

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

---

**Diseño de estructuras sostenibles  
mediante cálculo paramétrico y  
optimización de formas**

---

*Autor:*  
Sergio LORENTE CORTÉS

*Directores:*  
Prof. Elías Cueto Prendes  
Dr. Beatriz Moya García

*Graduado en Ingeniería Mecánica*

21 de noviembre de 2022



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe remitirse a [secelna@unizar.es](mailto:secelna@unizar.es) dentro del plazo de depósito)

D./D<sup>a</sup>. Sergio Lorente Cortés

en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de Estudios de la titulación de

Grado en Ingeniería Mecánica

☐ (Título del Trabajo)

Diseño de estructuras sostenibles mediante cálculo paramétrico y optimización de formas.

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 21 de Noviembre de 2022

Fdo:



UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

## Resumen

Ingeniería Mecánica

Graduado en Ingeniería Mecánica

### Diseño de estructuras sostenibles mediante cálculo paramétrico y optimización de formas

Sergio LORENTE CORTÉS

El presente Trabajo Fin de Grado se centra en el diseño de optimización de estructuras sostenibles mediante la técnica de parametrización. Relativo al caso de estudio, el proyecto se centra en optimizar el puente Striatus, llevada a cabo a través de Zaha Hadid Architects y diseñado por el equipo de Philippe Block en la ETH de Zúrich. A partir de la información técnica de las dimensiones del puente, se realiza el diseño y posteriormente se somete a diferentes tipos de estudio de cargas, con la finalidad de obtener a través del diseño paramétrico, una estructura que puramente trabaje a compresión.

A través del software *Karamba 3D*, se realiza el cálculo por medio del método de elementos finitos para obtener resultados en términos de rigidez y de resistencia.

Posterior al cálculo de dicha estructura, se somete al análisis de los resultados para verificar el estado de compresión pura a lo largo de dicha superficie.

En el caso de estudio, se han empleado las propiedades de hormigón impreso en 3D para definir el material, a través de datos oficiales contrastados en la página oficial del grupo promotor de la obra.

Para poder realizar óptimamente el análisis de compresión, se realizan diferentes iteraciones paramétricas para lograr el diseño final de la estructura y poder contrastar con la geometría real.

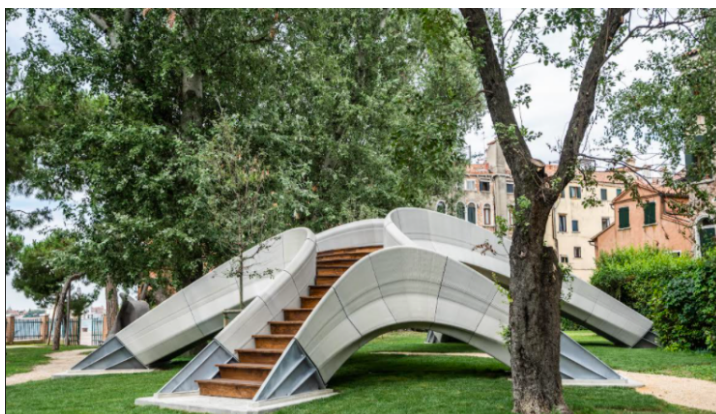


FIGURA 1: Puente Striatus





## *Agradecimientos*

Llegado este momento no me queda más que agradecer a todas las personas que han formado parte en mi camino durante todos estos años. Aunque no mencione a todas, agradecer a todos mis amigos, familiares y demás, el haber estado siempre ahí con su apoyo incondicional.

A Beatriz Moya García, tutora del presente proyecto, por haberme ofrecido la oportunidad de trabajar con ella, y haberme ayudado a lo largo del desarrollo del mismo.

A Elías Cueto Prendes, co-director del presente proyecto, quién un día cualquiera me animó a escoger este proyecto y ha valido mucho la pena.

A la Cátedra de Transformación Industrial, dirigida por José Ángel Castellanos, por haberme dado la oportunidad de realizar este Trabajo de Fin de Grado.

A mis padres, quiénes siempre me han apoyado para que pueda cumplir mis metas.

A mi hermano, por sentar en mi las bases de responsabilidad y deseo de superación.



FIGURA 2: Cátedra de Transformación Industrial



# Índice general

<b>Resumen</b>	<b>III</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>V</b>
<b>1. Estado del arte</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Modelo paramétrico, Grasshopper y Rhinoceros . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	3
1.4. Justificación . . . . .	4
<b>2. Características del puente Striatum</b>	<b>5</b>
2.1. Introducción . . . . .	5
2.2. El puente Striatum . . . . .	5
2.3. Definición del material . . . . .	7
<b>3. Modelado</b>	<b>9</b>
3.1. Introducción . . . . .	9
3.2. Método iterativo . . . . .	9
3.3. Método de optimización de forma . . . . .	14
<b>4. Resultados</b>	<b>17</b>
4.1. Comparación de los métodos de optimización . . . . .	17
4.2. Resultados numéricos . . . . .	18
4.2.1. Modelo iterativo . . . . .	19
Ensayo de Cargas 1 . . . . .	19
Ensayo de Cargas 2 . . . . .	24
4.2.2. Modelo de optimización de forma . . . . .	30
Ensayo de Cargas 1 . . . . .	30
Ensayo de Cargas 2 . . . . .	35
<b>5. Resumen</b>	<b>41</b>
5.1. Conclusiones . . . . .	41
<b>A. Referencias a Stritus Bridge</b>	<b>43</b>
A.1. Introducción . . . . .	43
A.2. Fabricación de dovelas . . . . .	43
A.3. Puesta en obra . . . . .	44
A.4. Características finales . . . . .	45
<b>B. Metodología del modelo paramétrico mediante optimización iterativa manual</b>	<b>47</b>
B.1. Curvas paramétricas . . . . .	49
B.2. Abrazaderas paramétricas . . . . .	51
B.3. Mallado de la pasarela . . . . .	53

B.4. Definición de Condiciones de Contorno . . . . .	56
B.5. Definición de sección transversal . . . . .	58
B.6. Ensayo de Cargas 1, Carga Uniformemente Distribuida . . . . .	59
B.7. Definición de elementos . . . . .	60
B.8. Ensamblaje del modelo . . . . .	60
B.9. Vista de Resultados . . . . .	61
B.10. Vista de Condiciones de Contorno . . . . .	62
<b>C. Metodología de optimización de forma</b>	<b>63</b>
C.1. Plano paramétrico . . . . .	64
C.2. Mallado de la superficie . . . . .	65
C.3. Definición de Condiciones de Contorno . . . . .	66
C.4. Ensayo de Cargas 1, Form-Finding de la malla . . . . .	67
C.5. Ensayo de Cargas 2, Carga Uniformemente Distribuida . . . . .	68
C.6. Ensayo de Cargas 3, Carga Puntual . . . . .	69
<b>D. Análisis de Esfuerzos Form-Finding con Ensayo de Cargas 1</b>	<b>71</b>
D.1. Resultados . . . . .	72
D.2. Conclusiones . . . . .	76
<b>E. Norma IAP-11</b>	<b>79</b>

# Índice de figuras

1. Puente Striatum . . . . .	III
2. Cátedra de Transformación Industrial . . . . .	V
1.1. Antonio Gaudí . . . . .	1
1.2. Análisis gráfico de la configuración final del puente peatonal [1]. . . . .	1
1.3. Estática Gráfica Computacional. . . . .	2
1.4. Entornos de programas de modelo paramétrico . . . . .	3
1.5. Karamba 3D . . . . .	3
2.1. Perspectiva del Puente Striatum . . . . .	5
2.2. Detalle de mampostería realizada en el proyecto original. (a) Planos de interfaz entre bloques. (b) Detalle que muestra los planos de interfaz para un bloque.[4] . . . . .	6
2.3. Solucionador iterativo para el análisis de red de empuje.(a) Iteración inicial. (b) Iteración final optimizada.[4] . . . . .	6
2.4. Fuerzas a través de la geometría, permitiendo desviar esfuerzos de tracción a los apoyos metálicos empotrados en el suelo. [5] . . . . .	6
2.5. Características del hormigón impreso introducido dentro de <i>Karamba 3D</i> . . . . .	8
3.1. Esquema de parametrización. . . . .	9
3.2. Conjunto de Planos utilizados para creación de curvas no paramétricas . . . . .	10
3.3. Visión gráfica desde Rhinoceros de curvas no paramétricas . . . . .	10
3.4. Control de puntos paramétricos . . . . .	11
3.5. Combinación paramétrica en altura con respecto a la modelización en el estado inicial, de contornos 1 2 y 3. A) Aumento de 200 milímetros en Contorno 1. B) Disminución de 200 milímetros en Contorno 2. C) Permanece el valor de la iteración 0 para el Contorno 3. . . . .	11
3.6. Combinación paramétrica en altura con respecto a la modelización en el estado inicial, de contornos 4 y 5. D) Aumento en 400 milímetros en Contorno 4. E) Permanece el valor de la iteración 0 para el Contorno 5. . . . .	12
3.7. Resolución gráfica de la combinación final. . . . .	12
3.8. Modelización paramétrica. 1) Corresponde a la modelización paramétrica de las líneas de contorno. 2) Corresponde a la modelización paramétrica de las abarazaderas. 3) Modelización a través de Karamba 3D. . . . .	13
3.9. Resultado final de la malla plana, véase la metodología en <b>Anexo C</b> . . . . .	14
3.10. <i>Form-finding</i> . A través de una malla plana, le sometemos a cargas para obtener la configuración deformada, utilizando dicha geometría como input en el estudio que deseamos obtener. [7] . . . . .	14
3.11. Algoritmo de Karamba 3D cuya función principal es resolver una geometría a través de parámetros de optimización como en este caso a través de la imposición del máximo desplazamiento nodal, véase <b>Anexo C</b> . . . . .	15

3.12. Resolución gráfica en Rhinoceros de la malla optimizada a través del algoritmo de la Figura 3.11. . . . .	15
3.13. Modelización paramétrica vía 2. 1) Modelización de la geometría plana. 2) Mallado de la superficie. 3) Modelización en Karamba 3D de ambos estados de carga. . . . .	16
4.1. Comparación en planta entre ambos modelos con la misma escala gráfica . . . . .	17
4.2. Comparación en Frontal entre ambos modelos con la misma escala gráfica . . . . .	17
4.3. Representación Gráfica de Cargas y Condiciones de Contorno . . . . .	19
4.4. Utilización Método iterativo . . . . .	19
4.5. Representación Gráfica de Utilización del superficie Inferior . . . . .	20
4.6. Desplazamientos . . . . .	20
4.7. Tensión principal 1 . . . . .	21
4.8. Isolíneas de tensión 1 Método iterativo . . . . .	21
4.9. Tensión principal 2 . . . . .	22
4.10. Isolíneas de tensión 2 Método iterativo . . . . .	22
4.11. Tensión equivalente de Von mises . . . . .	23
4.12. Comportamiento de la estructura final del puente striatus, conforme el incremento de carga puntual en la parte izquierda. [5] . . . . .	24
4.13. Representación Gráfica de Cargas y Condiciones de Contorno . . . . .	25
4.14. Utilización Método iterativo . . . . .	25
4.15. Representación Gráfica de Utilización de la superficie Inferior . . . . .	26
4.16. Desplazamientos Método iterativo . . . . .	26
4.17. Tensión principal 1 Método iterativo . . . . .	27
4.18. Isolíneas de tensión 1 Método iterativo . . . . .	27
4.19. Tensión principal 2 Método iterativo . . . . .	28
4.20. Isolíneas de tensión 2 Método iterativo . . . . .	28
4.21. Tensión equivalente de Von Mises Método iterativo . . . . .	29
4.22. Representación Gráfica de Cargas y Condiciones de Contorno . . . . .	30
4.23. Utilización geometría <i>Form-Finding</i> . . . . .	30
4.24. Representación Gráfica de Utilización del superficie Inferior . . . . .	31
4.25. Desplazamientos geometría <i>Form-Finding</i> . . . . .	31
4.26. Tensión principal 1 geometría <i>Form-Finding</i> . . . . .	32
4.27. Isolíneas de tensión 1 geometría <i>Form-Finding</i> . . . . .	32
4.28. Tensión principal 2 geometría <i>Form-Finding</i> . . . . .	33
4.29. Isolíneas de tensión 2 geometría <i>Form-Finding</i> . . . . .	33
4.30. Tensión equivalente de Von mises geometría <i>Form-Finding</i> . . . . .	34
4.31. Representación Gráfica de Cargas y Condiciones de Contorno . . . . .	35
4.32. Utilización geometría <i>Form-Finding</i> . . . . .	35
4.33. Representación Gráfica de Utilización del superficie Inferior . . . . .	36
4.34. Desplazamientos geometría <i>Form-Finding</i> . . . . .	36
4.35. Tensión principal 1 geometría <i>Form-Finding</i> . . . . .	37
4.36. Isolíneas de tensión 1 geometría <i>Form-Finding</i> . . . . .	37
4.37. Tensión principal 2 geometría <i>Form-Finding</i> . . . . .	38
4.38. Isolíneas de tensión 2 geometría <i>Form-Finding</i> . . . . .	38
4.39. Tensión equivalente de Von mises geometría <i>Form-Finding</i> . . . . .	39
A.1. Puente Striatum . . . . .	43
A.2. Método de fabricación de dovelas [8]. . . . .	44

A.3. Conjunto de dovelas [5]. . . . .	44
A.4. Puesta en marcha del Puente Striatus. . . . .	45
B.1. Planta puente Striatus. . . . .	47
B.2. Perfil 1 puente Striatus. . . . .	48
B.3. Perfil 2 puente Striatus. . . . .	48
B.4. Modelización paramétrica. 1) Corresponde a la modelización paramétrica de las líneas de contorno. 2) Corresponde a la modelización paramétrica de las abarazaderas. 3) Modelización a través de Karamba 3D. . . . .	49
B.5. Parte 1. Asociado a los resultados de modelización de los Conjuntos 1, 2 y 3. . . . .	50
B.6. Parte 2. Asociado a los resultados de modelización de los Conjuntos 4, 5 y 6. . . . .	50
B.7. Parte 3. Asociado a los resultados de modelización del Conjunto 7 . . .	50
B.8. Parametrización de los límites de la pasarela. . . . .	51
B.9. Parte 1. Asociado a los resultados de modelización de los Conjuntos 8, 9, 11 y 12. Cómo resultado se obtiene los pasamanos verticales y paralelas a una distancia paramétrica, véase la solución gráfica que se muestra en la Figura B.11(a) . . . . .	52
B.10. Parte 2. Asociado a los resultados de modelización de los Conjuntos 10, 13 y 12 . Cómo resultado se obtiene las superficies que unen, tanto las abrazaderas paramétricas como la pasarela, véase la solución gráfica que se muestra en la Figura B.11(b) . . . . .	52
B.11. Visualización de resultados . . . . .	53
B.12. Vista de Perfil de las superficies paramétricas. . . . .	53
B.13. Vista de Perspectiva de las superficies paramétricas. . . . .	53
B.14. Modelización de Malla Cuadrada . . . . .	54
B.15. Resultado de Patch . . . . .	55
B.16. Resultado de Patch . . . . .	55
B.17. Información de la malla . . . . .	56
B.18. Visor gráfico de Rhinoceros con apoyos. Están seleccionados en verde. . . . .	56
B.19. Vinculación de apoyos no paramétricos a Grasshopper. Comentar que dicho flujo en verde, hace referencia a la selección del visor de Rhinoceros como se muestra en la Figura B.18. . . . .	57
B.20. Modelización paramétrica de apoyos y sus condiciones de contorno . .	58
B.21. Modelización paramétrica de la Sección Transversal . . . . .	58
B.22. Representación Gráfica de Cargas y Condiciones de Contorno . . . .	59
B.23. Modelización de cargas . . . . .	59
B.24. Modelización de elementos . . . . .	60
B.25. Ensamblaje del modelo . . . . .	60
B.26. Modelización para vista de resultados . . . . .	61
B.27. Visualización del esquema dentro de Karamba 3D . . . . .	62
C.1. Modelización paramétrica vía 2. 1) Modelización de la geometría plana. 2) Mallado de la superficie. 3) Modelización en Karamba 3D de ambos estados de carga. . . . .	63
C.2. Curvas de contorno sin parametrizar . . . . .	63
C.3. Codificación asociada a los Conjuntos 1,2,3 y 4 . . . . .	64
C.4. Codificación asociada al Conjunto 5 . . . . .	64
C.5. Visualización gráfica del Conjunto 5, creación de superficie. . . . .	65



C.6. Modelización Malla . . . . .	66
C.7. Visualización del Conjunto 10 . . . . .	66
C.8. Entrada al sistema de Modelado de Condiciones de Contorno . . . . .	67
C.9. Modelización paramétrica de apoyos y sus condiciones de contorno . . . . .	67
C.10. Orientación de las cargas, en sentido y dirección Z positivas . . . . .	68
C.11. Algoritmo de optimización de máximo desplazamiento de la malla. . . . .	68
C.12. Visualización del Conjunto 14, dónde la malla está compuesta de 3018 vértices y 5598 elementos . . . . .	68
C.13. Modelización de cargas uniforme dentro de <i>Grasshopper</i> . . . . .	69
C.14. Modelización de carga puntual dentro de <i>Grasshopper</i> . . . . .	69
C.15. Resolución gráfico del Conjunto 20, vértice utilizado para la posición de la carga puntual dentro de <i>Grasshopper</i> . . . . .	70
D.1. Cotas de apoyos en milímetros . . . . .	71
D.2. Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 1-2 . . . . .	72
D.3. Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 2-3 . . . . .	72
D.4. Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 3-4 . . . . .	73
D.5. Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 4-5 . . . . .	73
D.6. Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 5-1 . . . . .	74
D.7. Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 1-2 . . . . .	74
D.8. Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 2-3 . . . . .	75
D.9. Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 3-4 . . . . .	75
D.10. Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 4-5 . . . . .	76
D.11. Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 5-1 . . . . .	76
D.12. Sumatorio de reacciones en las 3 direcciones . . . . .	77
E.1. Portada de la norma IAP . . . . .	79

# Índice de cuadros

4.1. Comparación entre ambos modelos paramétricos . . . . .	17
5.1. Comparación entre los modelos optimizados, y el modelo real. . . . .	41
A.1. Propiedades del Puente Striatus. Dicha información viene recogida en [5]. . . . .	45



## Capítulo 1

# Estado del arte

### 1.1. Introducción

El progresivo avance de las nuevas tecnologías han permitido desarrollar nuevas técnicas aplicables dentro del ámbito constructivo. Dichos avances, entre otros, han permitido el estudio de una característica estructural principal: la forma. El diseño no puede entenderse sin vincular la forma al material, tal y cómo defendía Antonio Gaudí:

*"Para que un objeto sea altamente bello es preciso que su forma no tenga nada de superfluo, sino las condiciones que lo hacen útil, teniendo en cuenta el material y lo usos a prestar. Cuando las formas son más perfectas exigen menos ornamentación."*

Con el progreso de una sociedad más inteligente y más capaz, la introducción de sistemas informáticos dentro del ámbito constructivo concluye en una gran revolución dentro del sector, generando un salto exponencial a la hora de acometer proyectos tanto en duración como en complejidad.

Antes del uso de los softwares computacionales actuales, la estática gráfica jugaba un papel esencial en el diseño y cálculo de estructuras. Esta técnica está basada en los métodos algebraicos tradicionales, y ofrece un alto grado de exactitud a la hora de equiparar resultados con métodos computacionales.



FIGURA 1.1: Antonio Gaudí

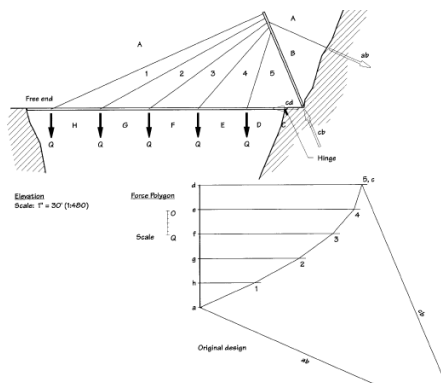


FIGURA 1.2: Análisis gráfico de la configuración final del puente peatonal [1].

