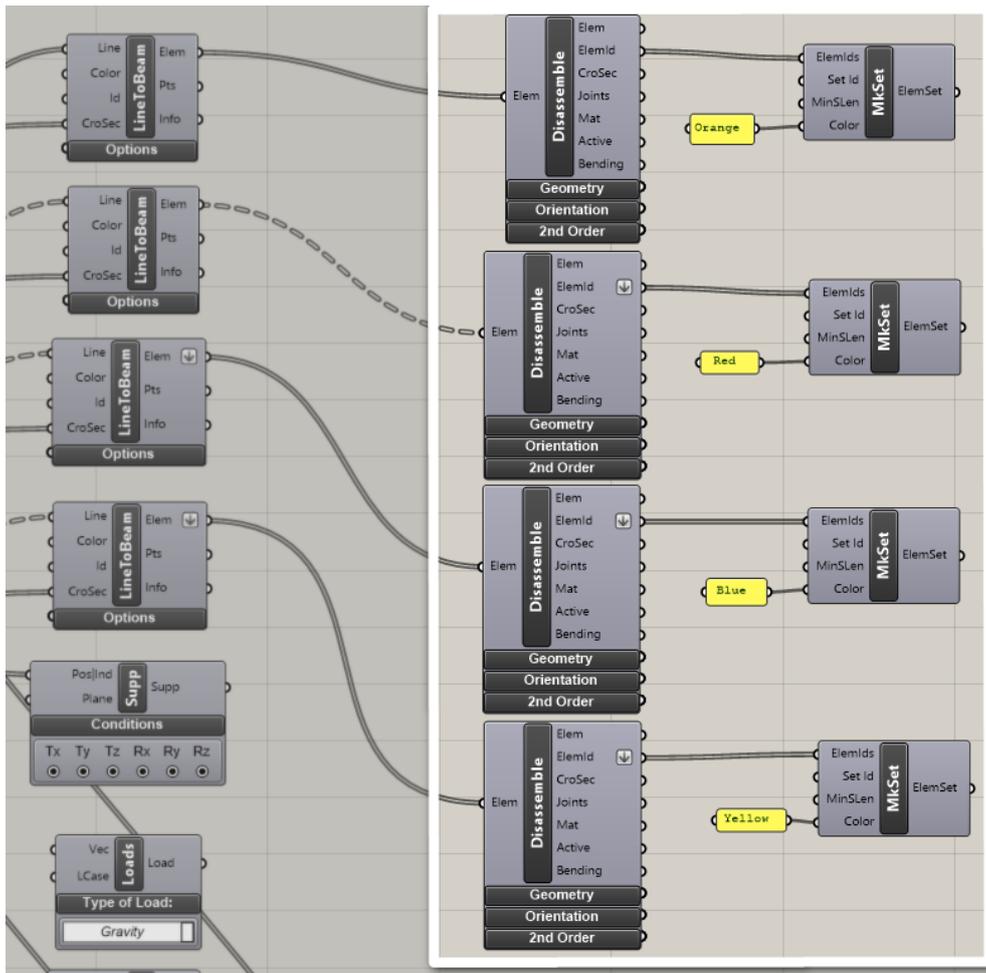


Figura 212 Creación de grupos.

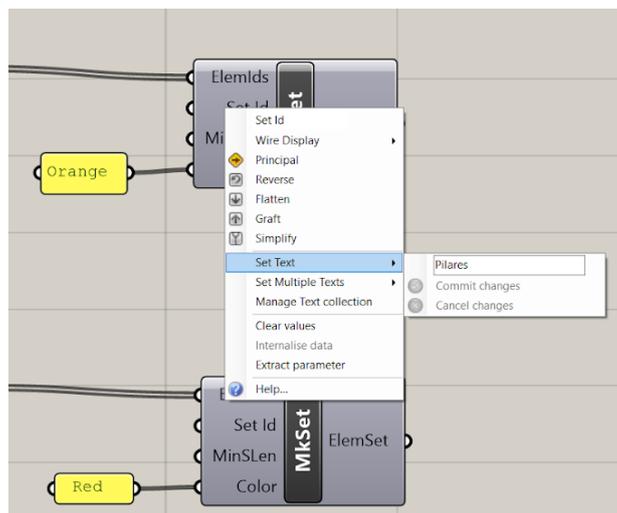


Figura 213 Introducción de nombre de grupo.

Una vez creados los elementos y seleccionados el material y las secciones se procede a ensamblar el modelo y optimizar las secciones. Para ensamblar el modelo se usará el

módulo Assemble Model (Assemble), basta con conectar las barras, apoyos, cargas, material y grupos de secciones.

Para que las cargas estén en un mismo caso de cargas se debe activar el Flatten en la entrada Load con la que se consigue que todos los parámetros introducidos estén en una única lista. De lo contrario el programa crearía un caso de carga para cada tipo de carga que se introduzca en el módulo.

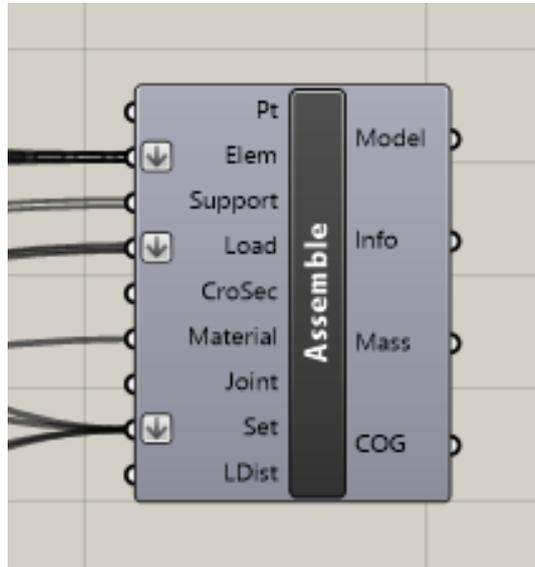


Figura 214 Ensamblaje del modelo del caso 4.

Seguidamente se procede a optimizar las secciones del modelo para ello se usa el módulo Optimize Cross Section (OptiCroSec). En el se introduce el modelo creado con Assemble y las secciones creadas.

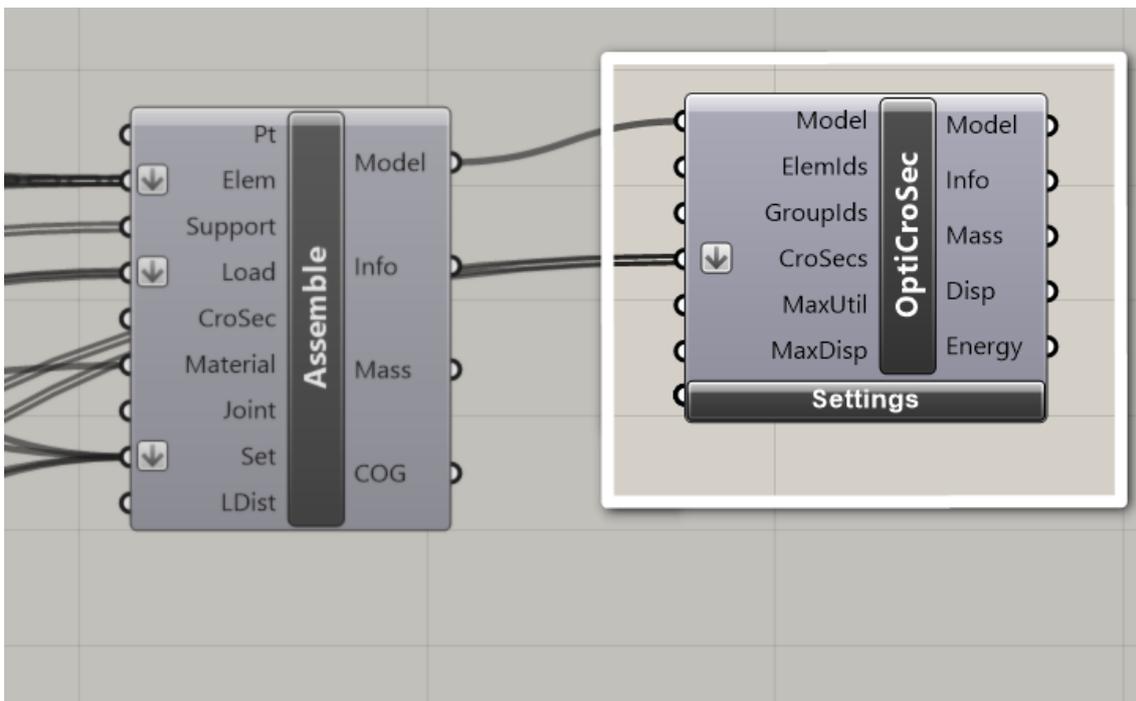


Figura 215 Optimización de las secciones del caso 4.

También se deben añadir el nombre de los grupos de elementos que se quiere que tengan el mismo perfil, para ello se hace click con el botón derecho del ratón sobre GroupIds y se selecciona Set Multiple Text. En este caso se quiere que tengan los mismos perfiles los grupos CSuperior, CInferior y Diagonal.

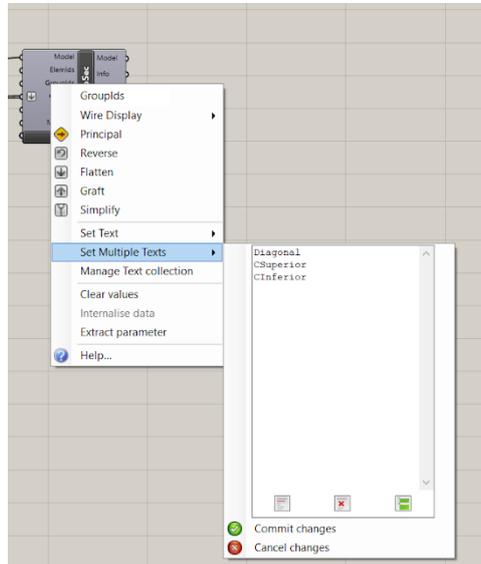


Figura 216 Introducción de grupos al módulo Optimize Cross Section.

En esta parte se consigue ver el modelo y barras renderizadas y se permite visualizar diferentes resultados con valores numéricos y con leyendas de colores.

Para visualizar el modelo se hace pasar el modelo por el módulo Model View (ModelView) con el que se ven todos los elementos del modelo como cargas, nodos apoyos, deformación del modelo y barras sin renderizar.

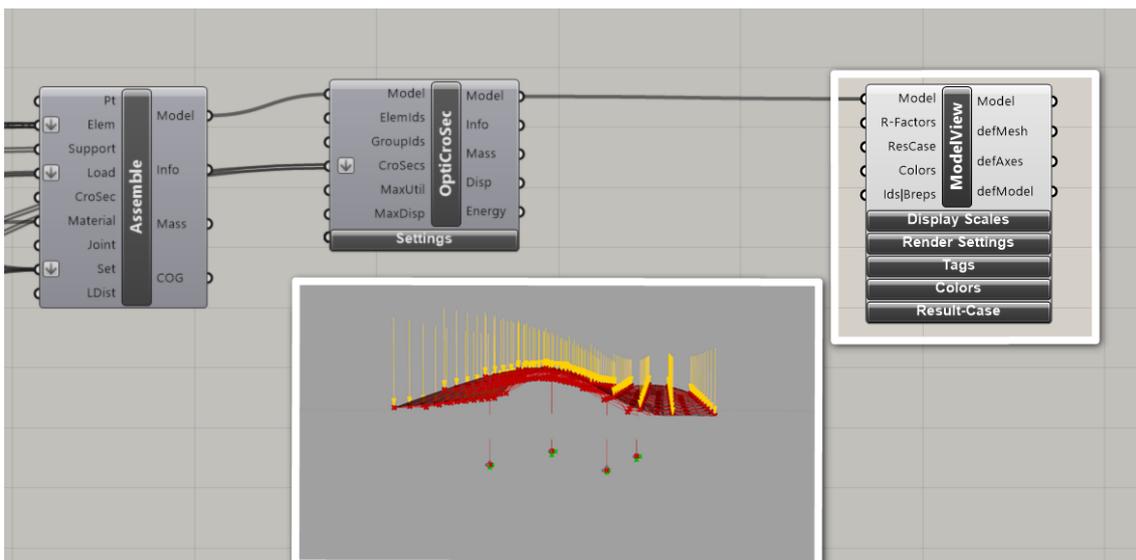


Figura 217 Visualización del modelo del caso 4.

A continuación, se hace pasar el modelo por el módulo Beam View (BeamView) con el que se consigue la renderización de las barras con el que se incluye las fuerzas que soportan las secciones.

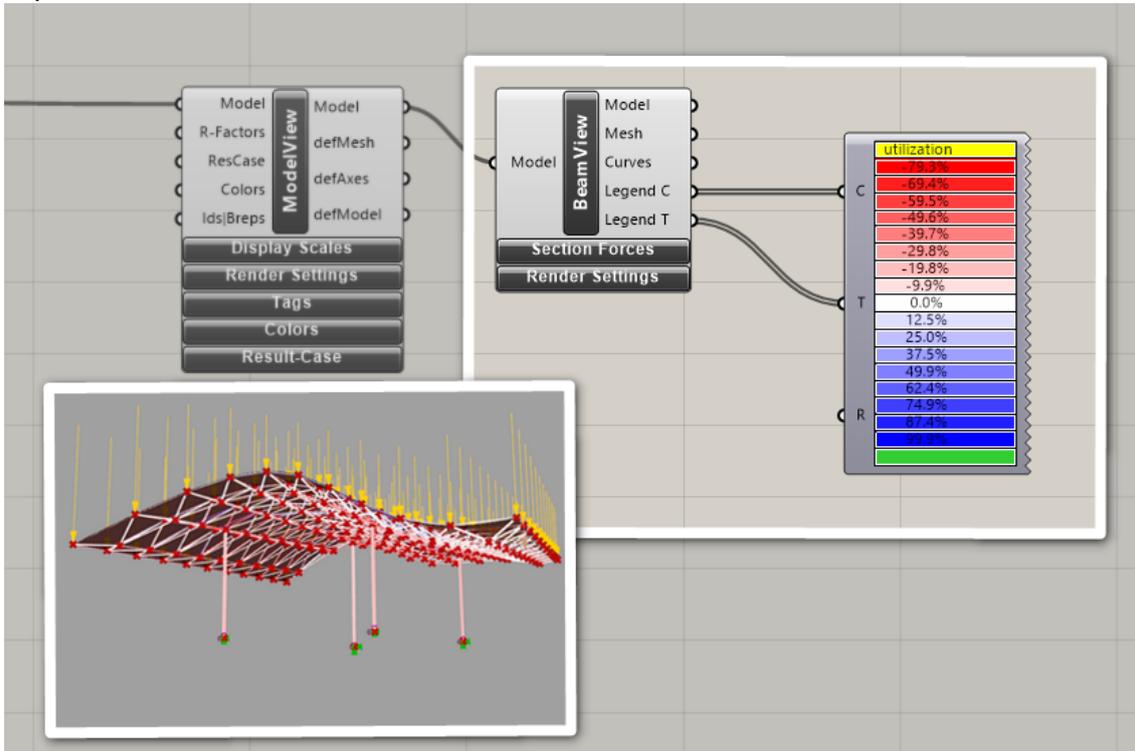


Figura 218 Renderización de las barras del caso 4.

También con el uso del módulo Beam Resultant Forces (B-Res-Force) introduciendo en el modelo se consigue los valores máximos de axil, cortante y momento que actúan sobre cada una de las barras. Con un panel se pueden observar estos valores en una lista como se ve en la figura.