La introducción la resolución gráfica permite determinar la magnitud y el sentido de los esfuerzos a los que está sometido cada uno de los elementos que conforman la geometría a estudiar.

Popularizada por Karl Culmann<sup>1</sup> en el siglo XIX y principios del XX, llegaría a convertirse en la modalidad más usada entre los ingenieros y arquitectos de la época [2]. Con el desarrollo de las primeras computadoras surgieron nuevas corrientes de cálculo computacionales (cálculo matricial, elementos finitos...) y la estática gráfica.

Los profesores W. Zalewski y E. Allen [3] de la Escuela de Massachusets llamada MIT (Massachusetts Institute of Technology), impulsaron un estudio en la actualidad para el desarrollo de programas interactivos de cálculo a tiempo real, dando lugar a la nueva disciplina llamada **estática gráfica computacional**.

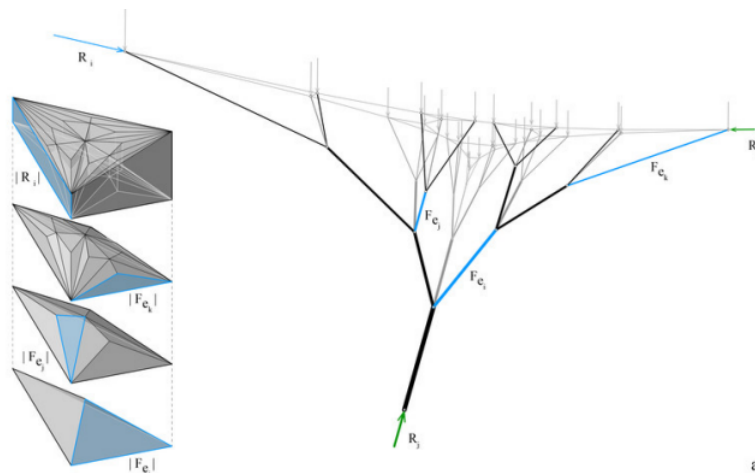


FIGURA 1.3: Estática Gráfica Computacional.

Fundamentalmente, el uso de materiales como acero y hormigón, con todos sus tipos de tratamientos y variantes, han sido los más relevantes y comunes para realizar la acometida de obras arquitectónicas. Relativo al caso de estudio, se profundizará en la importancia del hormigón y su nuevo tipo de aplicación a la hora de ejecutar obras.

## 1.2. Modelo paramétrico, Grasshopper y Rhinoceros

El modelado paramétrico se basa en constituir un modelo, en este caso geométrico, en función de unas variables que el usuario puede modificar para conseguir diferentes resultados de forma. Esta dependencia impuesta permite al usuario generar una gran gama de soluciones para el diseño de la geometría, con el principal objetivo de analizarlas y compararlas para alcanzar una solución óptima con respecto a una serie de criterios impuestos.

Este tipo de modelado está disponible en programas de visualización y diseño como *Rhinoceros*. Específicamente, esta opción se incluye en el módulo llamado *Grasshopper*. Este ha sido el software seleccionado para el desarrollo del proyecto. .

Además, toda la información relacionada con la parametrización estará conectada

<sup>1</sup>Profesor de la Escuela Politécnica de Zurich, fue un pionero de los métodos gráficos en ingeniería, publicando su libro seminal sobre el tema, *Die graphische Statik* (Estática gráfica) en 1865.

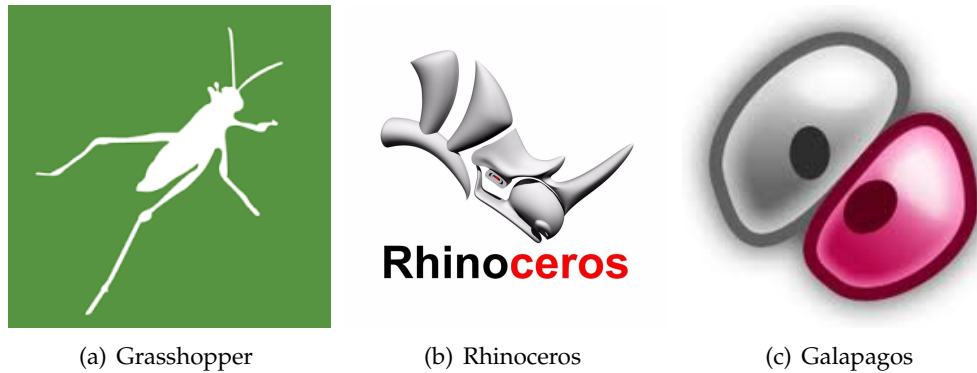


FIGURA 1.4: Entornos de programas de modelo paramétrico

con el programa *Rhinoceros*, que servirá de entorno gráfico.

El trabajo tiene el objetivo de parametrizar la geometría del puente Stratus (referencia), efectuar su cálculo y análisis, y estudiar la optimización de su forma, si es posible.

*Karamba 3D* es un módulo de análisis estructural vinculado a *Rhinoceros*. Además está totalmente integrado en el entorno de diseño paramétrico de *Grasshopper*. Esto facilita la combinación de modelos geométricos parametrizados, cálculos de elementos finitos y algoritmos de optimización como *Galapagos*.

*Karamba 3D* se encarga también de la conversión de modelo paramétrico a modelo estructural como podremos observar en el **Anexo B, Metodología del modelo paramétrica de Diseño Original Stratus** siendo el nexo de unión entre la parametrización y su posterior cálculo.



FIGURA 1.5: Karamba 3D

### 1.3. Objetivos

La principal finalidad del presente proyecto es analizar y estudiar el comportamiento de diseños paramétricos mediante la aplicación de los principios de la estática gráfica, abordando a su vez la comprensión de los diferentes programas de diseño como son *Grasshopper* y *Rhinoceros*, y su análisis mediante el software de cálculo estructural *Karamba 3D*. Asimismo, se evaluará la eficiencia de su forma y si es posible llegar a otra solución más eficiente mediante la parametrización y el uso de módulos

de optimización.

El objetivo consiste en realizar un estudio comparativo entre las diferentes geometrías adoptadas, con el fin de establecer la estructura más óptima, que verifique la condición de compresión pura.

Con todo ello, se obtendrá un modelo paramétrico completo de la estructura modelo realizada a través de los programas mencionados anteriormente.

## 1.4. Justificación

Con respecto a los principales programas de estructuras, la inversión de tiempo en modificar modelos en programas de cálculo de estructuras impide un estudio amplio de alternativas en el diseño inicial. Además, generar modelos complejos en 3D impone una complejidad adicional. La codificación de la parametrización permite:

- Automatizar geometrías y cálculos estructurales repetitivos.
- Modificar modelos en geometrías complejas en muy poco tiempo.
- Arrancar optimizadores topológicos y estudiar muchas soluciones constructivas para comparar costes entre soluciones.

La realización de este tipo de proyecto viene dada por el auge de la ingeniería paramétrica para la búsqueda de la forma óptima.

Gracias a ello, Striatu ha presentado una alternativa a la construcción tradicional del hormigón, optimizando las propiedades de las estructuras de mampostería y siendo ecológicamente responsable al reducir significativamente su huella ambiental.

La gran versatilidad que nos ofrecen programas paramétricos como *Grasshopper*, han hecho de nexo para poder abordar dicho trabajo, con el fin de minimizar el tiempo de compilación para resolver infinitas geometrías.

La combinación de dichos programas con algoritmos de optimización componen la base del proyecto, ofreciendo una perspectiva disruptiva a la hora de presentar proyectos de innovación en el diseño.

## Capítulo 2

# Características del puente Striatus

### 2.1. Introducción

En este capítulo se detalla la geometría y el material del puente Striatus, con la estructura seleccionada para el análisis propuesto. Además, se describe la metodología utilizada en el proyecto real para llevar a cabo el modelado de las superficies, mediante el uso de algoritmos específicos.



FIGURA 2.1: Perspectiva del Puente Striatus

### 2.2. El puente Striatus

El puente Striatus forma parte del grupo de pasarelas de mamposterías arqueadas en ausencia de refuerzo de metal.

La gran versatilidad de las mismas viene dada tanto por el ensamblaje en seco de sus componentes, al haber sido discretizado estructuralmente por bloques, como por haberse diseñado atendiendo a la alineación de las capas de impresión ortogonales a los flujos de fuerzas de compresión.

La mampostería es el principal objeto para realizar dicho diseño, ya que atiende a una lógica estructural en la que coordina los planos entre las diferentes dovelas <sup>1</sup> consiguiendo que las fuerzas de compresión fluyan a través de estos planos. En consecuencia, implica que se debe minimizar el error angular entre los diferentes planos que conforman los 53 bloques impresos, siempre con la limitación de la inclinación máxima de impresión.

---

<sup>1</sup>En arquitectura e ingeniería civil, es un elemento constructivo que conforma un arco, y que puede ser de diferentes materiales. Para el caso de estudio, está hecho de hormigón en masa impreso.



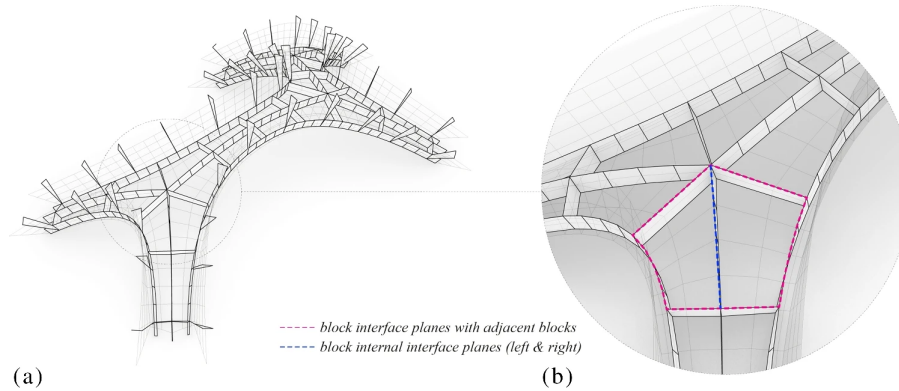


FIGURA 2.2: Detalle de mampostería realizada en el proyecto original. (a) Planos de interfaz entre bloques. (b) Detalle que muestra los planos de interfaz para un bloque.[4]

El diseño de este puente se realizó entre el estilo Zaha Hadid Architects y el grupo de investigación Block Research group, en el ETH de Zurich. Este grupo de investigación empleó la técnica TNA (thrust network analysis, y referencia) para imponer restricciones de esfuerzos para minimizar los asociados a tracción y modelar diferentes geometrías obteniendo condiciones de compresión pura.

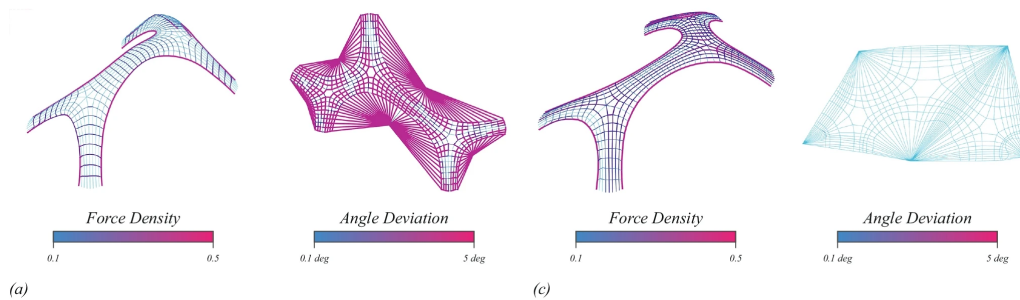


FIGURA 2.3: Solucionador iterativo para el análisis de red de empuje. (a) Iteración inicial. (b) Iteración final optimizada.[4]

Gracias a este enfoque computacional, ha permitido reducir significativamente la cantidad del material aportado a la estructura, siendo un punto de inflexión a la hora de realizar geometrías hechas en base a materiales como el hormigón sin aporte de acero.

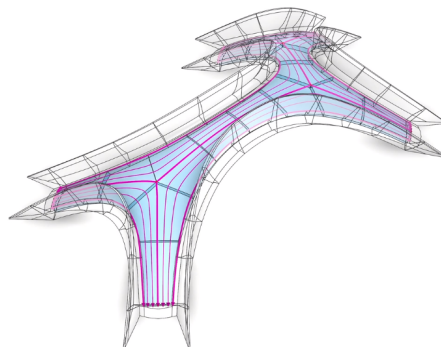


FIGURA 2.4: Fuerzas a través de la geometría, permitiendo desviar esfuerzos de tracción a los apoyos metálicos empotrados en el suelo. [5]

## 2.3. Definición del material

Como se menciona en el **Anexo A, Referencias al puente Striatus**, la principal diferencia que tiene este tipo de proyecto es el método de fabricación del cuerpo de la pasarela y pasamanos, debido a la utilización de hormigón impreso a través de robots. Además, no han sido necesarios poner refuerzo de acero, ya que la estructura está diseñada para que solo haya esfuerzos de compresión.

Por lo tanto, para hacer el análisis de elementos finitos a través de *Karamba 3D*, necesitaremos caracterizar las propiedades de este tipo de material. En primer lugar se han establecido ciertas características a través de artículos científicos [6], además de contrastar dicha información mediante la página oficial del puente Striatus [4].

Para llevar a cabo la buena identificación del material dentro de *Karamba 3D*, se necesitan las siguientes ocho características:

- E es el Módulo de Young del material:

$$E = 3660 \text{KN cm}^{-2} \quad (2.1)$$

- G12 es el Módulo de cortante en el plano, su valor viene dado por la siguiente expresión (Coeficiente de Poisson  $[\nu] = 0.28$ ):

$$G_{12} = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

$$G_{12} = 1429,69 \text{KN cm}^{-2} \quad (2.2)$$

- G3 es el Módulo de cortante transversal, al ser el material elegido isótropo, se puede igualar al valor que tiene G12, mediante la misma ecuación expuesta anteriormente:

$$G_3 = 1429,69 \text{KN cm}^{-2} \quad (2.3)$$

- Gamma es el peso específico del material:

$$\rho = 23,03 \text{KN cm}^{-3} \quad (2.4)$$

- AlphaT es el coeficiente de dilatación. Para el estudio no se utilizará, sin embargo dentro del programa se exige un valor para la correcta compilación:

$$\alpha = 10^{-5} \text{°C}^{-1} \quad (2.5)$$

- Ft es la resistencia a tracción del material. Dentro de *Karamba 3D*, se expresa como valores positivos:

$$f_t = 1,1 \text{KN cm}^{-2} \quad (2.6)$$

- Fc es la resistencia a compresión del material. Dentro de *Karamba 3D*, se expresa como valores negativos:

$$f_c = -10,7 \text{KN cm}^{-2} \quad (2.7)$$

- Material Type, selección del tipo de material, distingue entre dos principalmente, materiales isótropos y materiales ortotrópos. En nuestra caso lo caracterizamos como un material isótropo.

- S-Hypo, de cara al cálculo de estructuras y su optimización se utilizará el criterio de Von Mises:

$$VM = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}{\sqrt{2}} \quad (2.8)$$

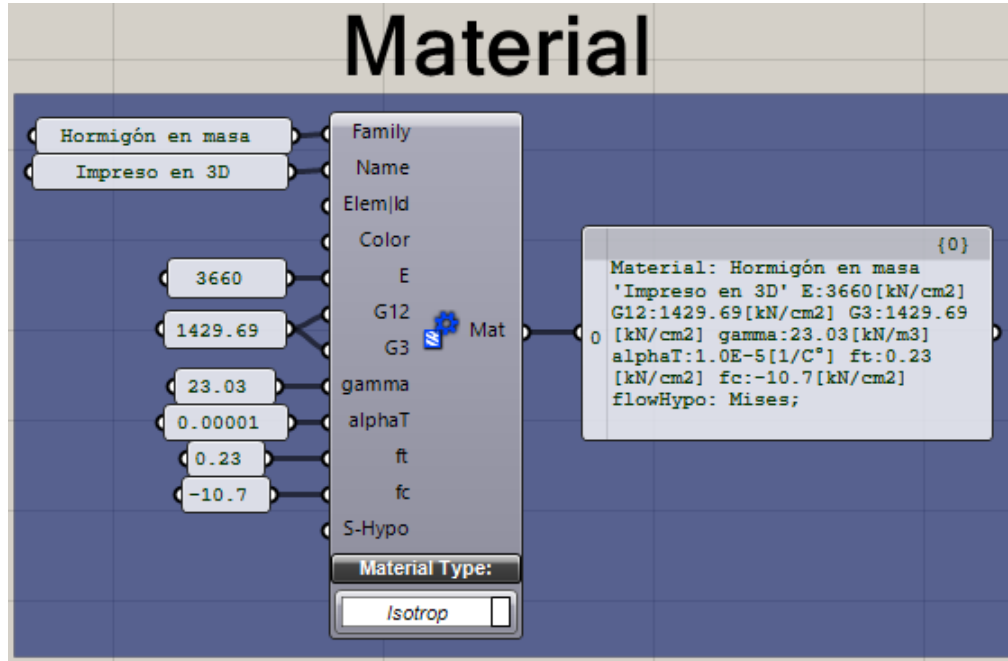


FIGURA 2.5: Características del hormigón impreso introducido dentro de *Karamba 3D*

- Para ello, en primer lugar surge la necesidad de estudiar dicho comportamiento a través de un modelo paramétrico basado en las alturas de los contornos, para después, realizar un nuevo procedimiento de optimización con el fin de determinar la forma de la superficie.

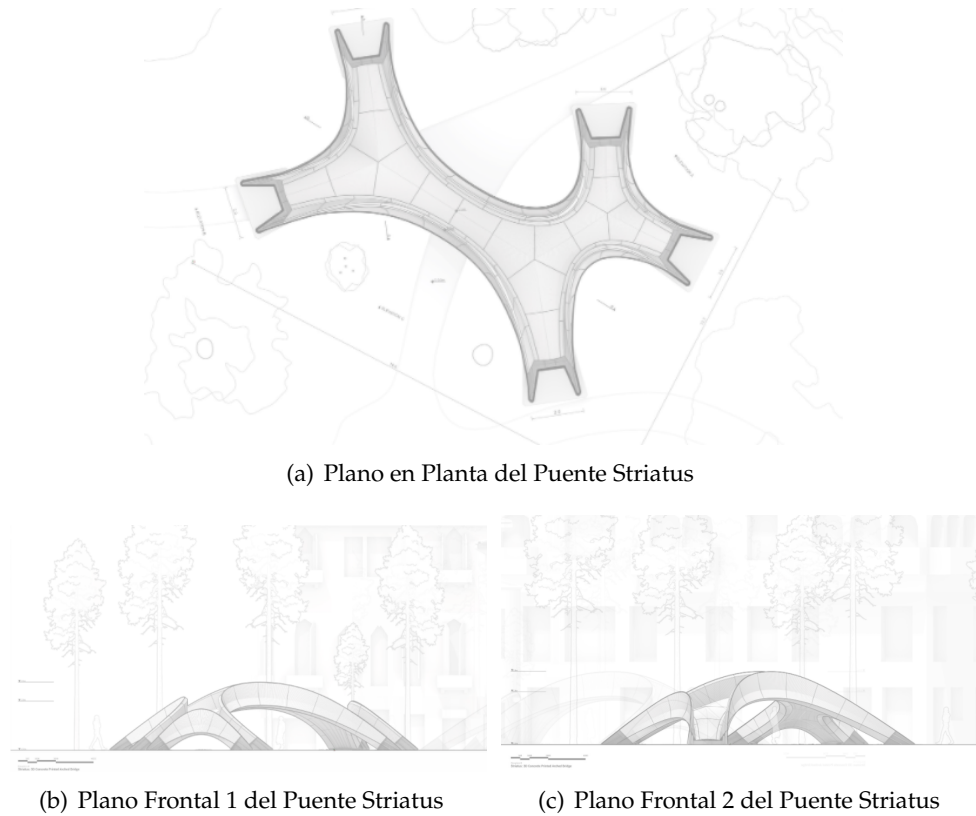
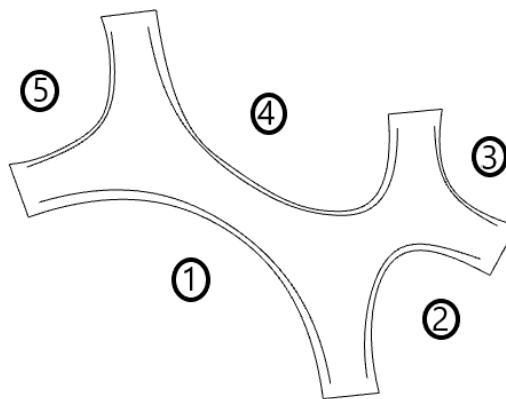


FIGURA 3.2: Conjunto de Planos utilizados para creación de curvas no paramétricas



(a) Curvas no paramétricas en Planta del Puente Striatus, con la numeración de los contornos sometidos a estudio.