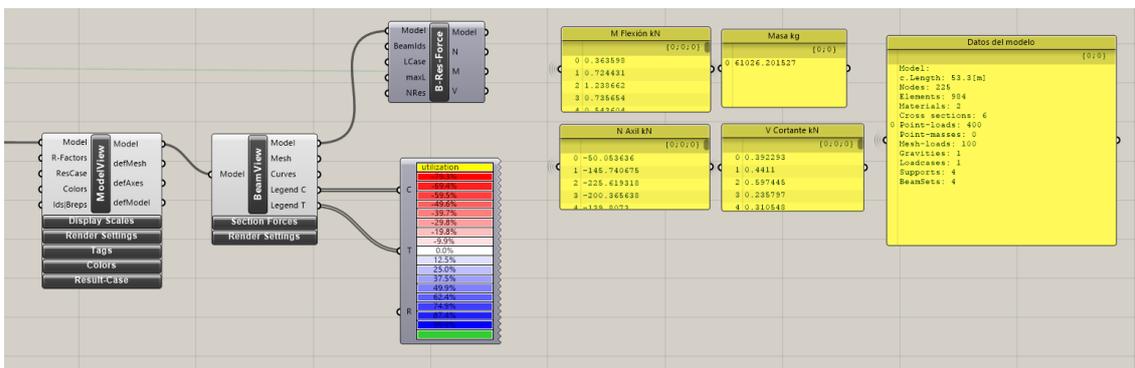


Figura 219 Visualización de resultados del caso 4.

Además, se añade el módulo Export Model to DStV (ExToDStV) para exportar el modelo a RFEM.

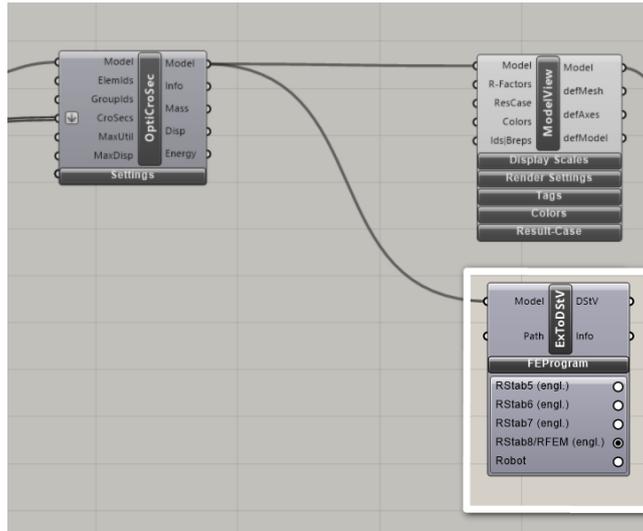


Figura 220 Exportación del modelo a RFEM.

Para finalizar se usa el módulo Galapagos, que es un optimizador con algoritmos genéticos. Para comenzar el Fitness es lo que se quiere optimizar en este caso el momento que se obtiene en el módulo Beam Resultant Forces (B-Res-Force) y el Genome es lo que se modifica para conseguir la optimización en este caso el Gene Pool. Conectando estos al módulo Galapagos ya se tiene listo para hacer la optimización.

Para ello se hace doble click con el botón izquierdo sobre Galapagos y aparece el menú del módulo. En la pestaña de Options seleccionamos Minimize en el parámetro Fitness, a continuación, pasamos a la pantalla solvers y hacemos click sobre Start Solver.

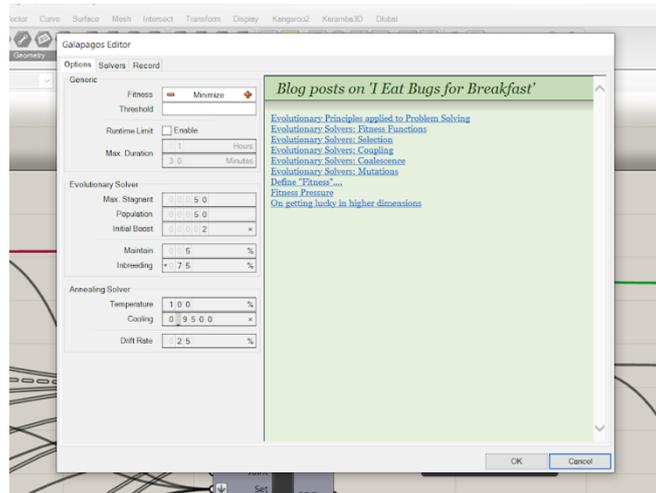


Figura 221 Options del menú de Galapagos del caso 4.

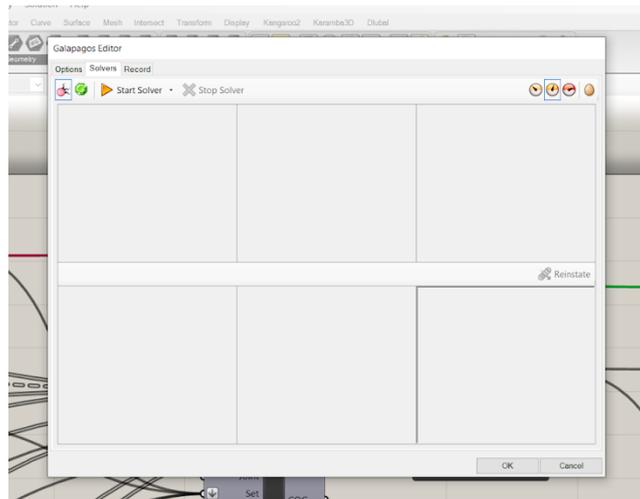


Figura 222 Inicio de la optimización mediante Galapagos del caso 4.

Una vez finalizada la optimización con sus diferentes iteraciones obtenemos que el momento es mínimo para la posición de los pilares que se corresponde con los vértices 13, 28, 61 y 87.

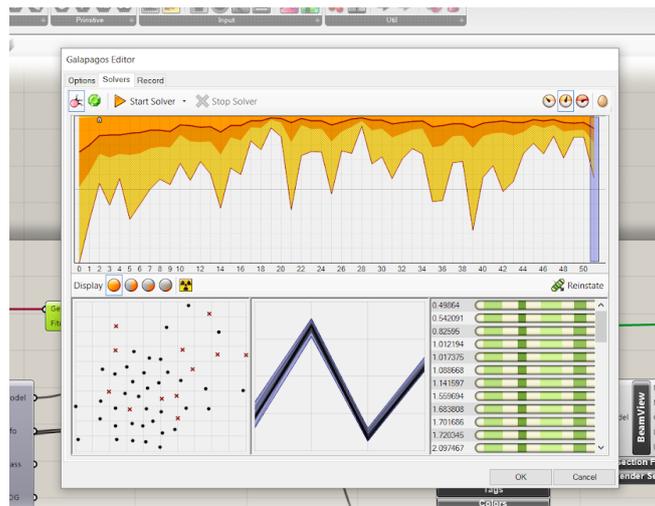


Figura 223 Resultados de la optimización de Galapagos del caso 4.

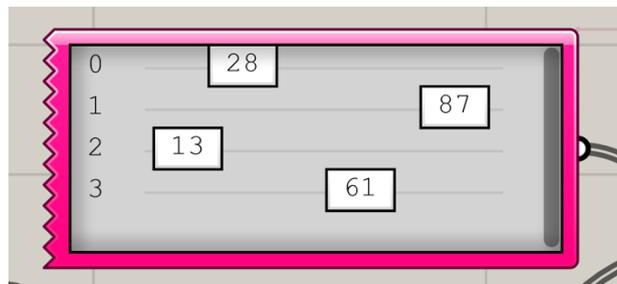


Figura 224 Resultados en la optimización de los pilares del caso 4.

1.2 Anexo 2. Módulos utilizados.

Se procede a realizar una clasificación de los módulos utilizados y una breve explicación de estos en los diferentes casos tratados. Se explicarán sus entradas y salidas más importantes para el desarrollo de la metodología presentada.

Se diferencian dos tipos de módulos principales los que corresponden a Grasshopper y los correspondientes a Karamba.

Módulos de Grasshopper

- Area: resuelve propiedades de área para breps, mallas y curvas planas cerradas.



Figura 225 Módulo Area.

Como entrada se tiene el parámetro Geometry (G) que pueden ser breps, mallas o curvas planas cerradas. Como salida se tienen los parámetros Area (A), que es el área de la geometría y Centroid (C) que son los centroides de las áreas de la geometría.