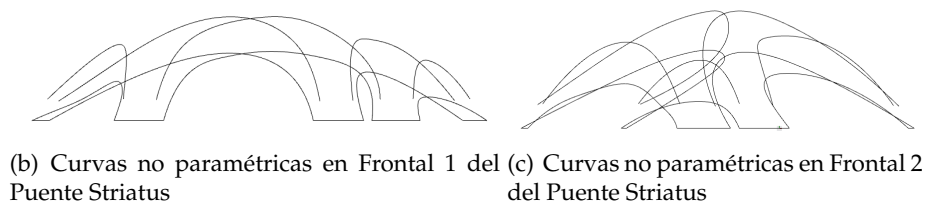


FIGURA 3.3: Visión gráfica desde Rhinoceros de curvas no paramétricas

2. A continuación, se parametrizan dichas curvas obteniendo puntos de dicho contorno (excepto los que pertenezcan a los apoyos) posibilitando el aumento o disminución de la altura de dichos puntos, véase la Figura 3.4.

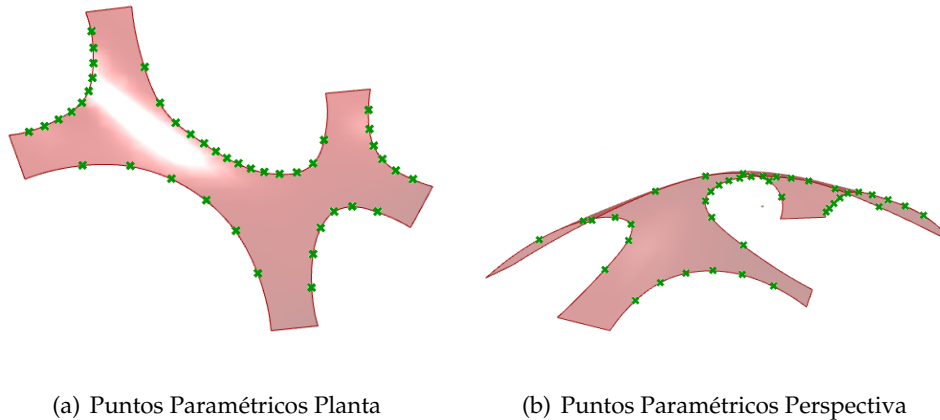


FIGURA 3.4: Control de puntos paramétricos

3. Analizando las diferentes alturas para cada combinación se elegirá la mejor solución en cuanto a resultados de esfuerzos.

En las Figuras 3.5 y 3.6, se muestra la combinación de la parametrización para explorar las diferentes alturas del contorno, para ampliar más la información se detalla en el **Anexo Metodología del modelo paramétrico mediante optimización iterativa manual**

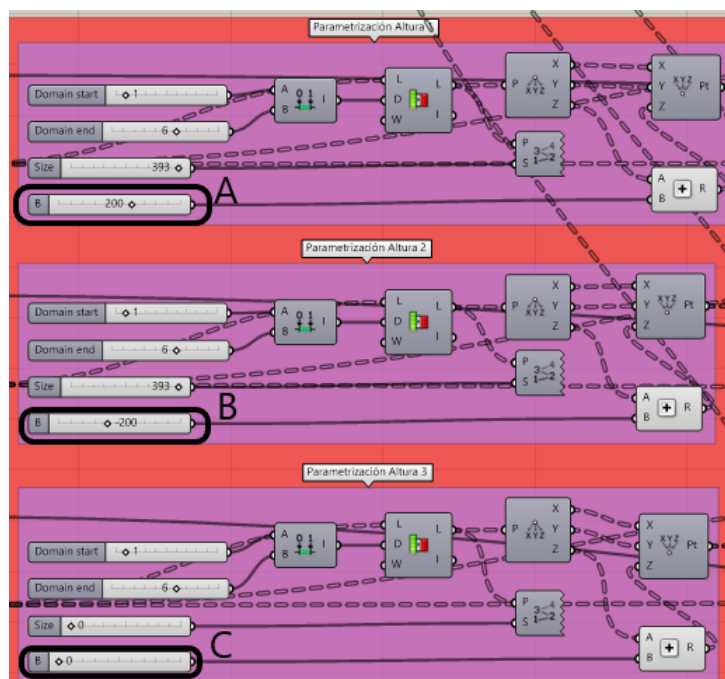


FIGURA 3.5: Combinación paramétrica en altura con respecto a la modelización en el estado inicial, de contornos 1 2 y 3. A) Aumento de 200 milímetros en Contorno 1. B) Disminución de 200 milímetros en Contorno 2. C) Permanece el valor de la iteración 0 para el Contorno 3.

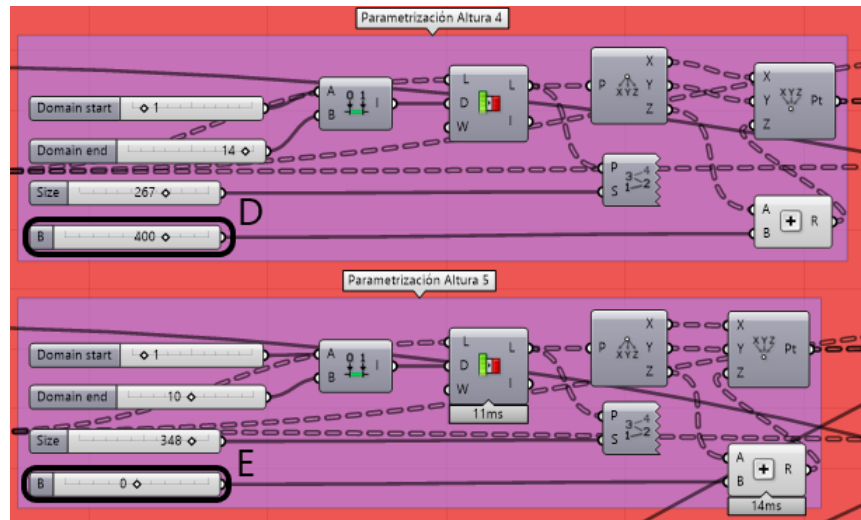


FIGURA 3.6: Combinación paramétrica en altura con respecto a la modelización en el estado inicial, de contornos 4 y 5. D) Aumento en 400 milímetros en Contorno 4. E) Permanece el valor de la iteración 0 para el Contorno 5.

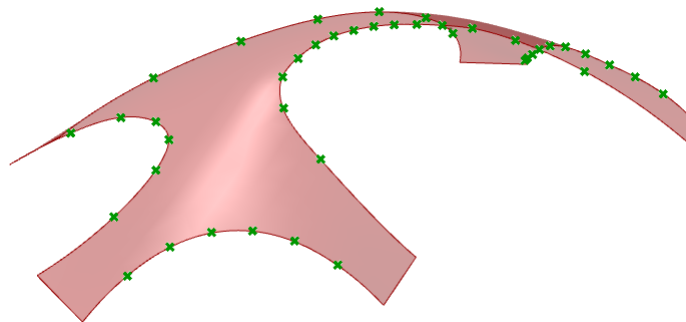


FIGURA 3.7: Resolución gráfica de la combinación final.

En la Figura 3.8, se muestra el esquema final para la generación del modelo paramétrico, cuyas secciones y paquetes de códigos se irán resaltando en los siguientes apartados del **Anexo B**, tanto las entradas como salidas de las ordenes más relevantes.

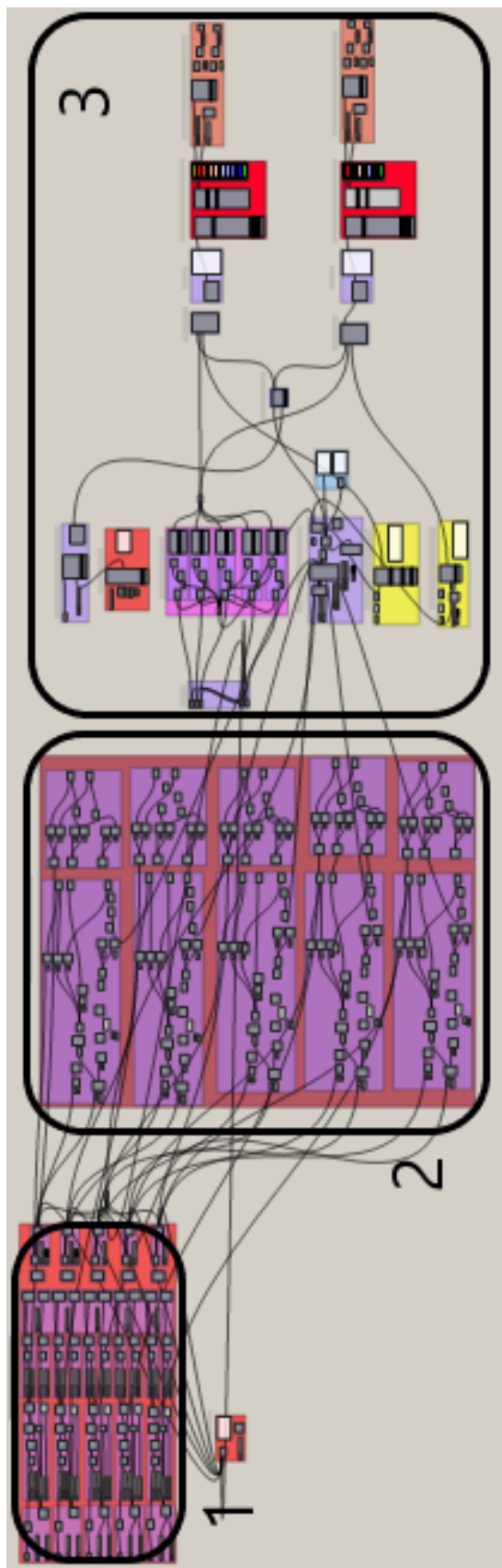


FIGURA 3.8: Modelización paramétrica. 1) Corresponde a la modelización paramétrica de las líneas de contorno. 2) Corresponde a la modelización paramétrica de las abarazaderas. 3) Modelización a través de Karamba 3D.



### 3.3. Método de optimización de forma

Se establece otra vía de optimización del caso, a través de la llamada técnica *Form-finding*. Dicha vía consiste en realizar los siguientes pasos:

1. En primer lugar, se realiza una malla plana establecida en el plano  $z=0$ , la cuál tendrá el contorno de la vista en planta del caso a estudio, véase la Figura 3.9.

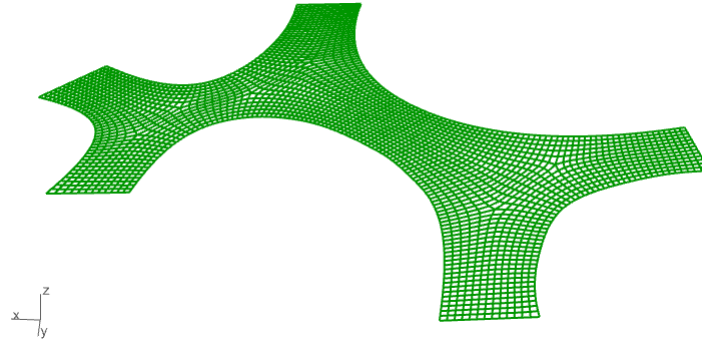


FIGURA 3.9: Resultado final de la malla plana, véase la metodología en **Anexo C**

2. A continuación, dicha malla se somete a unas cargas perpendiculares que aumentarán gradualmente su valor en función de la distancia entre los nodos y los apoyos del sistema.

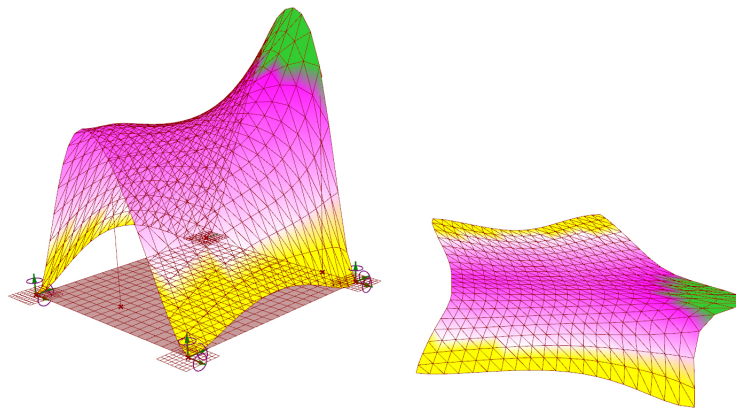


FIGURA 3.10: *Form-finding*. A través de una malla plana, le sometemos a cargas para obtener la configuración deformada, utilizando dicha geometría como input en el estudio que deseamos obtener. [7]

3. A través del algoritmo introducido en *Karamba 3D* se irán comprobando infinidad de soluciones para resolver la compresión pura del sistema.

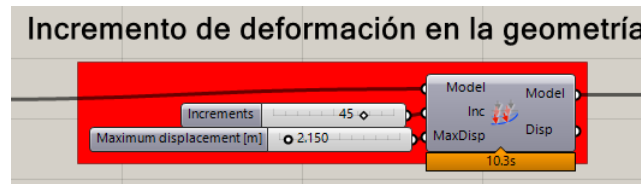


FIGURA 3.11: Algoritmo de Karamba 3D cuya función principal es resolver una geometría a través de parámetros de optimización como en este caso a través de la imposición del máximo desplazamiento nodal, véase **Anexo C**

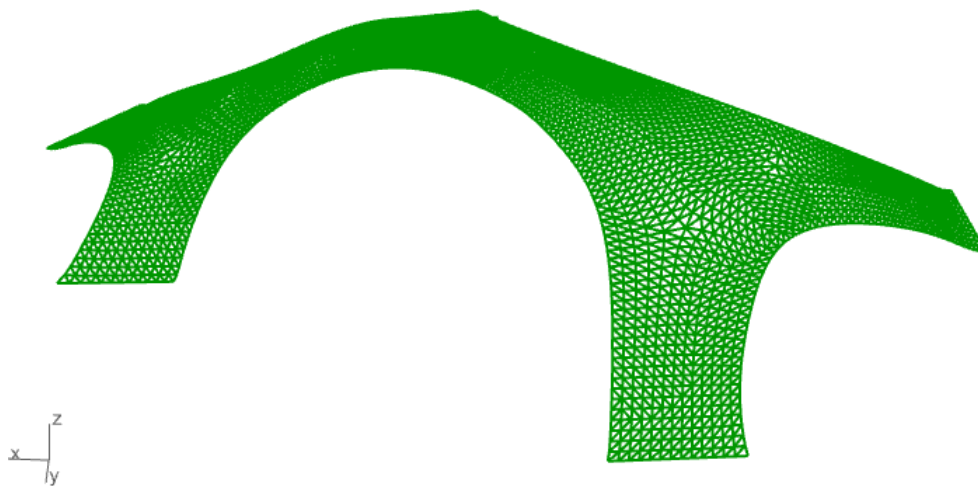


FIGURA 3.12: Resolución gráfica en Rhinoceros de la malla optimizada a través del algoritmo de la Figura 3.11.

En la Figura 3.13, se muestra el esquema final para la generación del modelo paramétrico de *Form-Finding*, cuyas secciones y paquetes de códigos se irán resaltando en el **Anexo C, Metodología de optimización de forma**, tanto las entradas como salidas de las ordenes más relevantes.

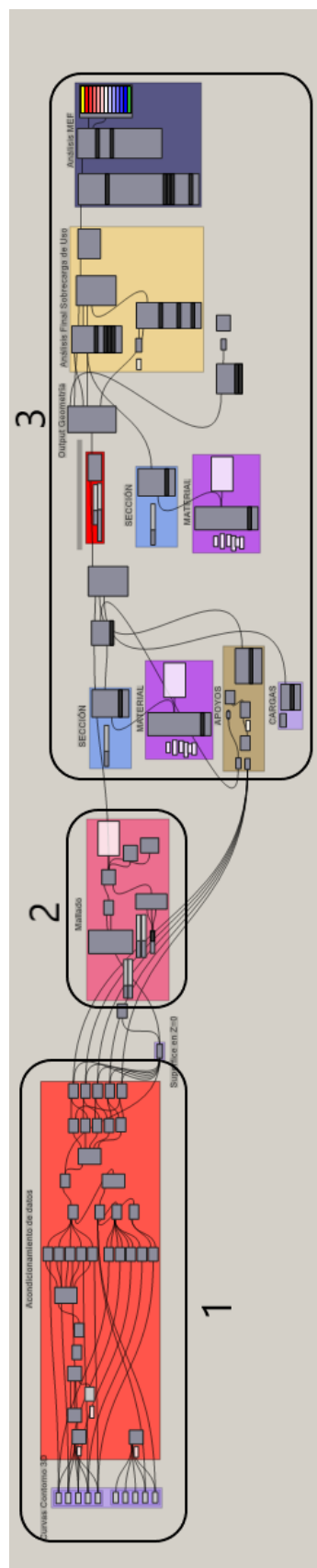


FIGURA 3.13: Modelización paramétrica vía 2. 1) Modelización de la geometría plana. 2) Mallado de la superficie. 3) Modelización en Karamba 3D de ambos estados de carga.

## Capítulo 4

# Resultados

### 4.1. Comparación de los métodos de optimización

A continuación en la Tabla 4.1 se muestran las discrepancias que existen entre las dos vías elegidas. Además dichas características se pueden contrastar a través del visor gráfico de *Rhinoceros*, véase en las Figuras 4.2 y 4.1.

Características	Diseño iterativo	Modelo <i>Form-Finding</i>
Perímetro[m]	19,52	19,49
Altura máxima[m]	2,47	2,15
Área [m <sup>2</sup> ]	52,40	48,68
Volumen de Hormigón [m <sup>3</sup> ]	5,24	4,86
Nodos	2811	3018
Elementos	5216	5598
Apoyos	57	73

CUADRO 4.1: Comparación entre ambos modelos paramétricos

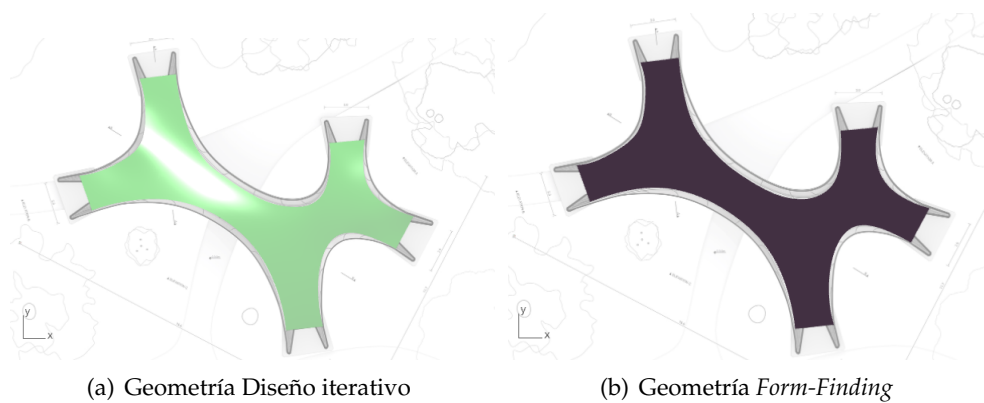


FIGURA 4.1: Comparación en planta entre ambos modelos con la misma escala gráfica

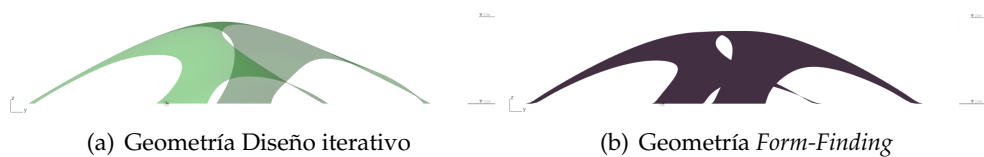


FIGURA 4.2: Comparación en Frontal entre ambos modelos con la misma escala gráfica

A la vista a los resultados expuestos, existe gran similitud entre los diferentes factores que se han estudiado en el análisis de ambas geometrías.