- Construct Domain (Dom): crea un dominio numérico entre dos extremos numéricos.

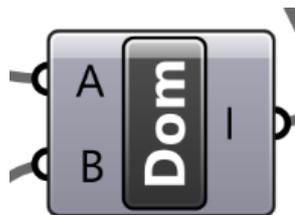


Figura 226 Módulo Construct Domain.

Como entrada se tiene los parámetros Domain start (A), que es el valor numérico en el que empieza el dominio y Domain end (B) que es el valor numérico en que termina el dominio. Como salida se tiene el parámetro Domain(I) que contiene el dominio numérico entre A y B.

- Cull Index (Cull i): elimina elementos indexados de una lista.



Figura 227 Módulo Cull Index.

Como entrada se tienen los parámetros List (L), lista a eliminar e Índices (I), que son los índices para no se han de eliminar. Como salida se tiene el parámetro List (L) que es la lista eliminada.

- Cull Pattern (Cull): elimina elementos de una lista siguiendo un patrón de repetición.



Figura 228 Módulo Cull Pattern

Como entrada se tienen los parámetros List (L), lista para eliminar y Culling Pattern que es el patrón de eliminación. Como salida se tiene el parámetro List (L) que contiene la lista eliminada.

- Curve (Crv): contiene una colección de curvas genéricas.



Figura 229 Módulo Curve.

- Divide Domain2 (Divide): divide un dominio bidimensional en segmentos iguales.

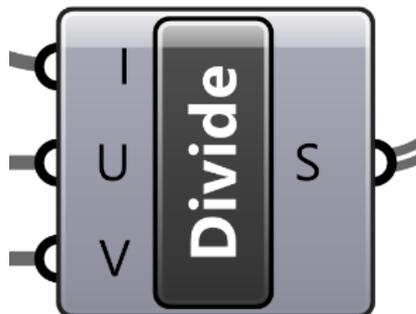


Figura 230 Módulo Divide Domain2.

Como entrada se tienen los parámetros Domain (i), que es el dominio base, U Count (U), que es el número de segmentos en dirección {u} y V Count (V) que es el número de segmentos en dirección {v}. Como salida se tiene el parámetro Segments (S) que se corresponde con los segmentos individuales.

- Division (A/B): división matemática.



Figura 231 Módulo Division.

Como entrada se tiene el parámetro A ítem para dividir (dividendo) y el parámetro B que es el ítem por el que se divide (divisor). Como salida se tiene el parámetro Result (R) que es el resultado de la división.

- Deconstruct Brep (DeBrep): divide un brep en sus constituyentes.

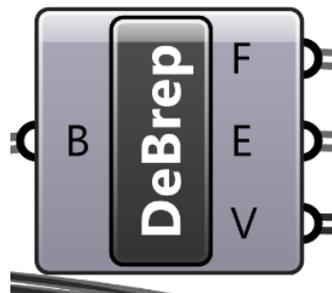


Figura 232 Módulo Deconstruct Brep.

Como entrada tiene el parámetro Brep (B) que es el brep base. Como salida se tienen los parámetros Faces (F), que son las caras del brep, Edges (E), que son las aristas del brep y Vertices (V) que son los vértices del brep.

- Equality (Equals): Comprueba la (des)igualdad de dos números.

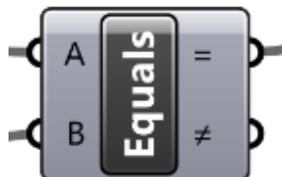


Figura 233 Módulo Equality

Como entrada se tiene el parámetro First Number (A) que es el numero que se quiere comparar y el parámetro Second Number (B) que es el numero con el que se compara.

Como salida se tiene el parámetro Equality (=) que muestra el valor True cuando $A=B$ y el parámetro Inequality (\neq) que muestra el valor True cuando $A\neq B$.

- Explode: divide una curva en pequeños segmentos.

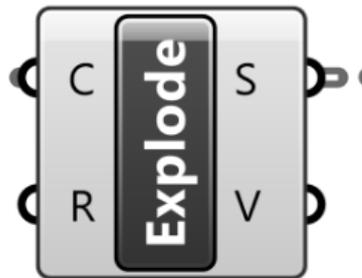


Figura 234 Módulo Explode.

Como entrada se tienen los parámetros Curve (C), que es la curva a dividir, y Recursive (R). Como salida se tienen los parámetros Segments (S), que son los segmentos creados, y Vértices (V) que son los vértices de los segmentos creados.

- Flip Matrix (Flip): cambia una matriz a árbol de datos intercambiando filas y columnas.



Figura 235 Módulo Flip Matrix.

Como entrada se tiene el parámetro Data (D) que es la matriz que se quiere cambiar y como salida se tiene el parámetro Data (D) que son los datos de la matriz cambiados.

- Gene Pool (Genes): contiene una colección de genes, variables con forma de Slider y mismas características de rango y decimales.

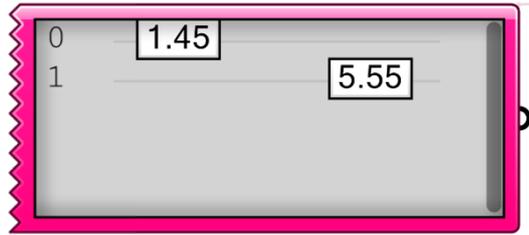


Figura 236 Módulo Gene Pool.

Si se hace doble click con el botón izquierdo sobre el módulo se accede al menú del Gene Pool en el que se puede seleccionar el número de genes (Sliders), los decimales y el rango de esos.

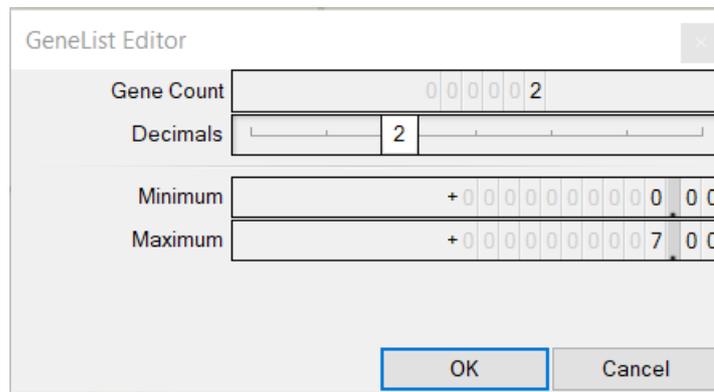


Figura 237 Menú del Gene Pool.

- Includes (Inc): testea un valor numérico para ver si está incluido en un dominio numérico.



Figura 238 Módulo Includes.

Como entrada se tienen los parámetros Value (V), valor a testear y Domain (D) que es el dominio con el que testea. Como salida se tienen los parámetros Includes (I), verdadero si el valor está incluido en el dominio, y Deviation (D) que es la distancia entre el valor testado y el valor más cercano dentro del dominio.

- Isotrim (SubSrf): extrae un conjunto isoparamétrico de una superficie.

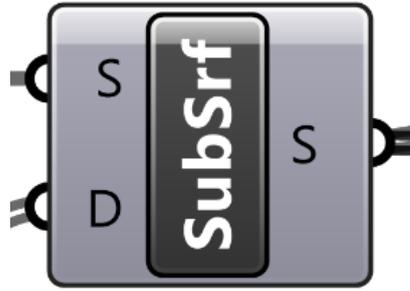


Figura 239 Módulo Isotrim.

Como entrada se tienen los parámetros Surface (S), que es la superficie base, y Domain (D) que es el dominio del conjunto. Como salida se tiene el parámetro Surface (S) que es el conjunto de la superficie base.

- Legend: muestra una leyenda formada por colores y etiquetas.

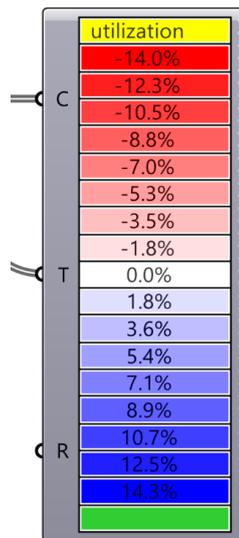


Figura 240 Módulo Legend.

Como entrada tiene los parámetros Colour (C) y Tags (T) que se obtienen del módulo BeamView.

- Length (Len): mide la longitud de una curva.



Figura 241 Módulo Length.

Como entrada tiene el parámetro Curve (C) que es la curva o curvas que se quieren medir. Como salida tiene el parámetro Length (L) que es la medida de la curva o curvas.

- Line (Ln): crea una línea entre dos puntos.



Figura 242 Módulo Line.

Como entrada tiene el parámetro Start Point (A) y End Point (B) que son el punto de inicio y el final de la línea respectivamente. Como salida tiene el parámetro Line (L) que es la línea creada.

- Line SDL (Line): crea una línea a partir de un punto inicial, tangente y longitud.

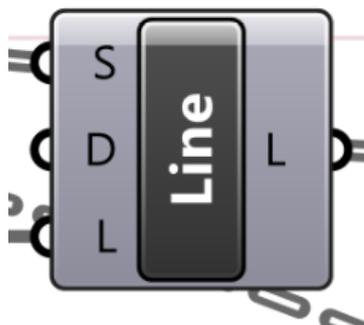


Figura 243 Módulo Line SDL.

Como entrada se tienen los parámetros Start (S), que es el punto inicial, Direction (D), que es la línea tangente, y Length (L) que es la longitud de la línea. Como salida se tiene el parámetro Line (L) que es la línea creada.

- List Item (Item): Recupera un valor específico de una lista.

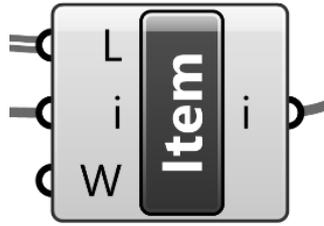


Figura 244 Módulo List Item.

Como entrada se tienen los parámetros List (L) que es la lista base, Index (i) que es el índice del ítem y Wrap (W). Como salida se tiene el parámetro Item (i) que es el ítem con índice i.

- List Length: mide la longitud de una lista.



Figura 245 Módulo List Length.

Como entrada se tiene el parámetro List (L), lista base y como salida se tiene el parámetro Length (L) que es el número de elementos que tiene la lista (L).

- Loft: crea una superficie a partir de un conjunto de curvas.



Figura 246 Módulo Loft.

Como entrada se tienen los parámetros Curves (C), que son las curvas de sección, y Options (O). Como salida se tiene el parámetro Loft (L) que es la superficie creada.

- Merge: une un grupo de datos.



Figura 247 Módulo Merge.

Como entrada tiene los parámetros Data 1 (D1), Data 2 (D2) ... que son los datos que se quieren unir. Como salida tiene el parámetro Result (R) que es el resultado de la unión.

- Mesh Surface (Mesh UV): Crea una superficie mallada UV.

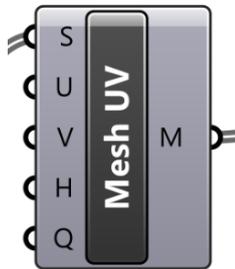


Figura 248 Módulo Mesh Surface.

Como entrada se tienen los parámetros Surface (S), que es la superficie geométrica, U Count (U), que es el número de quads en dirección U, V Count (V), que es el número de quads en dirección V, Overhang (H) y Equalize (Q). Como salida se tiene el parámetro Mesh (M) que es la malla UV.

- Move: traslada un objeto a lo largo de un vector.



Figura 249 Módulo Move.

Como entrada tiene el parámetro Geometry (G) que es la geometría base que se va a mover y Motion (T) que es el vector de translación. Como salida tiene el parámetro Geometry (G) que es la geometría trasladada y Transform (X) que son los datos de la transformación.

- Multiplication (AxB): multiplicación matemática.



Figura 250 Módulo Multiplication.

Como entrada se tienen los parámetros A y B que son el primer y segundo número para realizar la multiplicación. Como salida se tiene el parámetro Result (R) que es el resultado de la operación entre A y B.

- Number Slider (Slider): Control numérico deslizante para valores individuales.



Figura 251 Módulo Slider

Si se hace doble click con el botón izquierdo del ratón aparecerá el menú del Slider donde se puede ponerle nombre, agregar una expresión, elegir el tipo de redondeo, elegir el número de decimales, así como su dominio y el valor numérico del Slider.

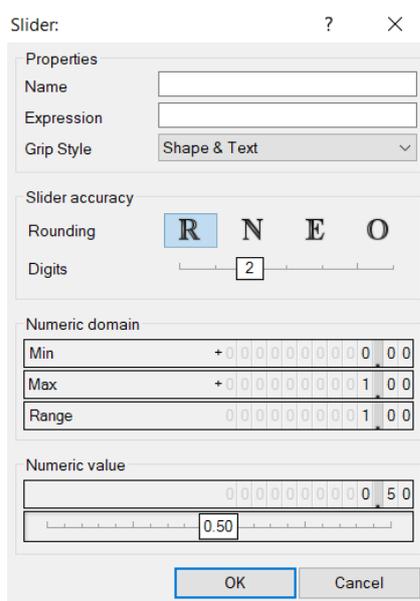


Figura 252 Menú del Slider

- Panel: panel para editar notas y valores de texto.



Figura 253 Módulo Panel como entrada

También se utiliza para obtener información sobre los valores que salen de los módulos.

Nodos	
	{0}
0	{0.0, 0.0, 0.0}
1	{0.0, 0.0, 4.0}
2	{6.0, 0.0, 0.0}
3	{3.0, 0.0, 4.258819}
4	{6.0, 0.0, 4.0}

Figura 254 Módulo Panel como salida.

- Path Mapper: realiza operaciones léxicas en arboles de datos.

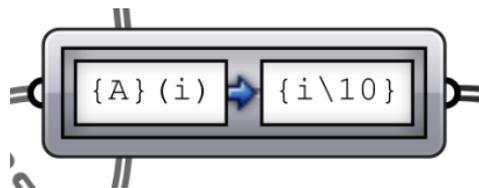


Figura 255 Módulo Path Mapper.

- Plane Surface (PlaneSrf): crea una superficie plana.

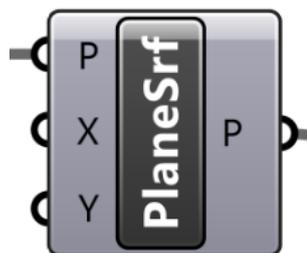


Figura 256 Módulo Plane Surface.

Como entrada se tienen los parámetros Plane (P), que es la superficie plana base, X Size (X), que son las dimensiones en dirección X, e Y Size (Y) que son las dimensiones en dirección Y. Como salida se tiene Plane (P) que es la superficie plana resultante.

- Point (Pt): Contiene una colección de puntos tridimensionales.



Figura 257 Módulo Point.

- Polyline (PLine): Crea una polilínea conectando un número de puntos.



Figura 258 Módulo PolyLine.

Como entrada se tienen los parámetros Vertices (V), que son los vértices de la polilínea, y Closed (C) que es para elegir si se quiere cerrar la polilínea. Como salida se tiene el parámetro Polyline (PI) que son las polilíneas generadas.

- Radians (Rad): convierte un ángulo específico en grados a radianes.



Figura 259 Módulo Radians.

Su entrada Degrees (D) ángulo en grados y su salida Radians (R) ángulo en radianes.

- Series: crea una serie de números.

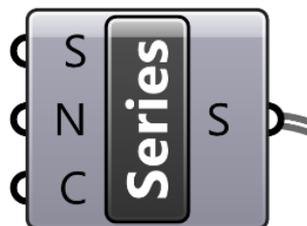


Figura 260 Módulo Series.

Como entrada tiene los parámetros Start (S) que se corresponde con el primer número serie, Step (N) que es el paso de la serie y Count (C) que es el número de valores de la serie. Como salida tiene el parámetro Series (S) que es la serie de números que se crea.