A modo de conclusión, la principal diferencia entre ambas, es la altura máxima definida. El modelo asociado al Diseño iterativo posee el valor superior de ambas, lo cuál produce una mayor variación de pendientes dentro de la superficie, ocasionando una discretización a la hora del mallado más irregular debido a obtener gradientes de curvatura de mayor valor.

## 4.2. Resultados numéricos

En los siguientes apartados se procede a desarrollar los principales resultados obtenidos a través de las diferentes hipótesis de carga.

Cabe resaltar que para optimizar dichos resultados en el Diseño iterativo, será necesario estudiar en diferentes iteraciones la influencia que tiene la altura de las curvas paramétricas en su comportamiento estructural, ya que las condiciones de contorno como puede ser los apoyos y la hipótesis de carga van a permanecer constantes.

El orden en qué se va a presentar los resultados son el siguiente:

1. **Utilización:** refleja la relación entre la resistencia a tracción (valor positivo) o compresión (valor negativo) del elemento con respecto a la tensión de comparación del material, en nuestro caso corresponde a la tensión Von Mises. Dicho factor será el más relevante de cara al estudio para poder obtener una superficie que trabaje a compresión pura.
2. **Desplazamientos:** refleja el movimiento de la superficie en la configuración deformada. Además es la primera variable que calcula el módulo de elementos finitos. Cabe destacar que por defecto en *Karamba 3D* sus unidades son en centímetros.
3. **Tensiones principales:** hacen referencia a las direcciones principales dónde se encuentran los máximos valores de tensión.
4. **Líneas de Tensiones principales:** ilustran de una manera visual la distribución de cargas dentro de la estructura. Como se verá en apartados posteriores, se distinguirán por partes atendiendo a la dirección analizada, *Karamba 3D* ofrece tanto la principal 1 como la principal 2.
5. **Tensión Von Mises:** criterio de resistencia de estructuras utilizado por defecto en el programa *Karamba 3D*, véase en la Ecuación 2.8, aunque en el caso del hormigón en masa carecería de sentido, al ser un material sin resistencia a la tracción.

En los siguientes apartados, se establece el comportamiento de ambas a estructuras sometidas a diferentes hipótesis de carga. Dichas hipótesis vendrán regidas por la norma IAP (*Instrucciones sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes y carreteras, para más información véase el Anexo E*), cuyas hipótesis de carga vendrán dadas por:

1. Primer ensayo de cargas, carga uniformemente distribuida con dirección y sentido Z de valor  $5\text{kN/m}^2$
2. Segundo ensayo de cargas, carga puntual con dirección y sentido Z de valor 10kN.

### 4.2.1. Modelo iterativo

#### Ensayo de Cargas 1

Para este primer apartado, se toman las curvas paramétricas en su estado optimizado manualmente, su configuración está expuesta en las Figuras 3.5, 3.6 3.7. En primer lugar se muestra gráficamente la introducción de sobrecarga de uso de  $5\text{kN/m}^2$  y las condiciones de contorno de empotramiento en los apoyos en la Figura 4.3

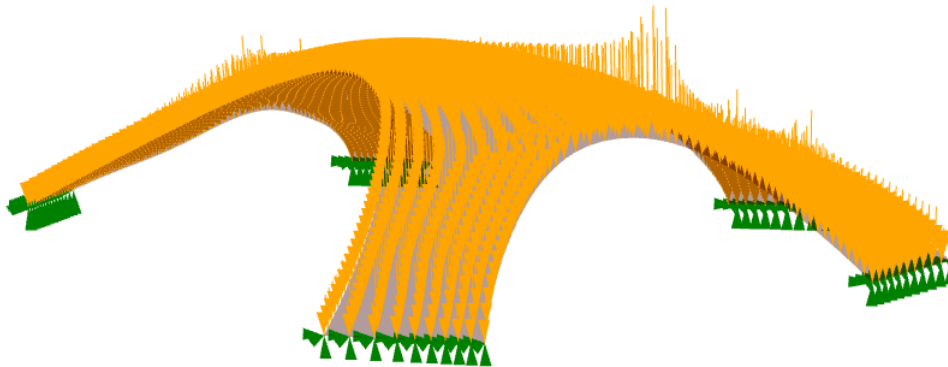
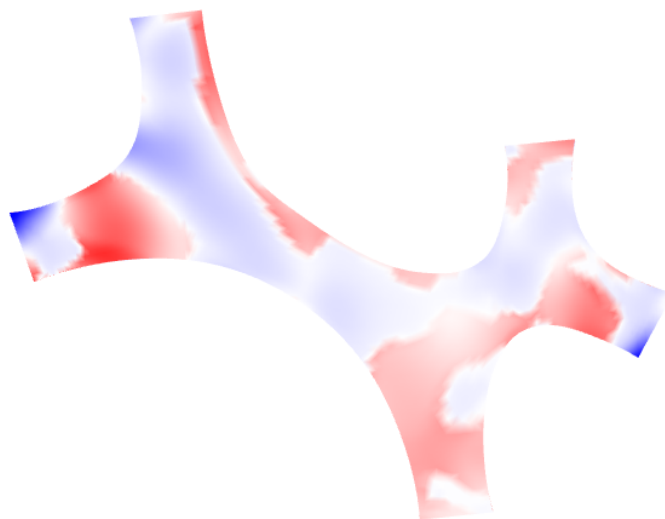
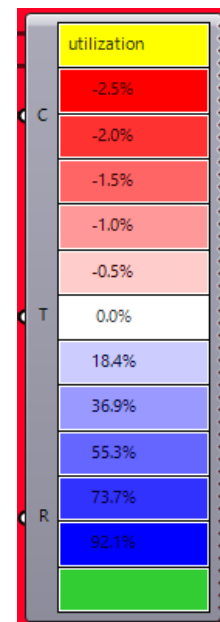


FIGURA 4.3: Representación Gráfica de Cargas y Condiciones de Contorno

Una vez establecido el flujo dentro de *Grasshopper* de la parte asociada a elementos finitos de *Karamba 3D*, (véase **Anexo B, apartado B.6**) se obtienen los siguientes resultados:



(a) Representación Gráfica de Utilización de la superficie Superior



(b) Leyenda asociada a la Utilización de las superficies

FIGURA 4.4: Utilización Método iterativo

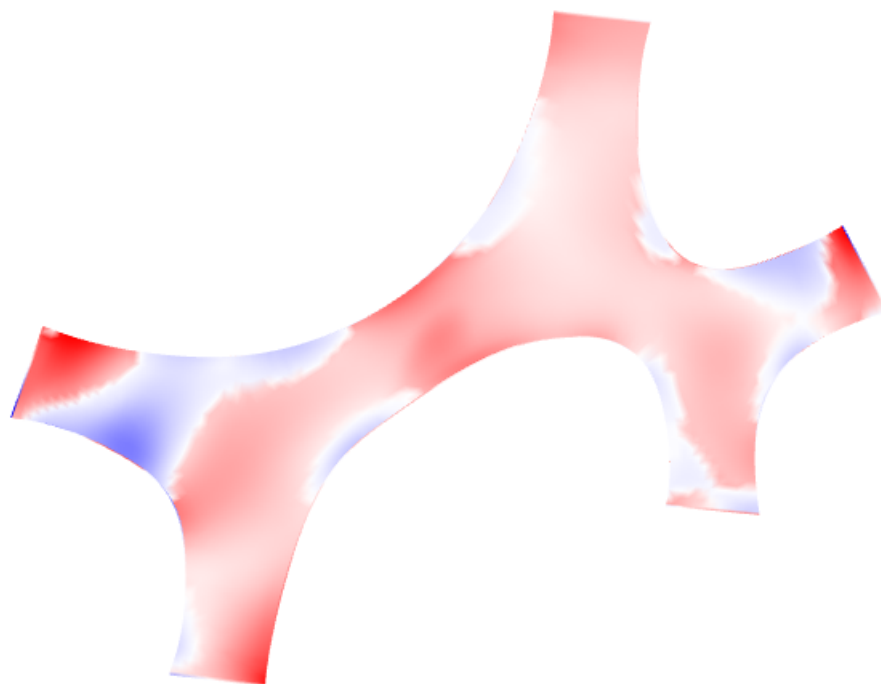
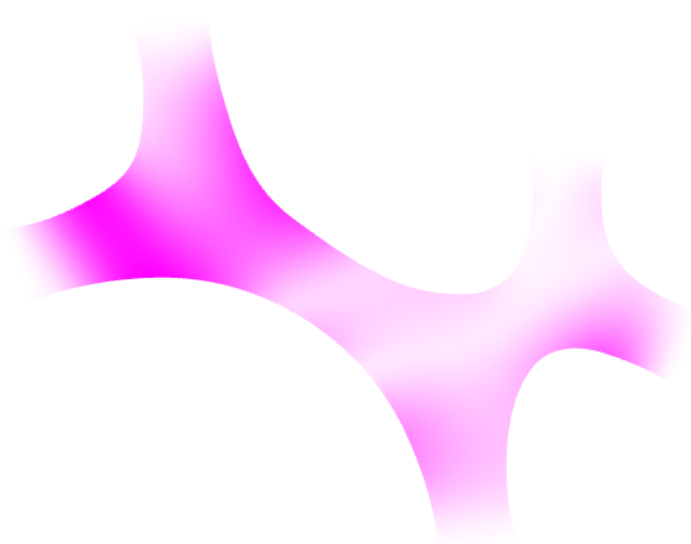
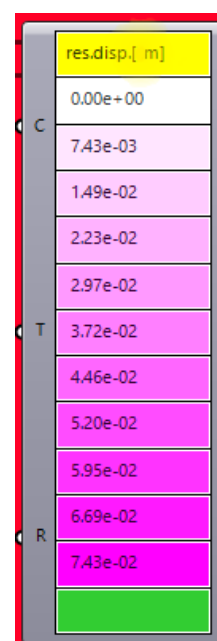


FIGURA 4.5: Representação Gráfica de Utilização da superfície Inferior



(a) Representação Gráfica de deslocamentos



(b) Leyenda asociada a los desplazamientos

FIGURA 4.6: Desplazamientos

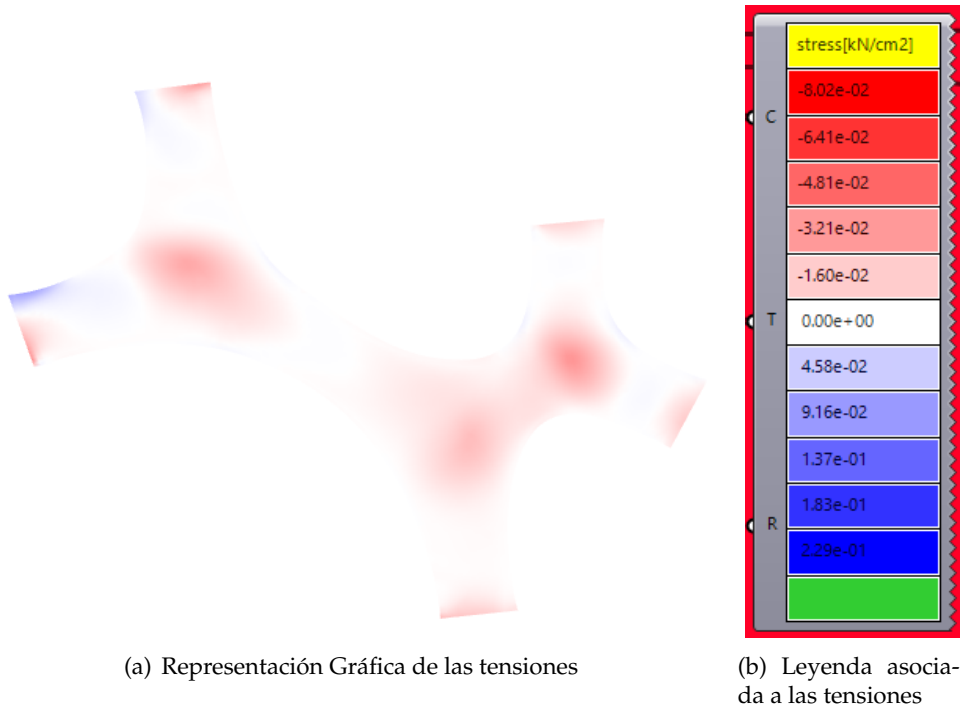


FIGURA 4.7: Tensión principal 1

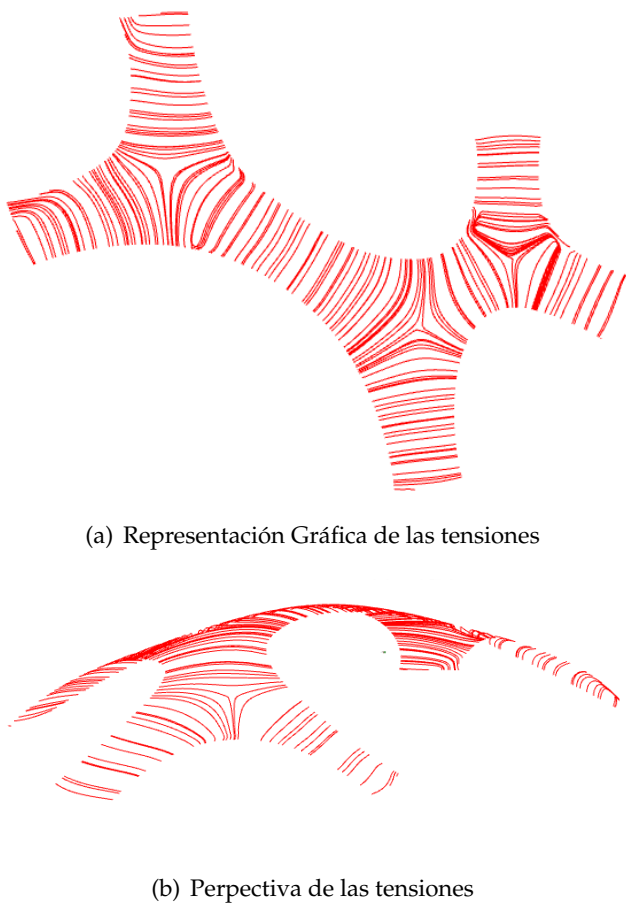
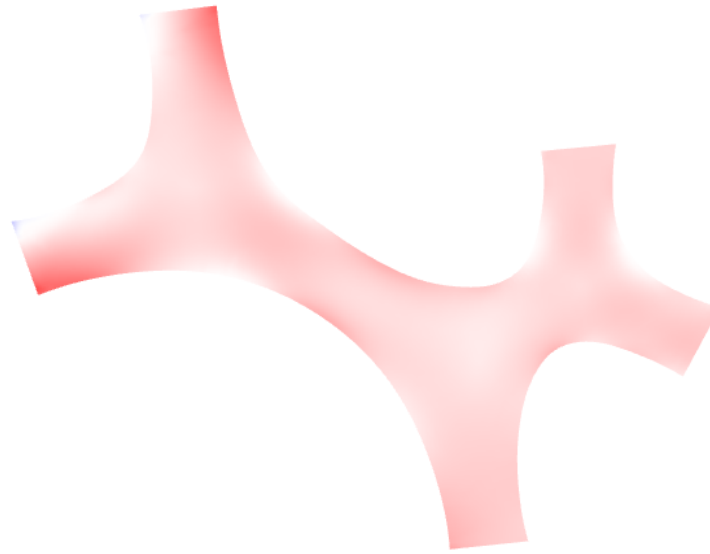
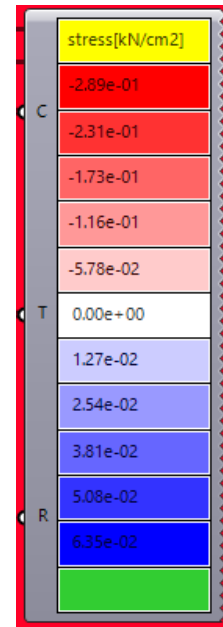


FIGURA 4.8: Isolíneas de tensión 1 Método iterativo



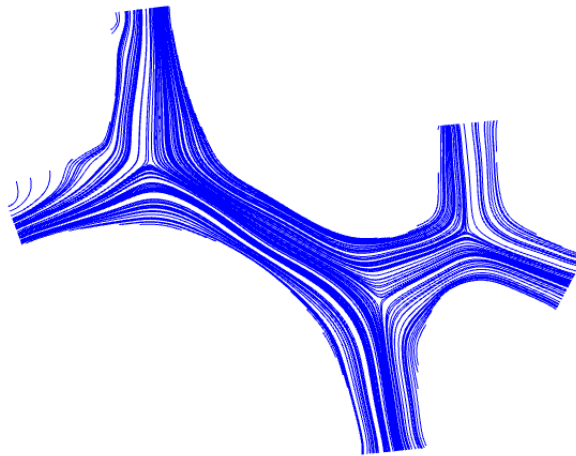


(a) Representación Gráfica de las tensiones

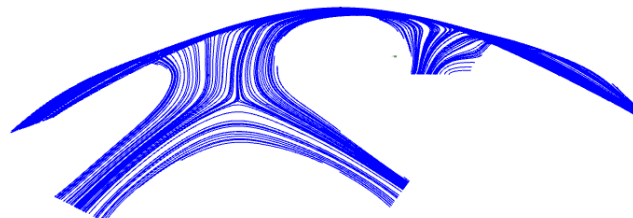


(b) Leyenda asociada a las tensiones

FIGURA 4.9: Tensión principal 2



(a) Representación Gráfica de las tensiones



(b) Perspectiva de las tensiones

FIGURA 4.10: Isolíneas de tensión 2 Método iterativo

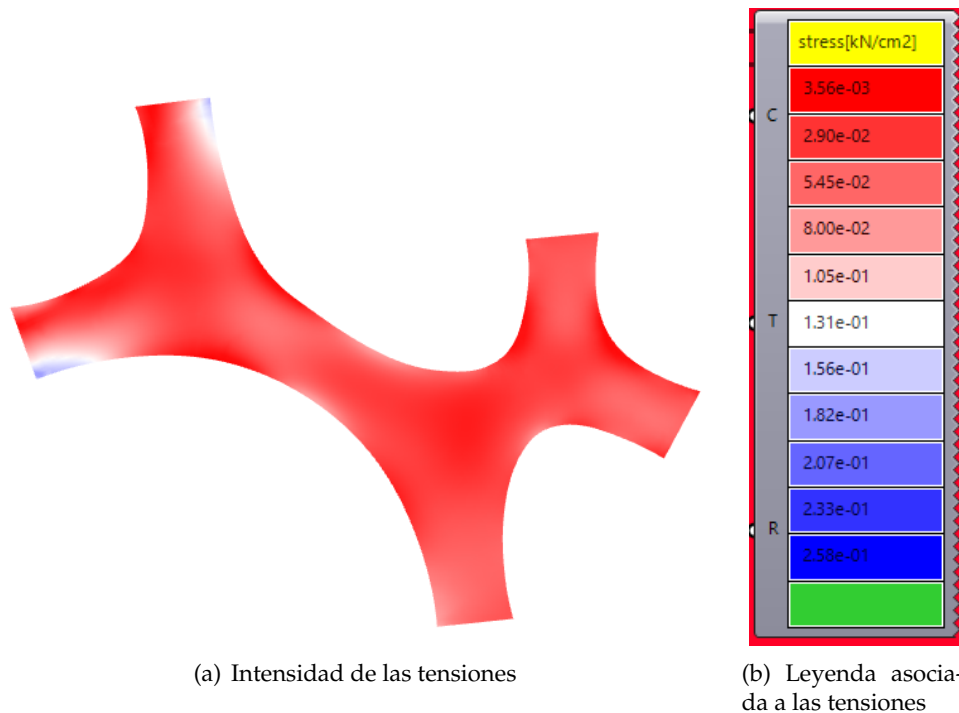


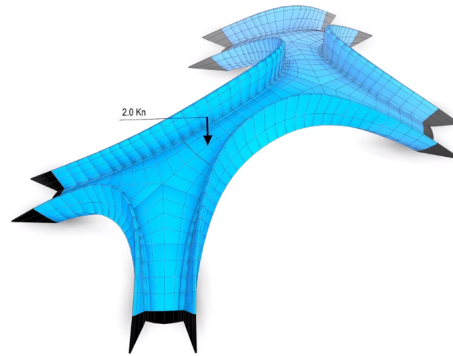
FIGURA 4.11: Tensión equivalente de Von mises

- Dentro de la utilización del material, se observa en las Figuras 4.4 y 4.5 aparecen de color azul, asociado a que el material tiene un comportamiento a tracción (valores positivos de esfuerzos y utilización), y por lo tanto podría ocasionar problemas para el hormigón sin armar.
- Máximo desplazamiento de 74,31 milímetros ubicada en el semiplano izquierdo.
- Máximas tensiones principales 1 ubicadas en las conexiones de las ramificaciones de los apoyos. Como se muestra en la Figura 4.8, las líneas de tensión en dichas zonas invierten su dirección gradualmente generando un aumento en el efecto de concentrador de tensiones.