- Shift List (Shift): cambia ítems de una lista de lugar.



Figura 261 Módulo Shift List.

Como entrada se tienen los parámetros List (L), lista a cambiar, y Shift (S) que son el número de valores de la lista que deben cambiar de lugar. Como salida se tiene el parámetro List (L) que es la lista con los datos cambiados de lugar.

- Sine (Sin): computa el seno de un valor.



Figura 262 Módulo Sine.

Como entrada tiene el parámetro Value (x) que se corresponde con el ángulo de entrada en radianes y como salida tiene el parámetro Result (y) que nos devuelve el valor del seno.

- Sort List (Sort): ordena una lista de datos numéricos.



Figura 263 Módulo Short List.

Como entrada se tiene el parámetro Keys (K) que es una lista de valores y el parámetro Values A (A) que es una lista opcional de valores para ordenar sincronizadamente. Como salida se tiene el parámetro Keys (K) que son los

valores ordenados y el parámetro Values A (A) que son los valores sincronizados de A.

- Sort Points (Sort Pt): ordena puntos por coordenadas Euclideas (primero x, después y, después z)

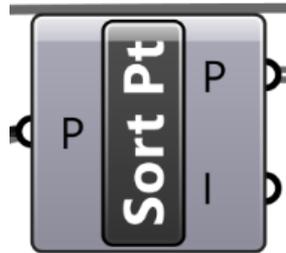


Figura 264 Módulo Sort Points.

Como entrada se tiene el parámetro Points (P) que son los puntos a ordenar y como salida se tienen los parámetros Points (P), que son los puntos ordenados, e Indices (I) que son los índices de los puntos introducidos en la entrada respecto de los puntos ordenados de la salida.

- Surface / Line (SLX): resuelve intersecciones entre una superficie y una línea.

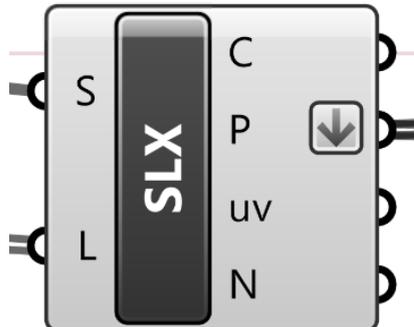


Figura 265 Módulo Surface / Line.

Como entrada se tienen los parámetros Surface (S), que es la superficie base, y Line (L) que es la línea de intersección. Como salida se tienen los siguientes parámetros Curves (C), Points (P), que son los puntos de intersección, UV Points (uv) y Normal (N).

- Tangent (Tan): computa la tangente de un valor.



Figura 266 Módulo Tangent.

Como entrada tiene el parámetro Value (x) que se corresponde con el ángulo de entrada en radianes y como salida tiene el parámetro Result (y) que nos devuelve el valor de la tangente.

- Unit X (X), Unit Y (Y) y Unit Z (Z): Vector unitario paralelo al eje X, Y y Z respectivamente.



Figura 267 Módulo Unit X.



Figura 268 Módulo Unit Y.



Figura 269 Módulo Unit Z.

Como entrada se tiene el parámetro Factor (F) que es el valor que multiplica al vector unidad en cada uno de los ejes respectivamente y como salida se tiene el parámetro Unit Vector (V) que es el vector unidad multiplicado por el factor.

- Vector XYZ (Vec): crea un vector a partir de componentes {xyz}.

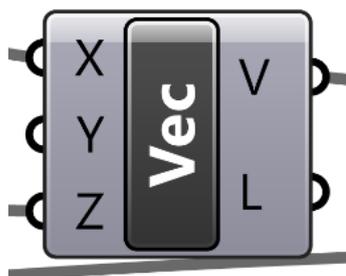


Figura 270 Módulo Vector XYZ.

Como entrada se tienen los parámetros X component (X), Y component (Y) y Z component (Z). Como salida se tienen los parámetros Vector (V), que es el vector construido y Vector Length que es la longitud del vector.

Módulos de Karamba

- Assemble model (Assemble): crea un modelo de elementos finitos a partir de las entidades dadas (puntos, barras, apoyos, cargas, secciones, materiales...).

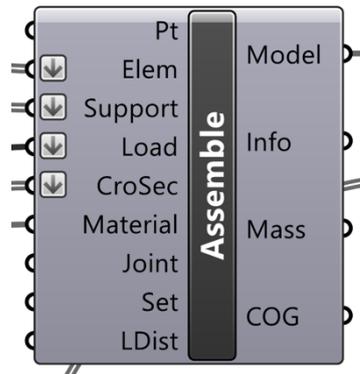


Figura 271 Módulo Assemble model.

Como entrada se tienen los siguientes parámetros:

Point (Pt): nodos del elemento que podrían estar conectados por elementos.

Elem: barras o superficies del modelo.

Support: apoyos.

Load: cargas.

Cross Section (CroSec): secciones.

Material: material del modelo.

Joint, Set y LDist.

Como salida se tienen los siguientes parámetros:

Model: modelo basado en las entradas.

Info: información acerca del ensamblaje del modelo.

Mass: masa de la estructura en Kg.

Center of Gravity (COG): centro de gravedad del modelo.

- Beam Resultant Forces (B-Res-Force): recoge las resultantes máximas de todas las barras del modelo.

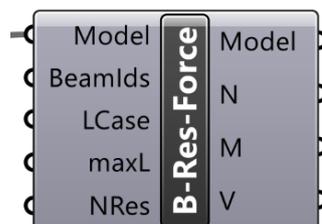


Figura 272 Módulo Beam Resultant Forces.

Como entrada se tienen los siguientes parámetros:

Analyzed model (Model): Modelo con desplazamientos calculados.

Beam identifiers (BeamIds): identificadores de las barras de las que se quieren recoger los resultados.

LCase: caso de carga.

maxL, NRes.

Como salidas se tienen los siguientes parámetros:

Analyzed model (Model): modelo con desplazamientos calculados.

Normal Force (N): axiles máximos de todos los elementos en kN.

Resultant Bending Moment (M): momentos máximos de todos los elementos en kNm.

Resultant shear force (V): cortante máximo de todos los elementos en kN.

- Beam View (BeamView): permite configurar la visualización de barras y esfuerzos.

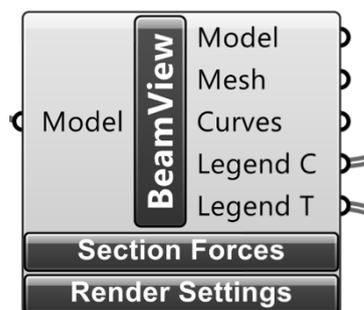


Figura 273 Módulo BeamView.

Como entrada se tiene el parámetro Model que es el modelo que se quiere ver.

Como salida se tienen los siguientes parámetros:

Model: modelo.

Meshes of rendered beams (Mesh): Malla de la estructura renderizada: una malla por superficie o barra para guardar el orden de la lista.

Deformed beam axes (Curves)

Legend colors (Legend C): colores de la leyenda.

Legend tags (Legend T): etiquetas de la leyenda.

Model View y Beam View se explicarán mas a fondo en un apartado sobre la visualización del modelo, sus elementos y sus esfuerzos. Se explicarán las diferentes opciones que tienen estos módulos.

- Cross Section Range Selector (CroSecRSelect): permite seleccionar secciones por país forma familia o máximo profundidad o ancho.

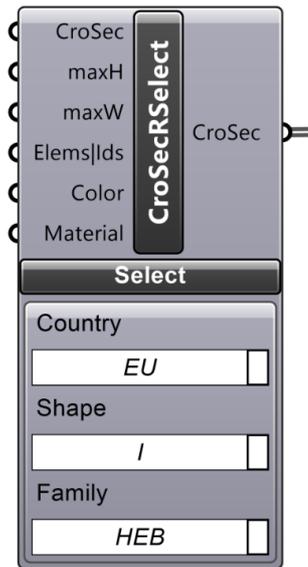


Figura 274 Módulo Cross Section Range Selector.

Como entrada se tienen los siguientes parámetros:

Cross sections (CroSec): lista de secciones para la selección, por defecto usa la biblioteca de secciones de Karamba 3D.

Maximun height [cm] (maxH): máxima altura de la sección para la selección del rango.

Maximun widht [cm] (masW): máximo ancho de la sección para la selección del rango.

Elements identifiers: Identificadores de barras o barras con identificadores para aplicar la sección.

Color

Material: Material para ser usado en la sección.

Ademas presenta unos desplegables de selección para el país, la forma y la familia de la sección.

Como salida se tiene el parámetro Cross Sections (CroSec) que son las secciones resultantes de la selección.

- Cross Section Selector (CroSecSelect): permite seleccionar secciones por nombre o por expresión regular de una lista de secciones.

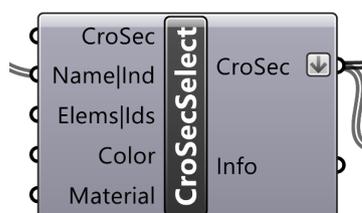


Figura 275 Módulo Cross Section Selector.

Como entrada se tienen los siguientes parámetros:

Cross Section (CroSec): Lista de secciones.

Name or Index: Nombres de las secciones o índices de las secciones en la lista Elements identifiers: Identificadores de barras o barras con identificadores para aplicar la sección.

Color

Material: Material para ser usado en la sección.

Como salida se tienen los siguientes parámetros:

Cross Section (CrosSec): secciones.

Info: información a cerca de la selección de las secciones.

- Disassemble: descompone barras y superficies en sus componentes.

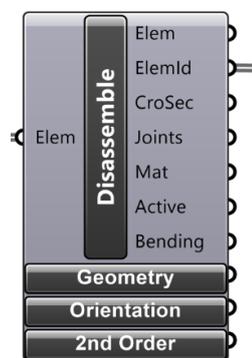


Figura 276 Módulo Disassemble.

Como entrada tiene el parámetro Element (Elem) que es la barra o la superficie que se quiere descomponer. Como salida se tienen los parámetros Element (Elem), Element identifiers, que es el identificador de los elementos, Cross Section (CroSec), que son las secciones de los elementos, Joints, Material (Mat), Active y Bending.

- Export Model to DStV (ExtToDStV): exporta el modelo a un archivo DStV.

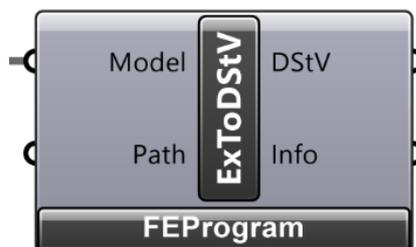


Figura 277 Módulo Export Model to DStV.

Como entradas se tienen los parámetros Model, que es el modelo que se quiere exportar y Path que es la ubicación donde se quiere guardar el modelo exportado. Como salidas se tienen los parámetros DStv que es el string del archivo exportado e Info que es la información de la exportación.

Presenta también un desplegable para seleccionar al programa al que se quiere exportar el archivo DStV.

- Line to Beam (LinetoBeam): crea barras con propiedades por defecto, la entrada de parámetros se asume en metros.

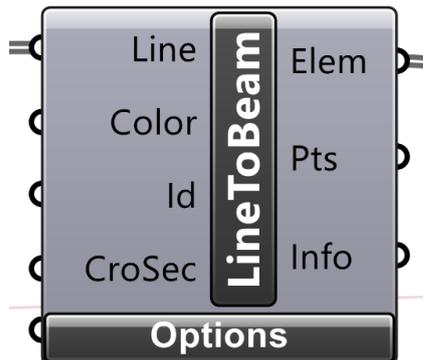


Figura 278 Módulo Line to Beam.

Como entrada se tienen los parámetros Line que son líneas rectas que serán conectadas a otras si tienen puntos comunes, Color, Id que es para poner identificadores a las barras que se van a crear y Cross section (CroSec). Como salidas se tienen los siguientes parámetros Element (Elem) que son las barras con propiedades por defecto, Points (Pts) que son los puntos finales de las barras e Info.

- Loads: crea todos tipo de cargas para un modelo estructural.

Se pueden aplicar números tipos de carga, pero en este estudio solo se utilizan tres de ellos: gravitatoria, puntual, lineal uniforme y carga de malla constante.

Se tiene un desplegable llamado Type of Load en el que se puede seleccionar el tipo de carga, el módulo cambia según el tipo de carga seleccionado. Se procede a explicar el módulo para los tipos de carga utilizados.

Gravity: carga gravitatoria.

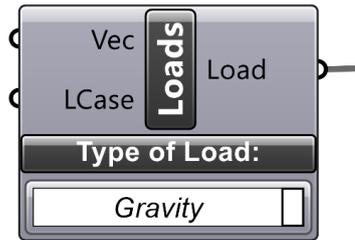


Figura 279 Módulo Loads Gravity.

Como entrada se tienen los parámetros Vector (Vec), que se corresponde con la dirección de la gravedad, y LCase, que es el caso de carga. Como salida se tiene el parámetro Load que es la carga ya creada.

Point: carga puntual.

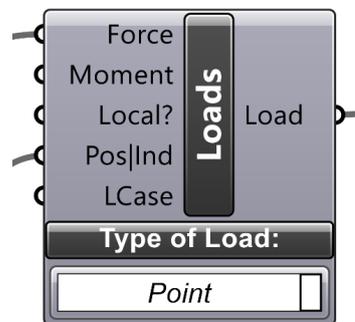


Figura 280 Módulo Loads Point.

Como entrada se tienen los parámetros Force Vector (Force), que se corresponde con el vector fuerza, Moment Vector (Moment), que es el vector de momento si lo hay, Local?, Pos/Ind, que es el índice o coordenadas del nodo donde se aplica la carga y LCase, que es el caso de carga. Como salida se tiene el parámetro Load que es la carga ya creada.

Uniform Line: carga lineal uniforme.

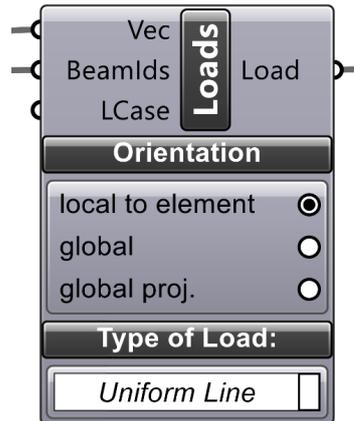


Figura 281 Módulo Loads Uniform Line.

Como entrada se tienen los parámetros Vector (Vec), que se corresponde con el vector de la carga, Beam Identifiers (BeamIds), que son los identificadores de los elementos donde se va a aplicar la carga y LCASE, que es el caso de carga. En este tipo de carga también se puede seleccionar la orientación de esta que puede ser local al elemento global y global proyectado. Como salida se tiene el parámetro Load que es la carga ya creada.

MeshLoad Const: carga de malla constante.

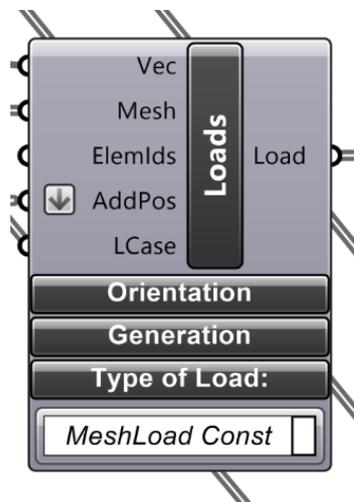


Figura 282 Módulo Loads MeshLoad Const.

Como entrada se tienen los parámetros Vector (Vec), que se corresponde con el vector de la carga superficial [kN/m²], Mesh, que se corresponde con la malla donde se va a aplicar la carga, Element Identifiers (ElemIds), que son los identificadores de los elementos donde se va a aplicar la carga, AddPos, que son la lista de coordenadas de puntos donde aplicar aproximadamente la carga y LCASE, que es el caso de carga.

En este tipo de carga también se puede seleccionar la orientación de esta que puede ser local al elemento global y global proyectado.
Como salida se tiene el parámetro Load que es la carga ya creada.