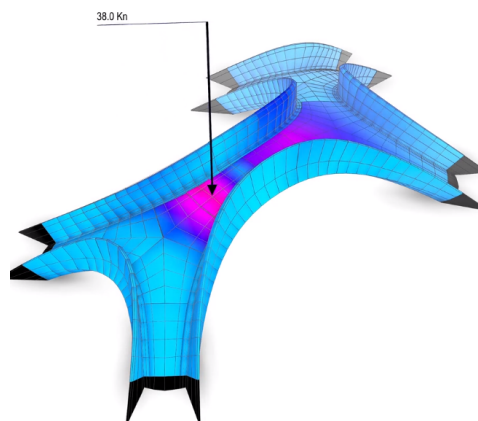
### Ensayo de Cargas 2

A continuación, se muestran los resultados asociados al comportamiento de la estructura paramétrica aplicando la carga puntual de 10kN.

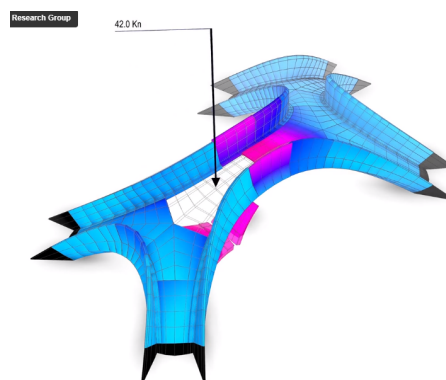
La ubicación de dicha carga puntual, se ha establecido a través de la posición estudiada en el diseño original por Zaha Hadid Architects y Block Research Group, véase la Figura 4.12.



(a) Comportamiento con una carga puntual de 1 kN.



(b) Incremento de la carga puntual



(c) Colapso de la estructura al superar el incremento de carga puntual de 42 kN

FIGURA 4.12: Comportamiento de la estructura final del puente striatus, conforme el incremento de carga puntual en la parte izquierda.

[5]

En primer lugar se muestra el esquema final en la Figura 4.13 donde se puede apreciar el modelo final de análisis de *Karamba 3D*.

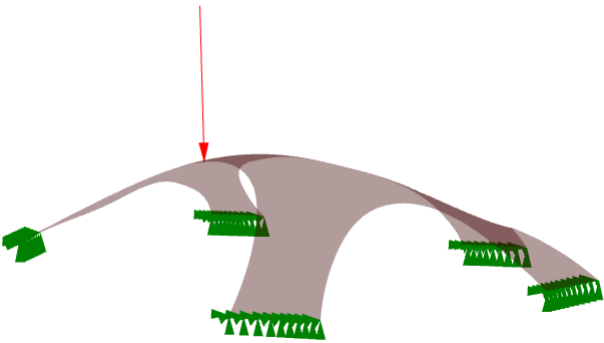
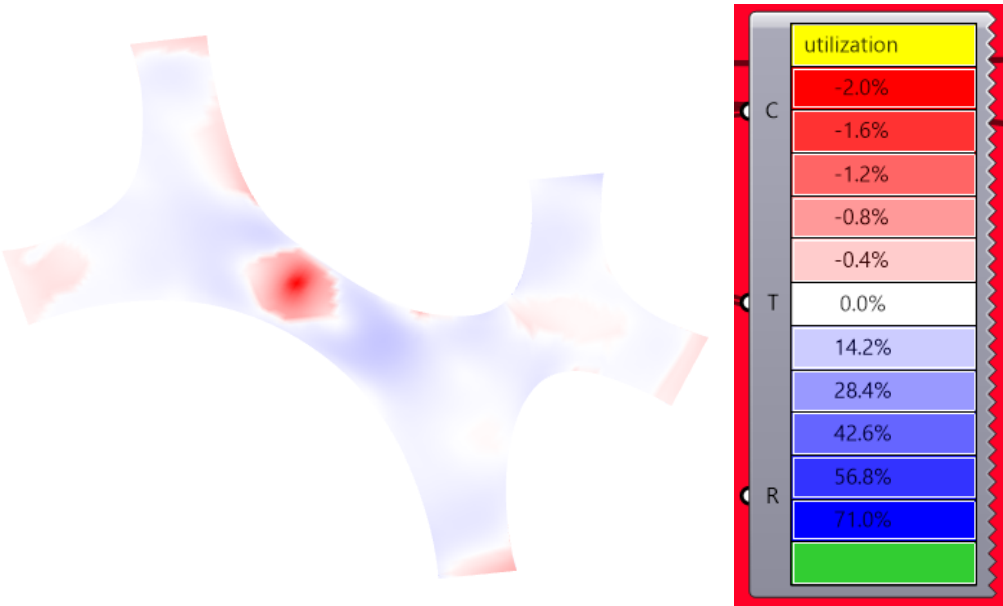


FIGURA 4.13: Representación Gráfica de Cargas y Condiciones de Contorno



(a) Representación Gráfica de Utilización de la superficie Superior (b) Leyenda asociada a la Utilización de las superficies

FIGURA 4.14: Utilización Método iterativo

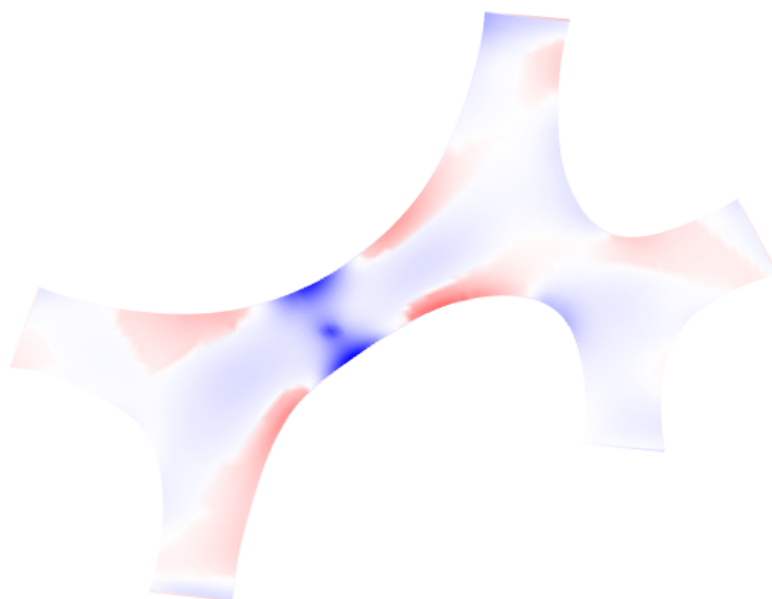


FIGURA 4.15: Representación Gráfica de Utilización de la superficie Inferior

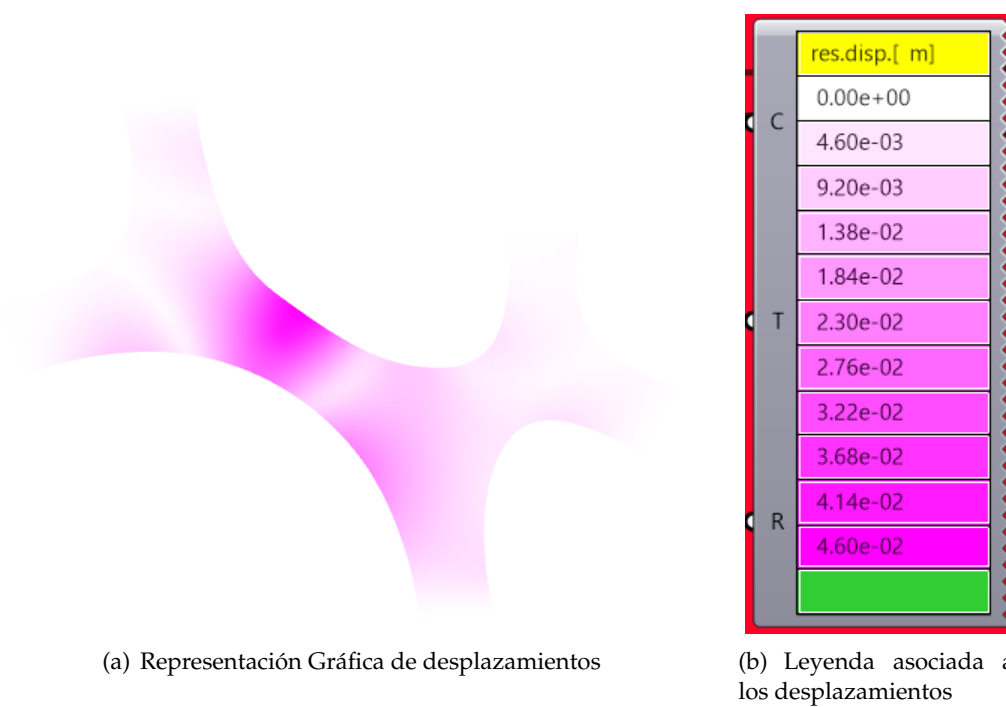


FIGURA 4.16: Desplazamientos Método iterativo

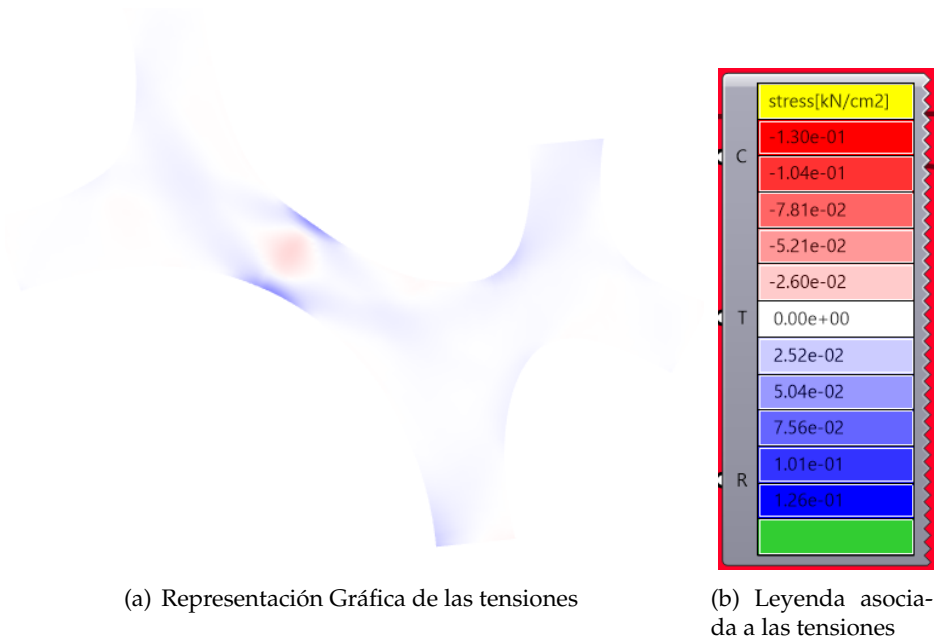


FIGURA 4.17: Tensión principal 1 Método iterativo

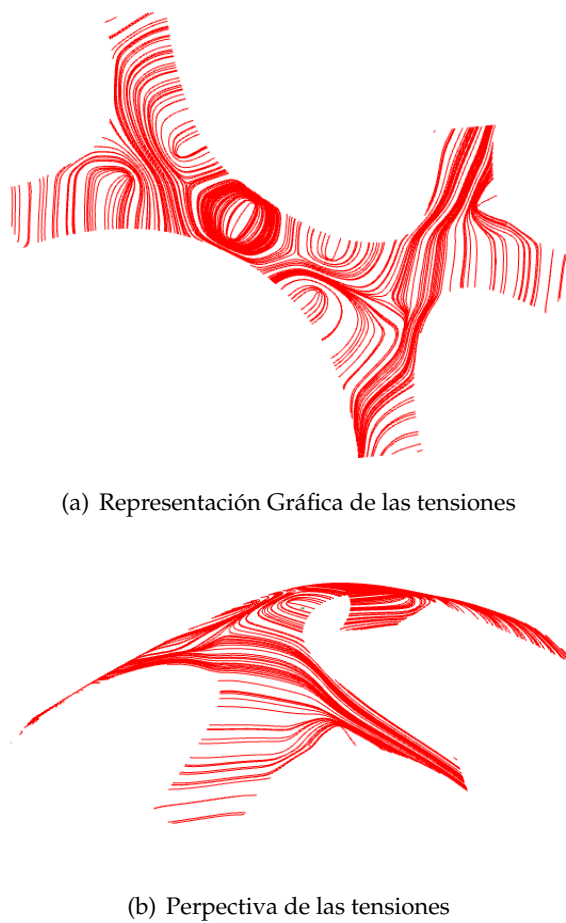


FIGURA 4.18: Isolíneas de tensión 1 Método iterativo

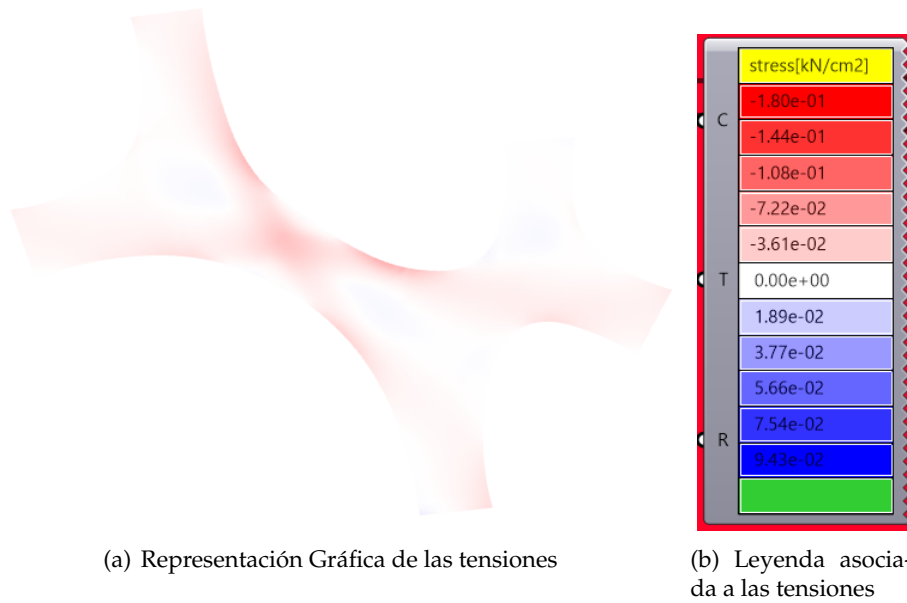


FIGURA 4.19: Tensión principal 2 Método iterativo



FIGURA 4.20: Isolíneas de tensión 2 Método iterativo

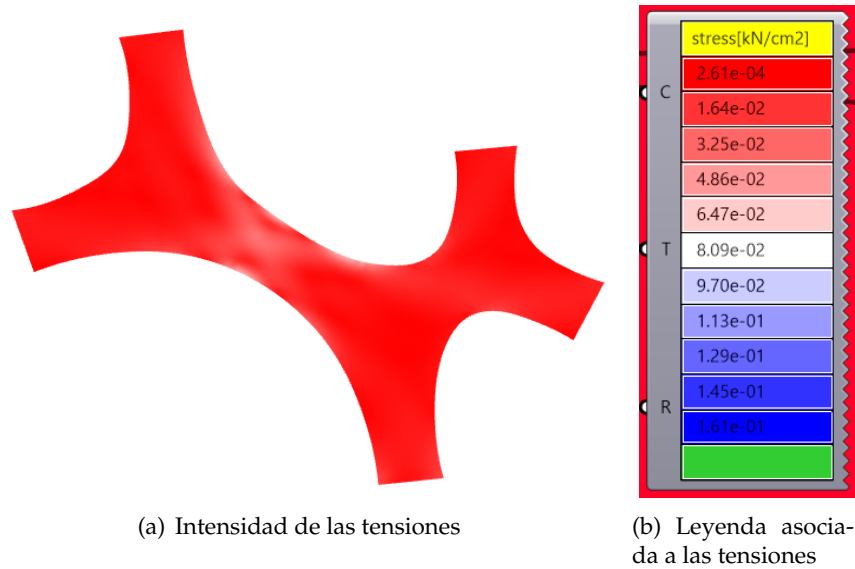


FIGURA 4.21: Tensión equivalente de Von Mises Método iterativo

- Dentro de la utilización del material, se observa en las Figuras 4.14 y 4.15, la zona de aplicación de la carga se encuentra la flexión compuesta, apareciendo compresión en la parte superior y tracción en la zona inferior. Además predomina el valor de tracción a lo largo de ambas superficies.
- Máximo desplazamiento de 46 milímetros ubicada en las proximidades donde se ha establecido la carga puntual
- Máximas tensiones principales ubicadas en la zona de aplicación de carga. Como se muestra en la Figura 4.8, las isolíneas de tensión forman remolinos provocando que la dirección de las mismas se invierten totalmente creando zonas de material que trabajan de forma ineficaz.



### 4.2.2. Modelo de optimización de forma

#### Ensayo de Cargas 1

Para los apartados siguientes, se seguirá la misma metodología de posicionamiento de cargas. Para más detalle de dicho modelo véase en el **Anexo C**.

En primer lugar se muestra el esquema final en la Figura 4.22 donde se puede apreciar el modelo final de análisis de Karamba 3D con la aplicación de la carga de  $5\text{kN/m}^2$ .

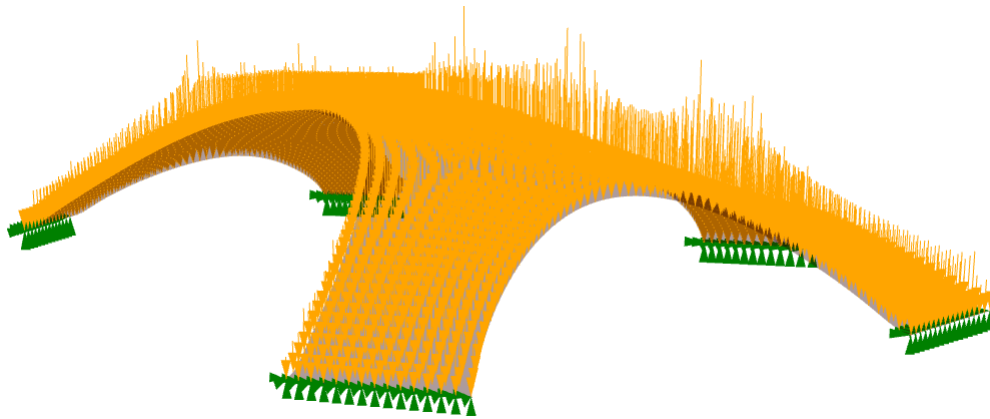
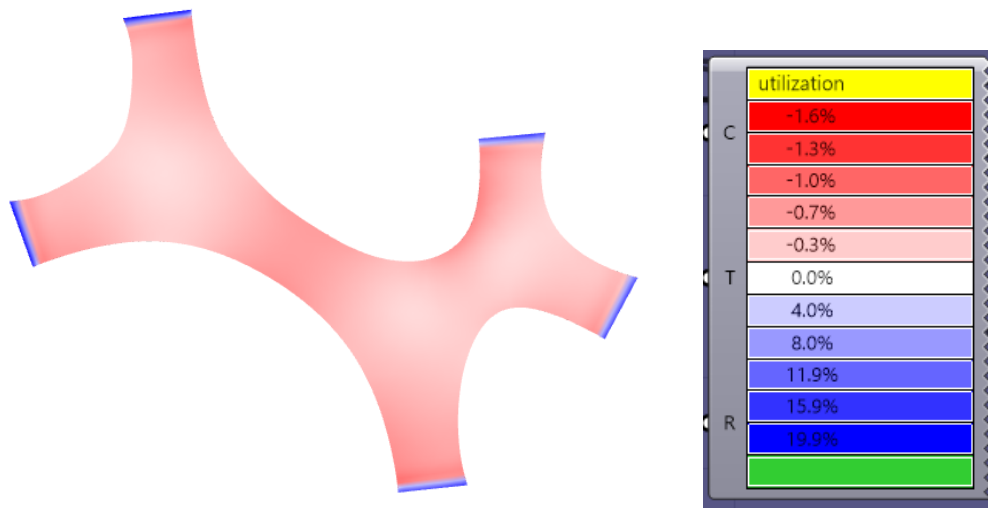


FIGURA 4.22: Representación Gráfica de Cargas y Condiciones de Contorno



(a) Representación Gráfica de Utilización del superficie Superior (b) Leyenda asociada a la Utilización del superficie

FIGURA 4.23: Utilización geometría *Form-Finding*.

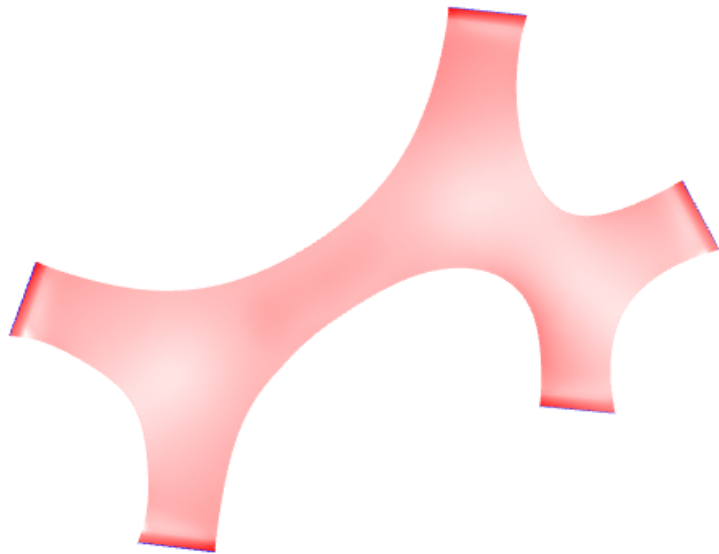


FIGURA 4.24: Representación Gráfica de Utilización del superficie Inferior

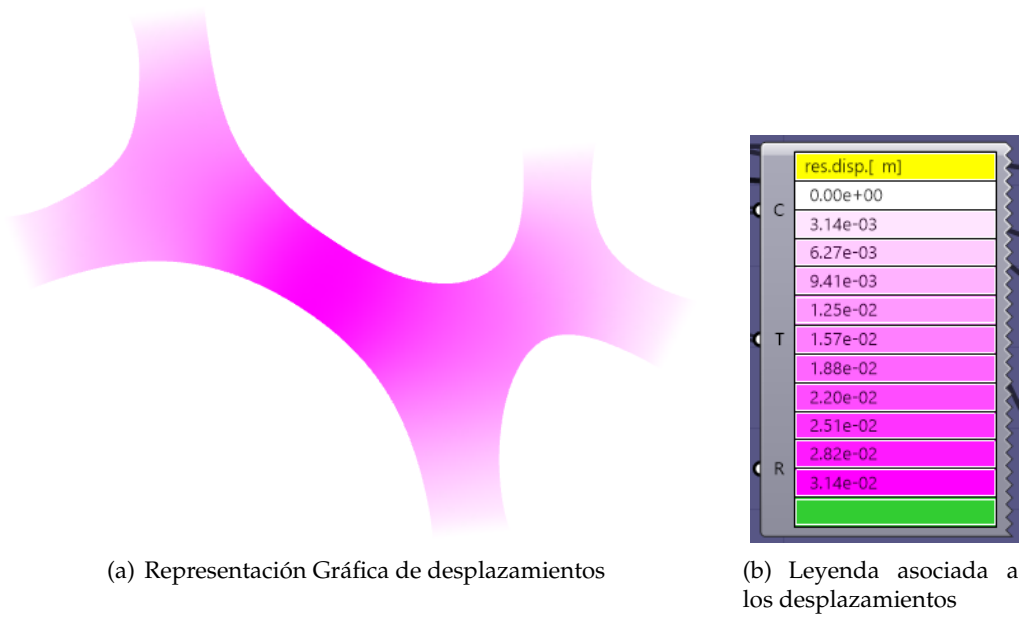
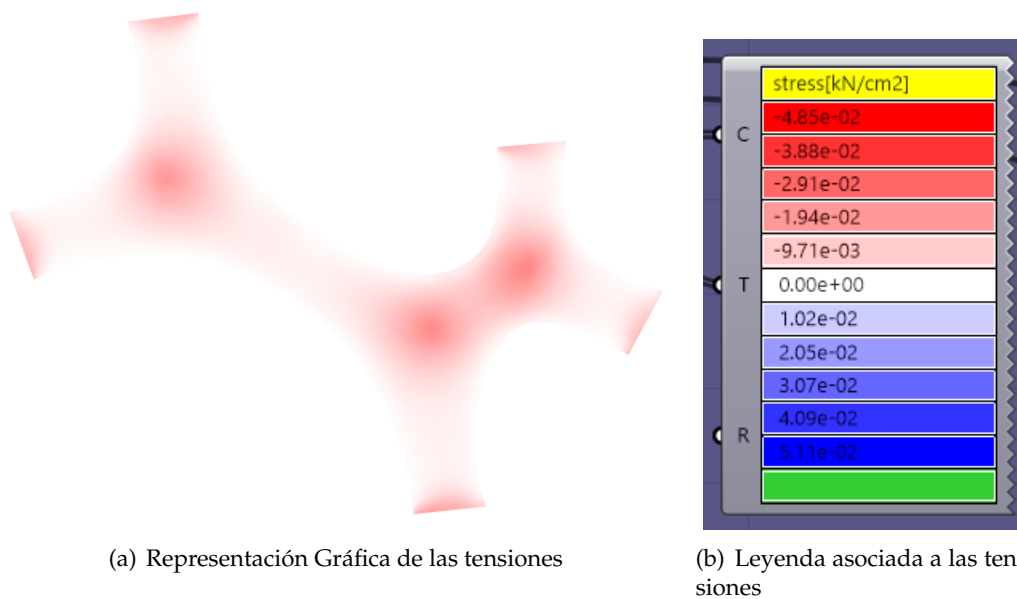
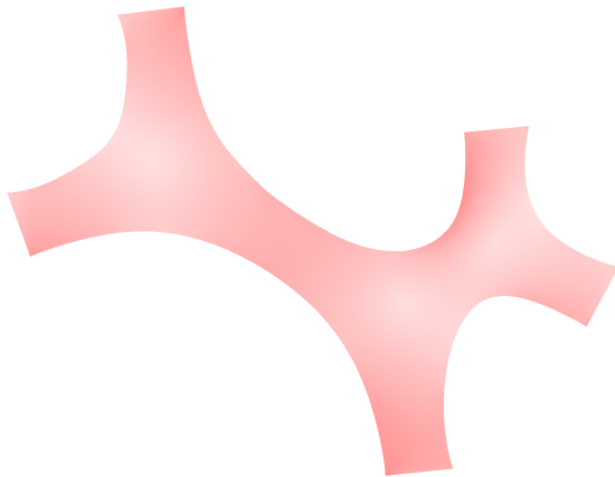
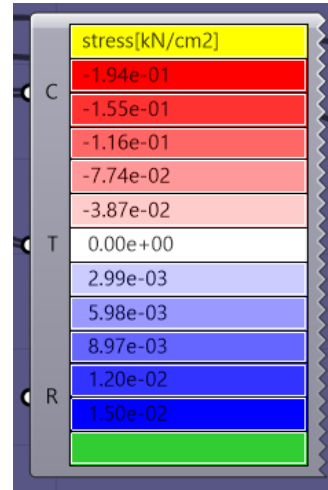


FIGURA 4.25: Desplazamientos geometría *Form-Finding*.

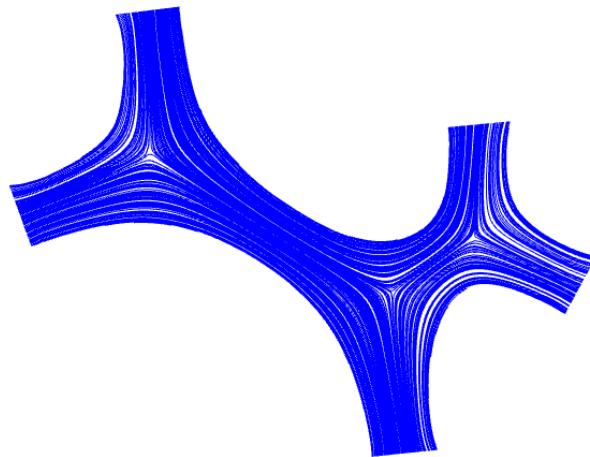
FIGURA 4.26: Tensión principal 1 geometría *Form-Finding*FIGURA 4.27: Isolíneas de tensión 1 geometría *Form-Finding*.



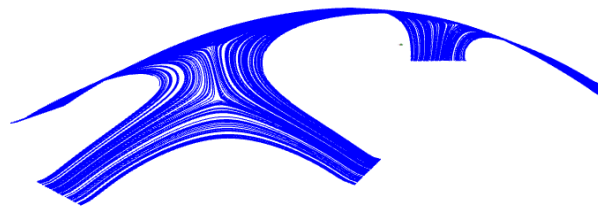
(a) Representación Gráfica de las tensiones



(b) Leyenda asociada a las tensiones

FIGURA 4.28: Tensión principal 2 geometría *Form-Finding*.

(a) Representación Gráfica de las tensiones



(b) Perspectiva de las tensiones

FIGURA 4.29: Isolíneas de tensión 2 geometría *Form-Finding*.

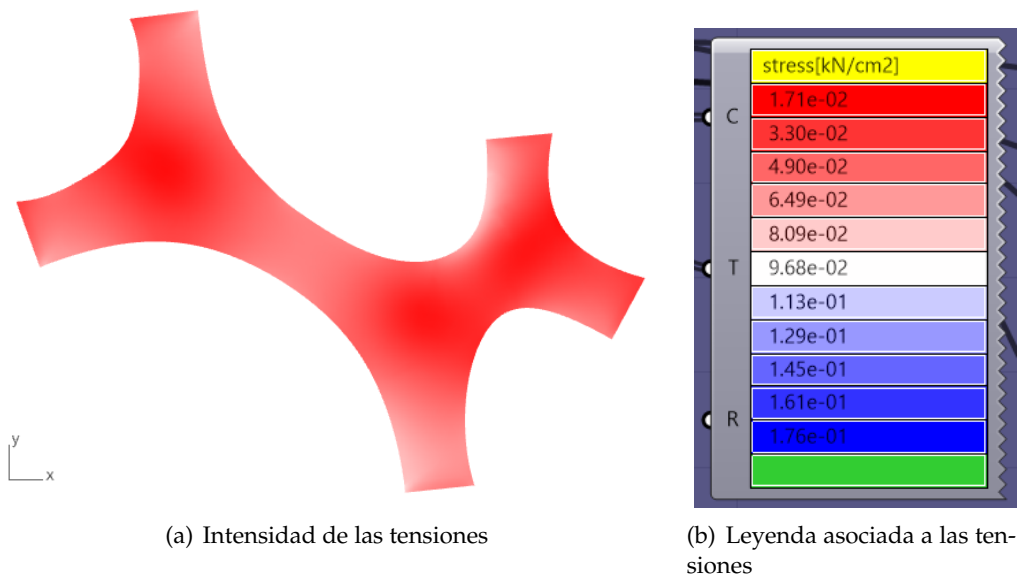


FIGURA 4.30: Tensión equivalente de Von mises geometría *Form-Finding*.

- Dentro de la utilización del material, se observa en las Figuras 4.23 y 4.24, donde se establece un campo de compresión constante a lo largo de la superficie tanto superior como inferior, excepto en los apoyos dónde aparecen efectos de tracción.
- Máximo desplazamiento de 31,4 milímetros ubicada en la zona central de la pasarela.
- Máximas tensiones principales 1 ubicadas tanto en las conexiones de las ramificaciones de apoyos como en los mismos apoyos. Además las máximas tensiones principales 2 se encuentran de forma constante a lo largo de la pasarela, siendo estas mayores que las principales 1.
- Tanto las isolíneas de tensión principal 1 como las de tensión principal 2, forman trayectorias totalmente en concordancia con las líneas del contorno siendo las primeras perpendiculares y las segundas tangentes, lo que establece un flujo de carga homogéneo de compresión pura.

Ensayo de Cargas 2

Este apartado trata de exponer los principales resultados del análisis de la carga puntual para la vía de optimización de forma. En primer lugar se muestra el esquema de cargas en la Figura 4.31.

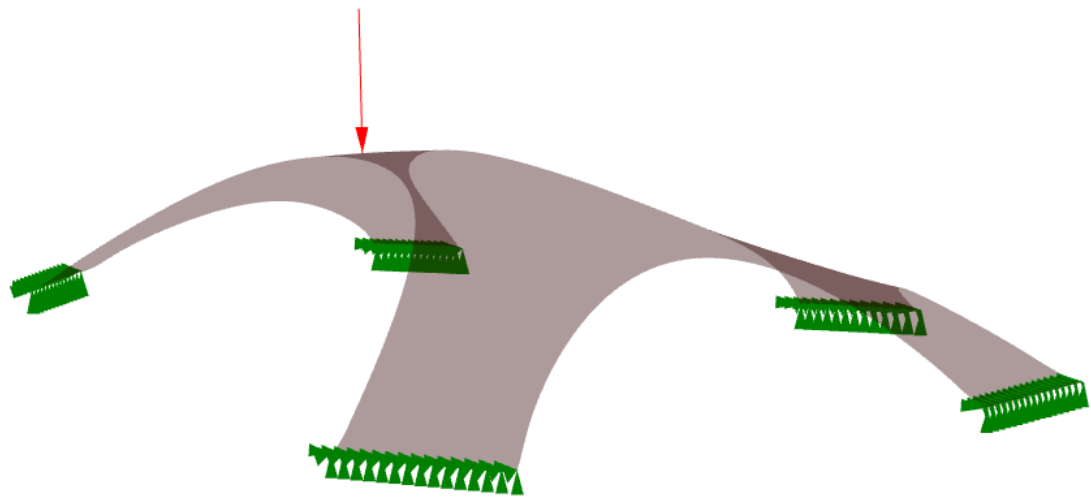
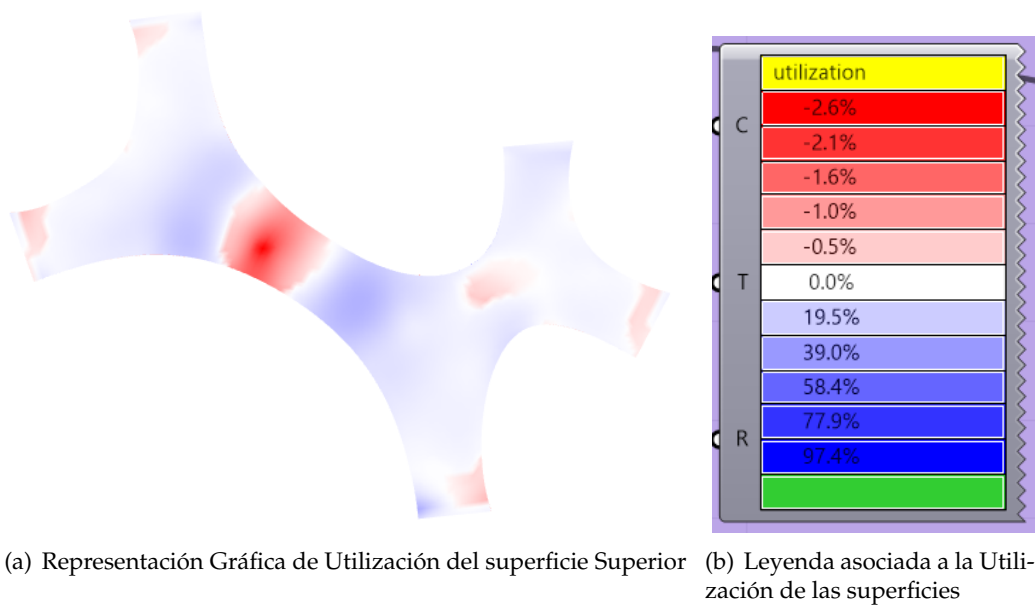


FIGURA 4.31: Representación Gráfica de Cargas y Condiciones de Contorno



(a) Representación Gráfica de Utilización del superficie Superior (b) Leyenda asociada a la Utilización de las superficies

FIGURA 4.32: Utilización geometría *Form-Finding*.