- Make Element-Set (MkSet): pone a los elementos diseñados por su identificador en un grupo.

Como entrada se tienen los parámetros Element Identifiers (ElemIds), que son los identificadores de los elementos que se quieren introducir en el grupo, Set Identifier, que es el nombre del grupo, Minimum Split Length [m] y Color.
Como salida se tiene el parámetro ElementSet que es el grupo de elementos creado.

- Material Selection (MatSelect): permite seleccionar un material por nombre o expresión regular de una lista de material.

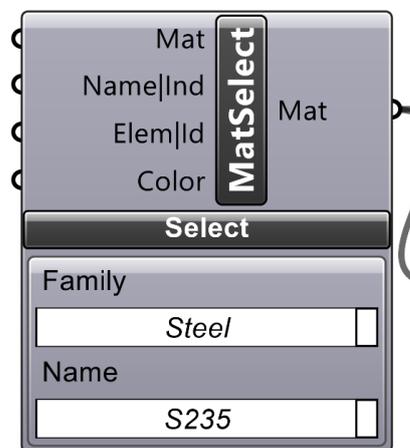


Figura 283 Módulo Material Selection.

Como entrada se tienen los siguientes parámetros:

Material (Mat): Lista de materiales.

Name or Index (Name/Ind): Nombre del material seleccionado o índice del material en la lista.

Element Identifier (Elem/Id): identificador de elemento o elemento al que se le aplica el material.

Color.

Como salidas se tiene Material (Mat) con las propiedades del material.

También aparecen dos desplegables en los que se puede elegir directamente el material tanto su familia como su nombre directamente de la lista por defecto que tiene Karamba.

- Model View (ModelView): permite observar el estado actual del modelo.

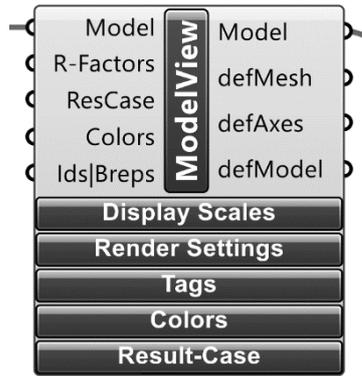


Figura 284 Módulo Model View.

Como entradas se tienen los siguientes parámetros:

Model: modelo para ser visto.

Result Factors (R-Factors): lista de factores para escalar uno o varios casos de resultados.

Result-Case (ResCase)

Color

Element Identifiers/Breps

Como salidas se tienen los siguientes parámetros:

Model: modelo

Deformed mesh (defMesh): malla de la estructura deformada.

Deformed axes (defAxes): ejes de la estructura deformada.

Deformed model (defModel): modelo deformado con los desplazamientos nodales como se muestran.

- Optimize Cross Section (OptiCroSec): selecciona las secciones optimas para barras y superficies en el modelo de acuerdo con EC3.

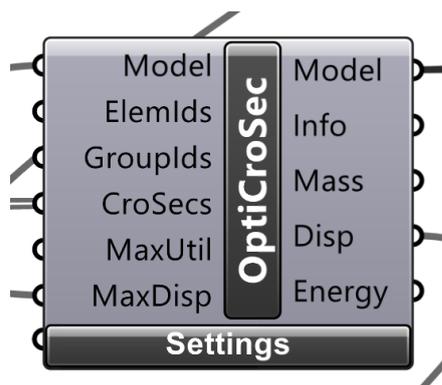


Figura 285 Módulo Optimize Cross Section.

Como entrada se tienen los siguientes parámetros:

Model: modelo para el cual se va a realizar la optimización de sección.

Elem Identifiers (ElemIds): lista de identificadores o elementos únicos que van a ser parte del diseño de la sección.

Group Identifiers (GroupIds): lista de identificadores de grupos o grupo de elementos que van a tomar parte en el diseño de la sección y esta será igual para el grupo.

Cross Sections (CroSec): lista de secciones para la optimización.

Maximum Utilization (MaxUtil): máxima utilización permitida en la que 1 corresponde con una utilización del 100%.

Maximum displacement (MaxDisp): máximo desplazamiento admisible en cm.

Como salida se tienen los siguientes parámetros:

Model: modelo con las secciones optimizadas.

Info: información del diseño de las secciones.

Mass: masa de la estructura en Kg.

Maximum displacement (Disp): máximo desplazamiento en cm.

Elastic energy (Energy): energía interna elástica del modelo en kNm.

- Read Cross Section Table from File (ReadCSTable): lee una lista de secciones de una tabla dada en formato csv.

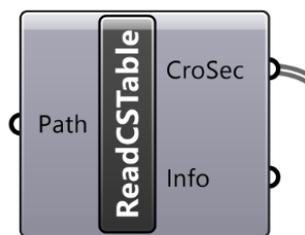


Figura 286 Módulo Read Cross Section Table from File.

Como entrada se tiene el parámetro File path of cross section table (Path), que es el camino hacia el archivo que contiene la tabla de secciones.

Como salida se tiene los parámetros Cross section (CroSec), que son las secciones con sus propiedades leídas de la tabla, e Info.

- Read Material Table from File (ReadMatTable): lee una lista de materiales de una tabla dada en formato csv.

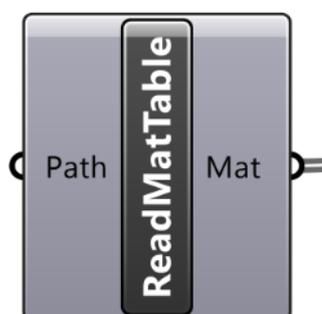


Figura 287 Módulo Read Material Table from File.

Como entrada se tiene el parámetro File path of material table (Path), que es el camino hacia el archivo que contiene la tabla de materiales.
 Como salida se tiene el parámetro Material (Mat), que son los materiales con sus propiedades.

- Support (Supp): crea apoyos a partir de nodos seleccionados con su índice o a través de coordenadas. Permite seleccionar las translaciones y rotaciones que deben estar impedidas.

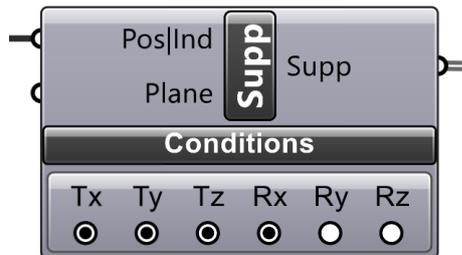


Figura 288 Módulo Support.

Como entrada se tienen los parámetros Pos/Ind que son los índices o coordenadas de los nodos y Plane. Como salida se tiene Support (Supp) que son los apoyos.

- Utilization: proporciona la utilización de barras y superficies para caso de carga de acuerdo con Eurocodigo 3.

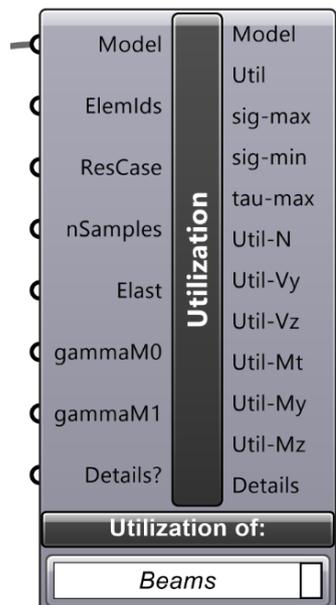


Figura 289 Módulo Utilization.

Como entrada se tienen los parámetros Model, que es el modelo que se quiere analizar, Elem Identifiers (ElemIds), Result-Case (ResCase), Number of simple points (nSamples), Elastic design (Elast), gammaM0, ¿gammaM1 y Details?
Como salida se tienen los siguientes parámetros Model, Utilization (Util), sig-max, que es la máxima tensión normal en [kN/cm²], sig-min, que es la mínima tensión normal en [kN/cm²], tau-max, que es la máxima tensión tangencial incluyendo torsión y tangencial en dirección local Y o Z, Util-N, Util-Vy, Util-Vz, Util-Mt, Util-My, Util-Mz y Details.