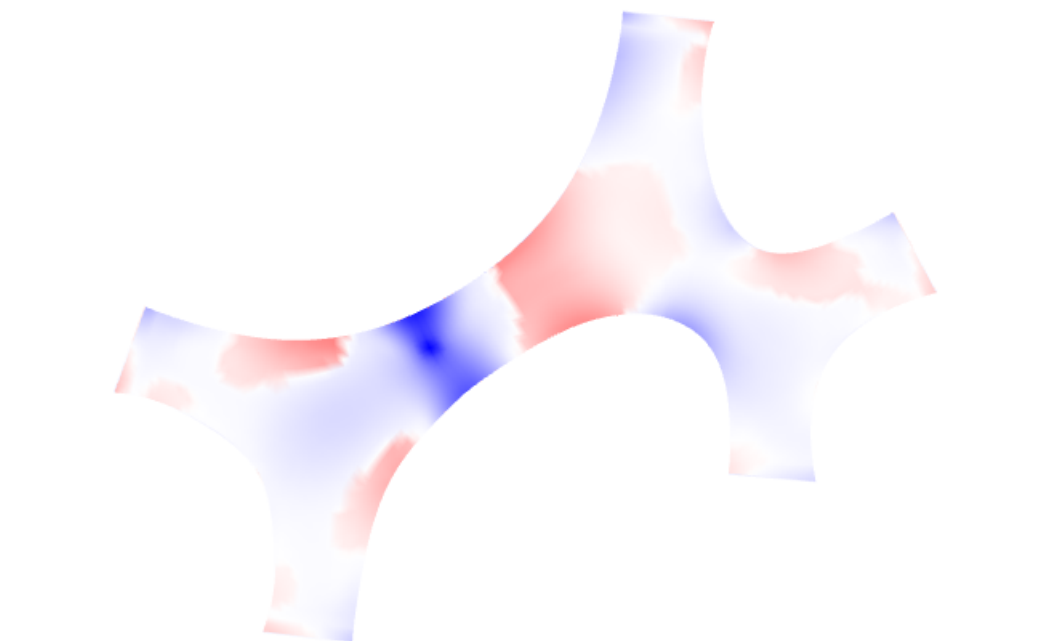
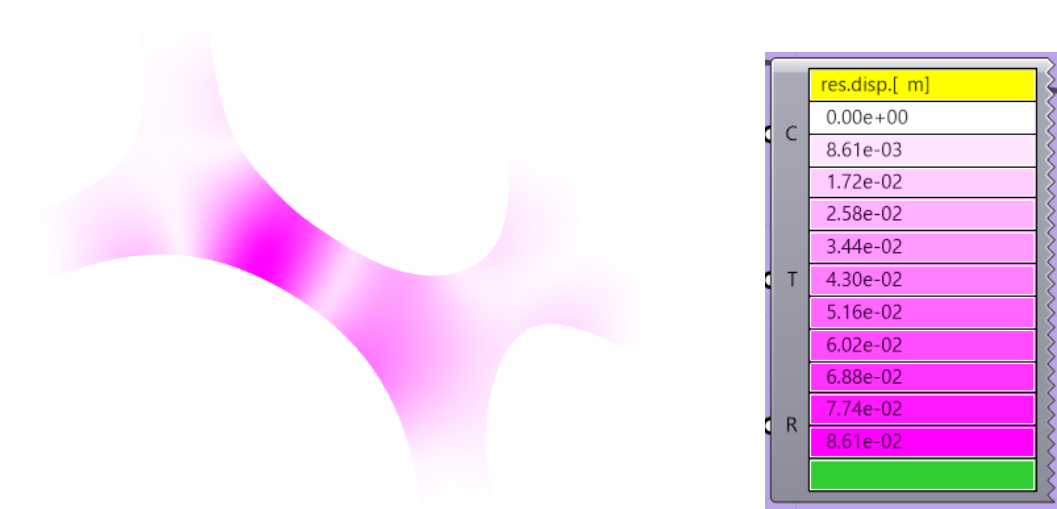


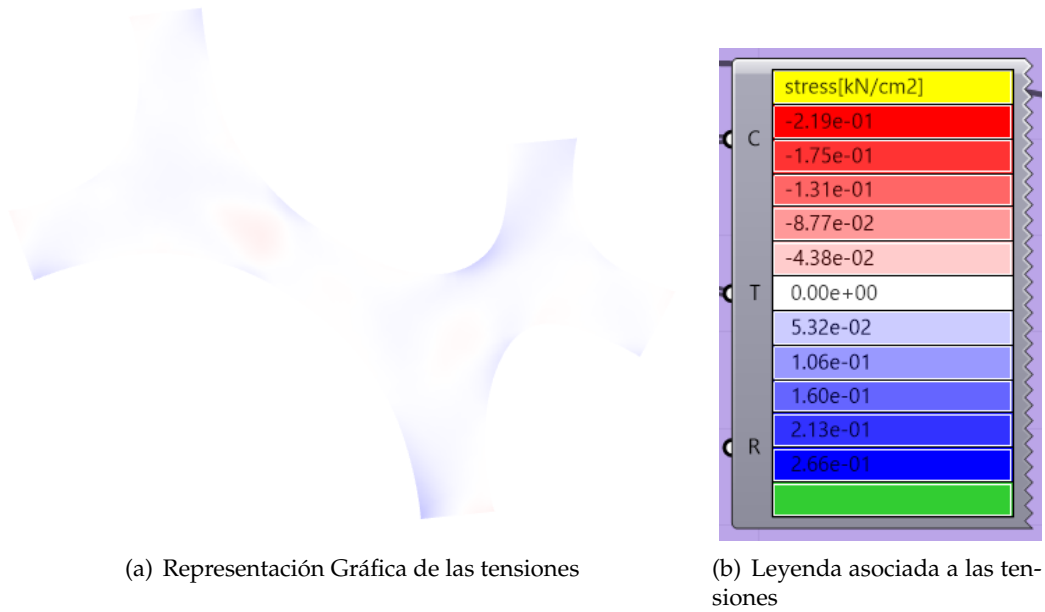
FIGURA 4.33: Representación Gráfica de Utilización del superficie Inferior



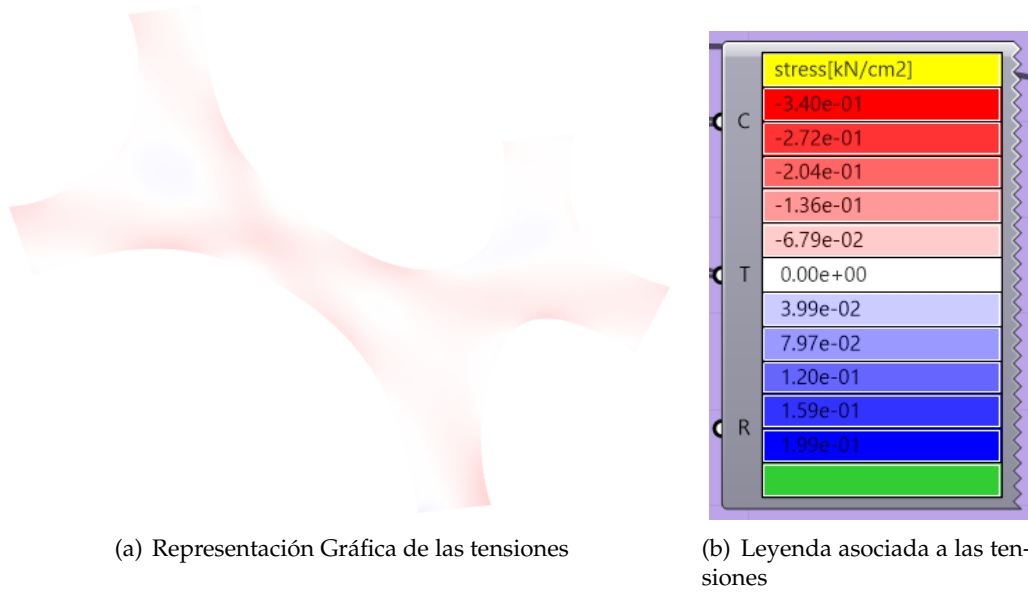
(a) Representación Gráfica de desplazamientos

(b) Leyenda asociada a los desplazamientos

FIGURA 4.34: Desplazamientos geometría *Form-Finding*

FIGURA 4.35: Tensión principal 1 geometría *Form-Finding*.FIGURA 4.36: Isolíneas de tensión 1 geometría *Form-Finding*.



FIGURA 4.37: Tensión principal 2 geometría *Form-Finding*.FIGURA 4.38: Isolíneas de tensión 2 geometría *Form-Finding*.

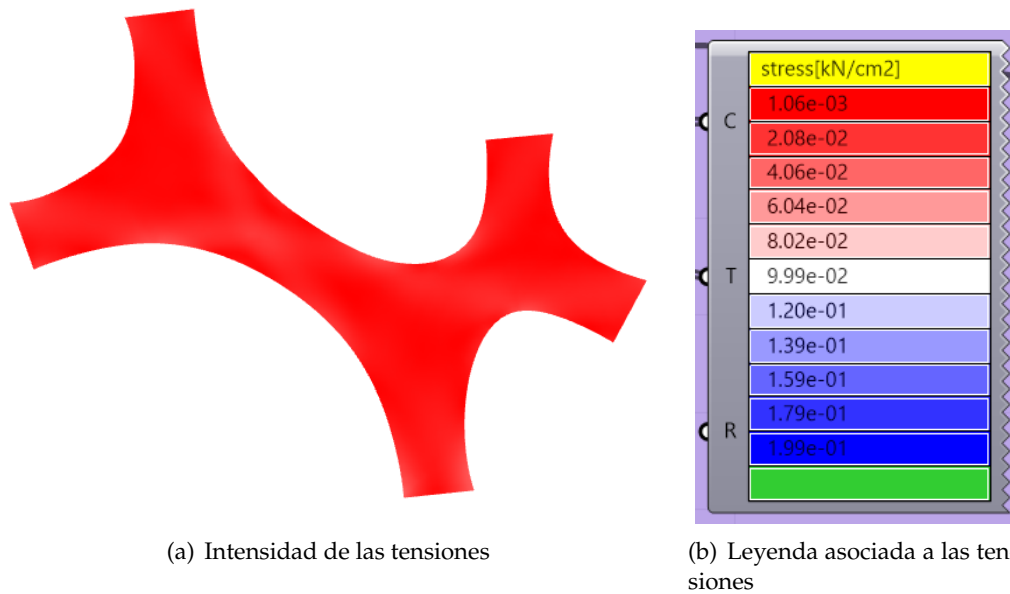


FIGURA 4.39: Tensión equivalente de Von mises geometría *Form-Finding*.

- Dentro de la utilización del material, se observa en las Figuras 4.32 y 4.33, que en las zona de aplicación de la carga se encuentra la flexión compuesta, apareciendo compresión en la parte superior y tracción en la zona inferior. Además predomina el valor de tracción a lo largo de ambas superficies.
- Máximo desplazamiento de 86,1 milímetros en las proximidades donde se ha establecido la carga puntual.
- Máximas tensiones principales ubicadas en la zona de aplicación de carga. Como se muestra en la Figura 4.36 y en la Figura 4.38, las isolíneas de tensión forman remolinos creando zonas de material que trabajan de forma ineficaz.



## Capítulo 5

# Resumen

### 5.1. Conclusiones

A la vista de los resultados presentados en apartados anteriores se procede a exponer una serie de conclusiones.

- El mejor diseño para caracterizar una mayor optimización en cuanto al comportamiento de la estructura, ha sido para el método *Form-Finding*.
- Al haberse analizado las dos vías de trabajo expuestas, se ha verificado que el método que satisface la condición de una estructura que trabaje a compresión pura de cara a someterse a cargas uniformemente distribuidas es el de *Form-Finding*.
- Como se ha mencionado en el Capítulo 4, la máxima altura se da en el método de optimización manual iterativa, al parametrizar sólo los puntos del contorno, los ángulos que forman las superficies interiores son más bruscas y de mayor pendiente que en el método de optimización de forma, provocando mayores fuentes de error en los resultados finales.
- Se comprueba que, buscando la forma más óptima, el método de optimización utilizado de *Form-Finding* tiende a buscar las soluciones similares a la estática gráfica. Este resultado valida la estática gráfica como método de diseño estructural para obtener estructuras eficientes y que consigan un máximo aprovechamiento del material, véase el Cuadro 5.1 para ver las diferentes discrepancias entre los modelos.

Características	Optimización Manual	Form-Finding	Real
Máxima altura [m]	2,47	2,15	2,2
Área [m <sup>2</sup> ]	52,4	48,68	50
Máximo vano [m]	14,8	13,88	15,1
Mínimo vano [m]	5,55	5,12	4,95

CUADRO 5.1: Comparación entre los modelos optimizados, y el modelo real.

- Se ha comprobado la gran versatilidad que puede llegar a tener programas como *Grasshopper* y *Karamba 3D* a la hora de abordar proyectos con geometrías complicadas a través de la parametrización.

Para finalizar, se exponen futuras líneas de investigación que resultan muy interesantes para desarrollar en trabajos complementarios y que deberán ser analizados próximamente.

1. Estudiar como alternativa a dichos métodos (tanto los realizados en el Trabajo de Fin de Grado como el TNA llevado a cabo para la realización del puente Striatum), a través de la codificación propia de la estática gráfica como herramienta paramétrica.
2. Realizar una comparación de dicha vía de investigación con los realizados en el presente proyecto, y establecer correlaciones de exactitud en referencia al comportamiento global de los modelos.

## Apéndice A

# Referencias a Stritus Bridge

### A.1. Introducción

A lo largo de los últimos años, la sociedad ha ido avanzando a pasos agigantados, tomando consciencia de la importancia que tiene nuestro planeta. Gracias a ello, se han ido desarrollando organismos declarando como los objetivos principales implementar normas de desarrollo sostenible (ODS) y sobretodo de los principios de la economía circular. Todo esto ha generado un gran interés acerca de diseñar estructuras sostenibles, y en el caso que nos compete, asociados a materiales como el del hormigón. Este material es conocido por su gran consumo energético y su baja reciclabilidad, y ha despertado recientemente un renovado interés gracias a la posibilidad de conseguir estructuras sometidas a compresión pura.

Este tipo de proyectos se han visto alcanzables gracias a la aparición de una nueva disciplina, llamada estática gráfica computacional, la cuál se ha puesto marcha a través de distintos programas de investigación en el diseño de estructuras óptimas de hormigón con el fin de ahorrar costes asociados al material.

Con todo ello, ya existen ejemplos de estructuras experimentales a través de técnicas de optimización y de impresión 3D de hormigón en masa, como es el Puente Striatum ubicado en los jardines de Marinaressa durante el Bienal de Arquitectura de Venecia <sup>1</sup>, diseñado por el equipo de Philippe Block <sup>2</sup> en la ETH de Zurich.

Éste proyecto representa un antes y un después en el ámbito de la construcción, ya que ha sido el primer puente cuyas dovelas se han fabricado a través de impresión 3D, logrando ser diseñadas a través de una alta eficiencia para estar sometidas a compresión pura.



FIGURA A.1: Puente Striatum

### A.2. Fabricación de dovelas

El puente Striatum destaca principalmente por el método de fabricación que se ha llegado a implementar, todo ello gracias a que se ha utilizado la tecnología más puntera en el ámbito del hormigón, impresión en 3D de hormigón (3D printing concrete).

<sup>1</sup> Creada en 1980 con la misión de exhibir y desarrollar propuestas de la arquitectura del momento, así como ofrecer una herramienta para la práctica innovadora en el contexto urbano nacional e internacional

<sup>2</sup> Profesor en el Instituto de Tecnología en Arquitectura de ETH Zurich, donde codirige el Grupo de Investigación de Block (BRG) junto con el Dr. Tom Van Mele.

Ha creado tanto interés debido a que permite optimizar la cantidad de material a imprimir dentro del diseño de las dovelas<sup>3</sup>, sin desperdicios, proclamándose como una potente alternativa a la construcción tradicional del hormigón.

Cómo se muestra en la Figura A.2, podemos observar como el brazo robótico va trazando diferentes trayectorias dónde vierte el hormigón en masa. Es importante resaltar que permite realizar geometrías curvas y huecas obteniendo menos desperdicios de cara al uso innecesario de hormigón.

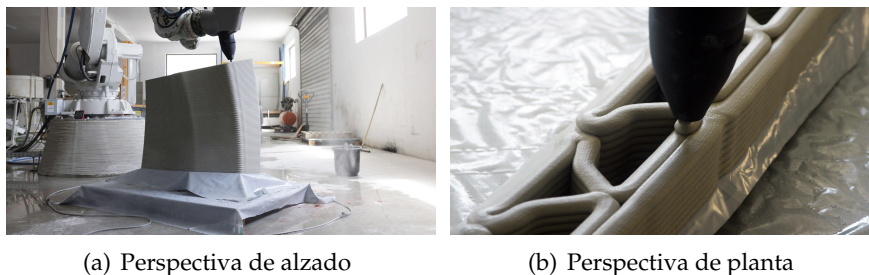


FIGURA A.2: Método de fabricación de dovelas [8].

Es importante resaltar que las 53 dovelas que se necesitaron para confeccionar el puente, llevan un diseño característico, en el que las capas de impresión tienden a realizarse de forma ortogonal con respecto al flujo de fuerzas, permitiendo obtener solo esfuerzos a compresión y evitar la delaminación entre las múltiples capas. Como se muestra en la Figura A.3, se aprecian las diferentes geometrías cóncavas y convexas que conforman la pasarela y abrazaderas del Puente Striatus.

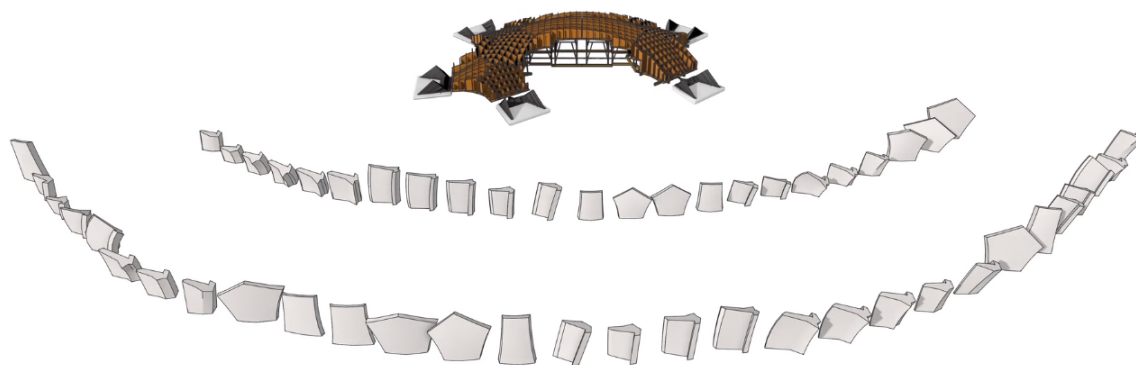


FIGURA A.3: Conjunto de dovelas [5].

### A.3. Puesta en obra

Una vez realizada la impresión 3D de la totalidad de las dovelas, se dispone a ensamblar las diferentes partes que conforman tanto la pasarela como las abrazaderas.

En primer lugar se ha realizado un encofrado de madera para poder evitar cualquier problema a la hora de ensamblado.

Como se puede apreciar en la Figura A.4(a), las dovelas descansan en tirantes metálicos con el principal objetivo de soportar el empuje horizontal soportado por las

<sup>3</sup>En arquitectura e ingeniería civil, es un elemento constructivo que conforma un arco y que puede ser de diferentes materiales, como ladrillo o piedra. Actualmente se elaboran tanto con hormigón armado como en el caso que nos compete, de hormigón en masa.

dovelas finales, llamadas comúnmente riñones. Además se puede ver también en la Figura A.4(b), la utilización de almohadillas de neopreno entre los bloques en seco con el fin de de evitar concentración de tensiones, además de reducir las fricción que puede darse tras el asentamiento de la obra.

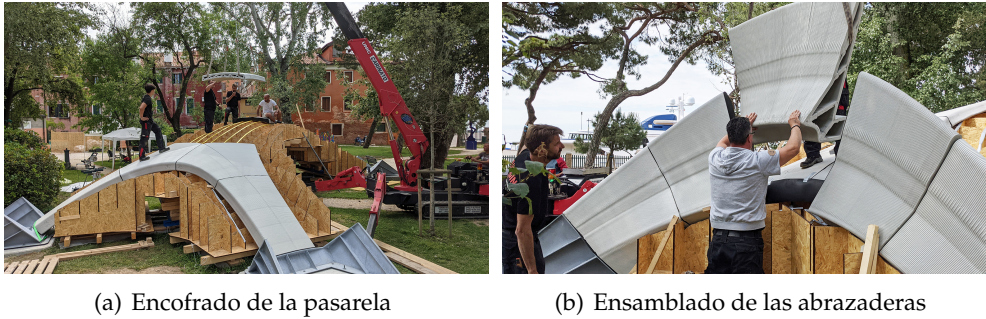


FIGURA A.4: Puesta en marcha del Puente Striatus.

A.4. Características finales

A modo de conclusión, se cierra el Apéndice mostrándo la Tabla A.1, dónde recoge toda la información sobre las propiedades del Puente Striatus.

Características	Valores Finales
Máxima altura con Abrazaderas [m]	3,5
Máxima altura de la cara inferior de la pasarela [m]	2,2
Área [m <sup>2</sup> ]	50
Volumen total de Dovelas [m <sup>3</sup> ]	19,8
Espesores de Dovelas [m]	0,05-0,35

CUADRO A.1: Propiedades del Puente Striatus. Dicha información viene recogida en [5].





## Apéndice B

# Metodología del modelo paramétrico mediante optimización iterativa manual

En los siguientes apartados se desarrollarán las partes en las que va estar divididas la modelización paramétrica de la Vía 1, de las que constan:

1. Adaptación de planos al entorno de Rhinoceros.
2. Parametrización de curvas y superficies a través de Grasshopper.

En primer lugar, se ha obtenido los planos 1 2 y 3. A partir de dichos planos, se ha procedido a escalarlos dentro del programa, obteniendo así las diferentes perspectivas del puente escalados a tamaño real. Además, en ambas figuras se pueden observar líneas negras que se adaptan al contorno de cada superficie, dichas líneas representan tanto las bases de la superficie de la pasarela, como las líneas superiores de los pasamanos, siendo en su conjunto la base del proyecto, ya que a partir de ellas se podrán asociar las diferentes líneas y superficies parametrizadas.

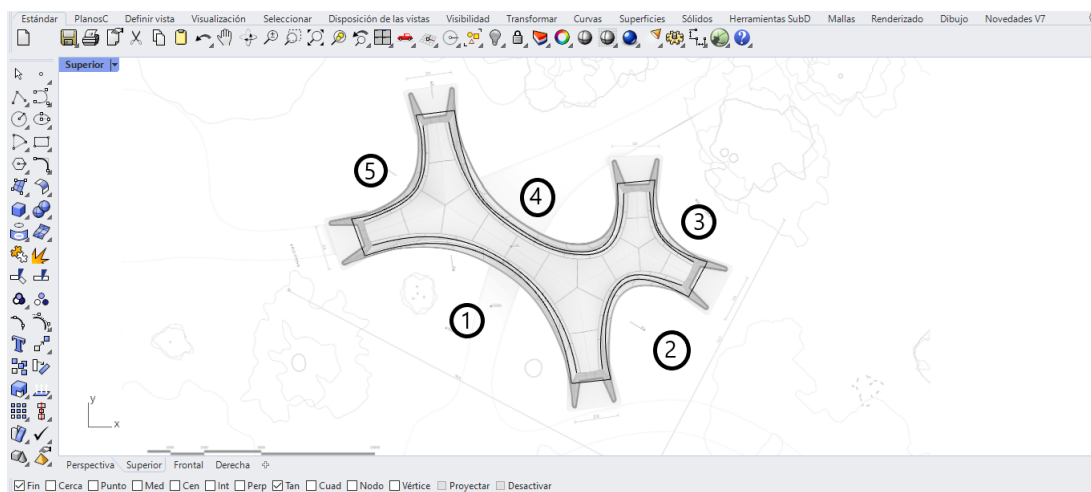


FIGURA B.1: Planta puente Striatu.

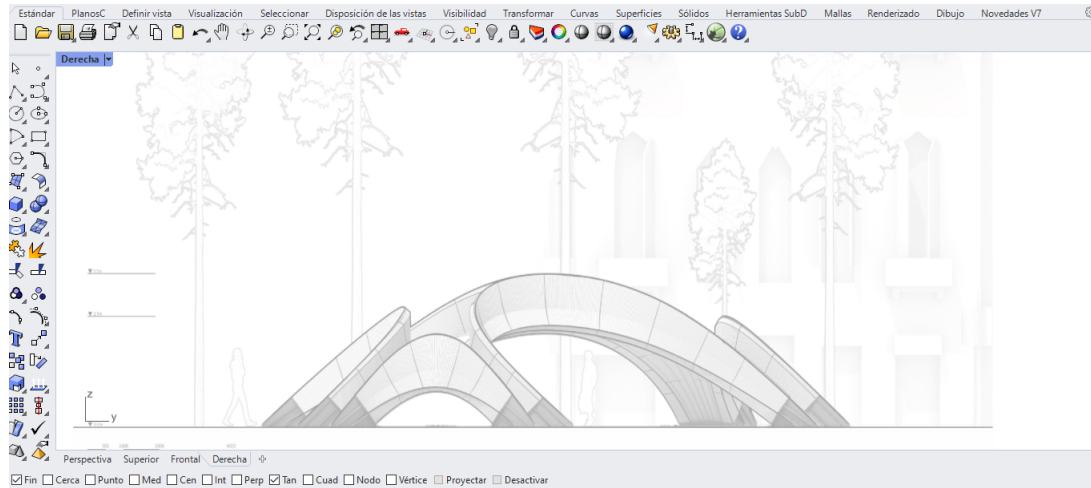


FIGURA B.2: Perfil 1 puente Striatus.

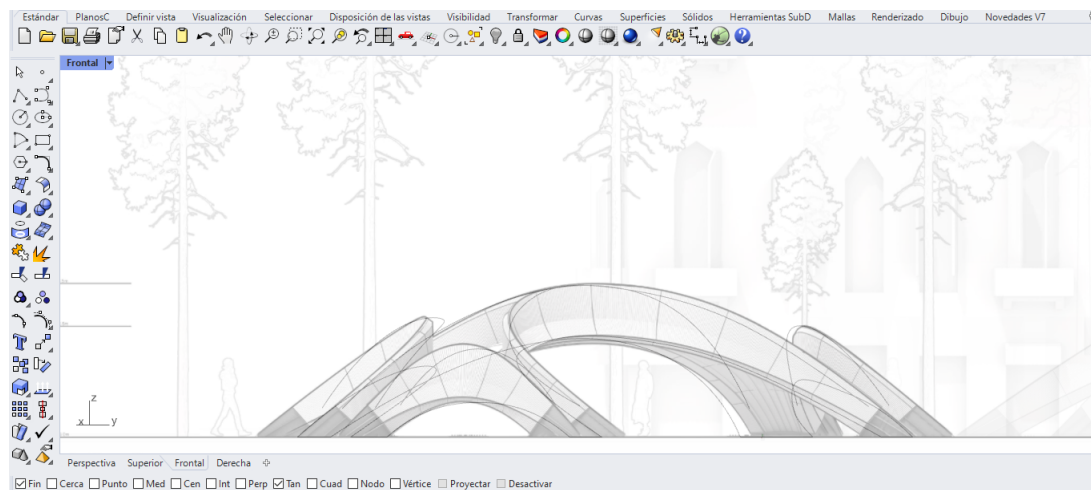


FIGURA B.3: Perfil 2 puente Striatus.

A continuación, se tratará de explicar la diferente metodología que se ha utilizado para realizar la parametrización a través del lenguaje de programación de Grasshopper. En la Figura B.4, se muestra el esquema final para la generación del modelo paramétrico, cuyas secciones y paquetes de códigos se irán resaltando en los siguientes apartados, tanto las entradas como salidas de las ordenes más relevantes.

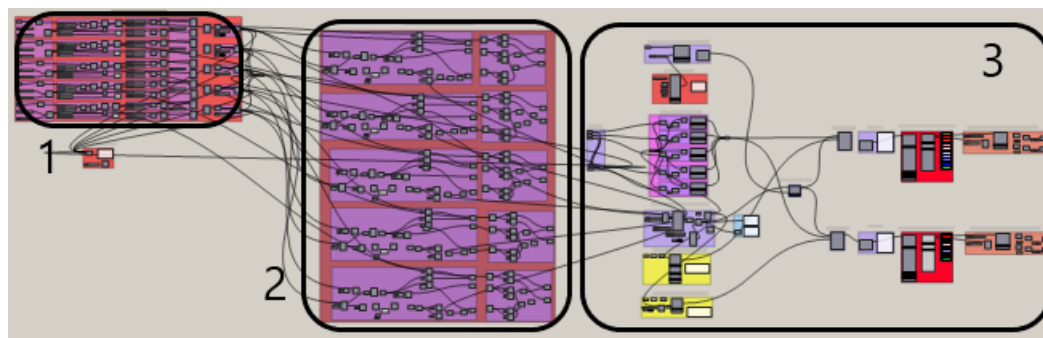


FIGURA B.4: Modelización paramétrica. 1) Corresponde a la modelización paramétrica de las líneas de contorno. 2) Corresponde a la modelización paramétrica de las abarazaderas. 3) Modelización a través de Karamba 3D.

## B.1. Curvas paramétricas

La definición principal del caso a estudio se basa en establecer el conjunto de curvas paramétricas de las que va estar compuesta la superficie del puente. En nuestro caso contamos con cinco curvas de la base de la pasarelas las cuáles formarán parte de las condiciones de contorno y no serán parametrizadas, y cinco curvas correspondientes a la unión entre los extremos de los apoyos.

Cabe mencionar, que el código establecido se realizará cinco veces, asociadas a las curvas que posteriormente serán parametrizadas.

- Conjunto 1. Asociamos los contornos no paramétricos realizados en Rhinoceros a Grasshopper, y realizamos una supercie a través del comando Loft<sup>1</sup>, pudiendo así descomponerse por puntos.
- Conjunto 2. Escogemos todos los puntos de dicha superficie, los descomponemos en sus tres diferentes coordenadas (X,Y,Z), y parametrizamos su posición respecto al eje z, asociado a la altura.
- Conjunto 3. Una vez parametrizado el conjunto de puntos, descartamos los puntos de los extremos, ya que serán parte de las condiciones de contorno en Karamba 3D y no interesa parametrizar.
- Conjunto 4 y 5. Reconectamos los puntos para restablecer las curvas paramétricas.
- Conjunto 6. Seleccionamos la curva paramétrica asociada a uno de los límites de las pasarela.
- Conjunto 7. Selección del conjunto de curvas paramétricas, veáse en la Figura B.8 la solución gráfica obtenido en Rhinoceros.

<sup>1</sup>En español transición, herramienta de Grasshopper que permite a través de dos curvas, establecer una superficie 3D que adapte con sus tangencias.

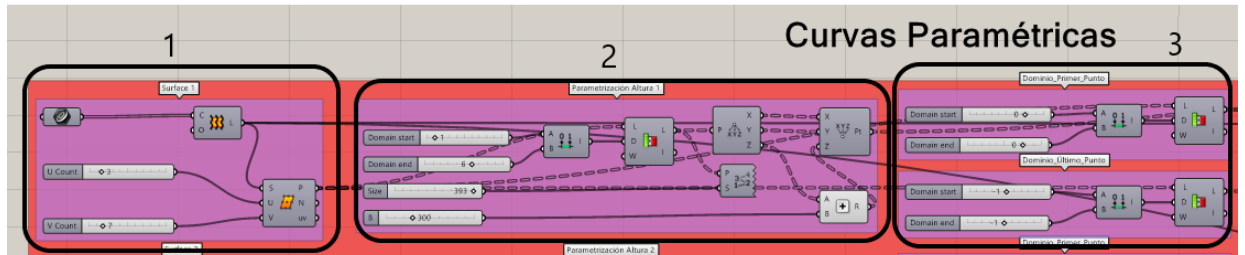


FIGURA B.5: Parte 1. Asociado a los resultados de modelización de los Conjuntos 1, 2 y 3.

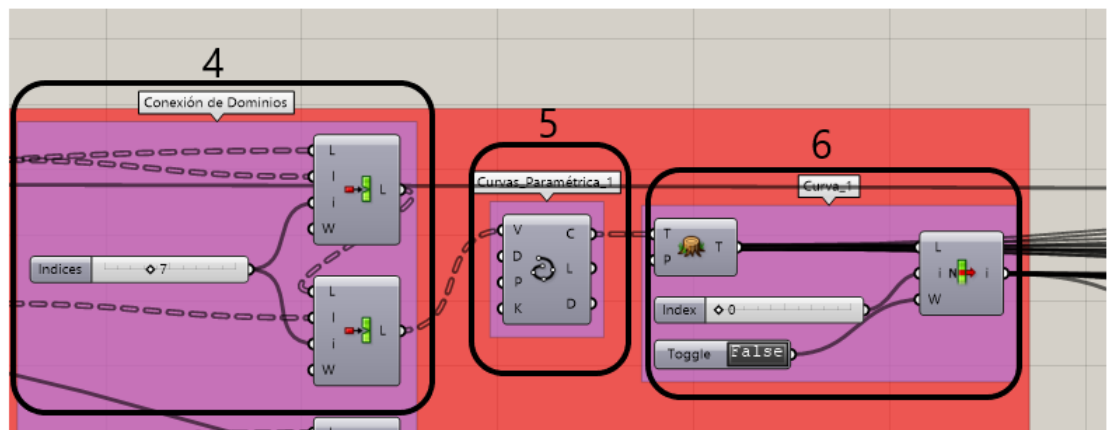


FIGURA B.6: Parte 2. Asociado a los resultados de modelización de los Conjuntos 4, 5 y 6.

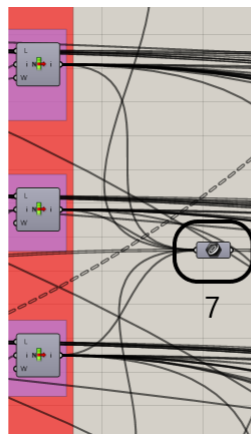


FIGURA B.7: Parte 3. Asociado a los resultados de modelización del Conjunto 7

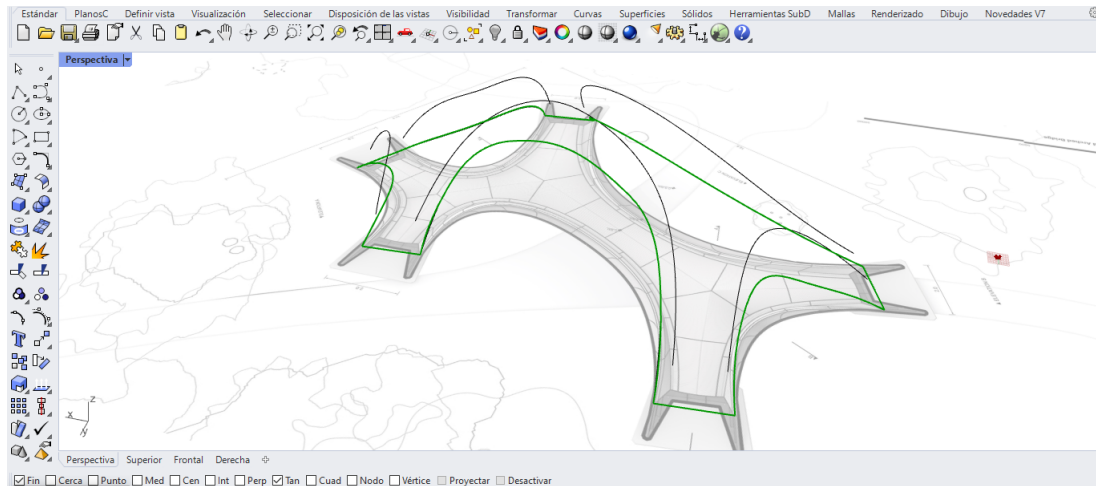


FIGURA B.8: Parametrización de los límites de la pasarela.

## B.2. Abrazaderas paramétricas

De cara al diseño, se ha optado por parametrizar las abrazaderas de cada contorno, estando en conexión con la superficie de estudio.

Estas han sido definidas con un espesor variable de cara a poder optimizarse, y cuya función principal es dar rigidez al conjunto de la estructura.

Como se cita en el apartado anterior, la metodología se repetirá para cada contorno de curva, y se adaptará cada iteración a través de cómo se halla guardado la estructura de datos en Grasshopper.

- Conjunto 8. Utilizamos como input del código Offset Curves<sup>2</sup>, las líneas paramétricas en 3D, el plano de movimiento XY y el espesor de las abrazaderas en milímetros.
- Conjunto 9. Dada la geometría final que tiene la superficie de la pasarela, la traslación de las líneas que se muestra en la Figura B.8, no produce corte con la misma, y por lo tanto se necesita establecer un flujo concreto. Se realiza un plano con dicha curva específica en dirección Z.
- Conjunto 10. Utilizamos Deconstruct Brep, para elegir las curvas límites de las superficies.
- Conjunto 11. Se utiliza la herramienta Brep/Brep para conseguir la línea que intersecta entre la pasarela y dicho plano.
- Conjunto 12. Unimos las curvas en superficies conectadas entre sí.
- Conjunto 13. Adaptación al Data Structure de cada iteración.

<sup>2</sup>Herramienta de Grasshopper que permite hacer curvas paralelas en 3D, siempre manteniendo la perpendicularidad y en cualquier plano.

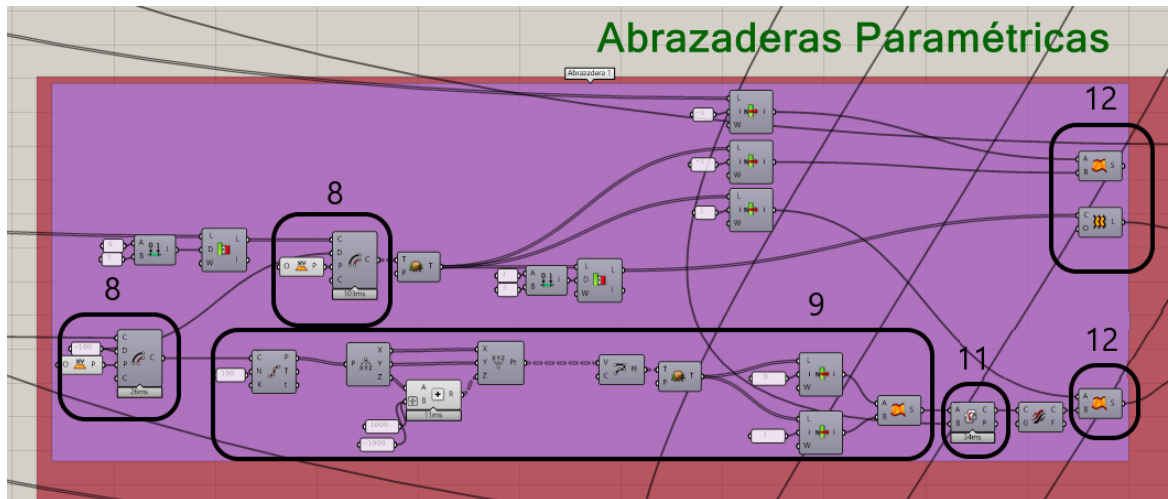


FIGURA B.9: Parte 1. Asociado a los resultados de modelización de los Conjuntos 8, 9, 11 y 12. Cómo resultado se obtiene los pasamanos verticales y paralelos a una distancia paramétrica, véase la solución gráfica que se muestra en la Figura B.11(a)

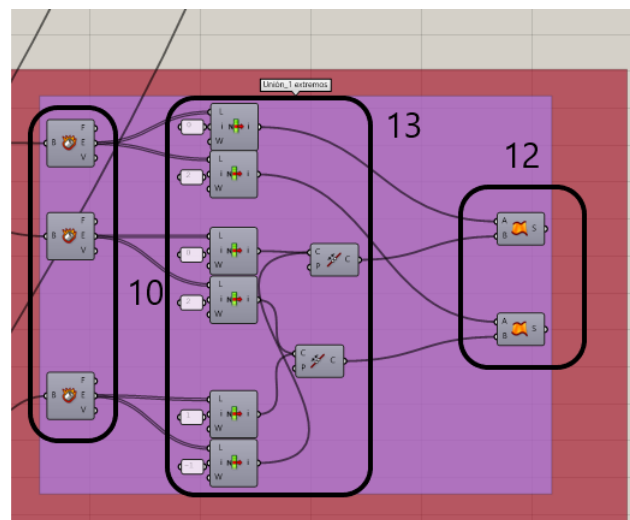


FIGURA B.10: Parte 2. Asociado a los resultados de modelización de los Conjuntos 10, 13 y 12. Cómo resultado se obtiene las superficies que unen, tanto las abrazaderas paramétricas como la pasarela, véase la solución gráfica que se muestra en la Figura B.11(b)

Una vez explicado dicho flujo de trabajo, se muestra a continuación los resultados gráficos finales, dónde se pueden observar las Figuras B.12 y B.13 el ensamblaje entre las abrazaderas y pasarela.

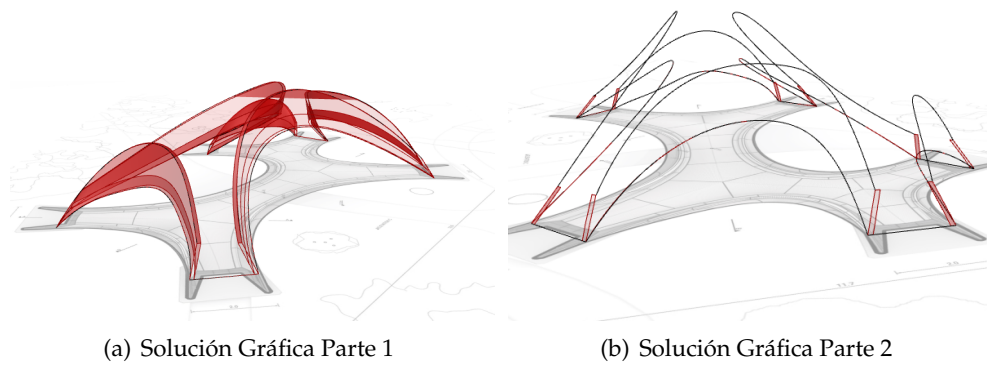


FIGURA B.11: Visualización de resultados

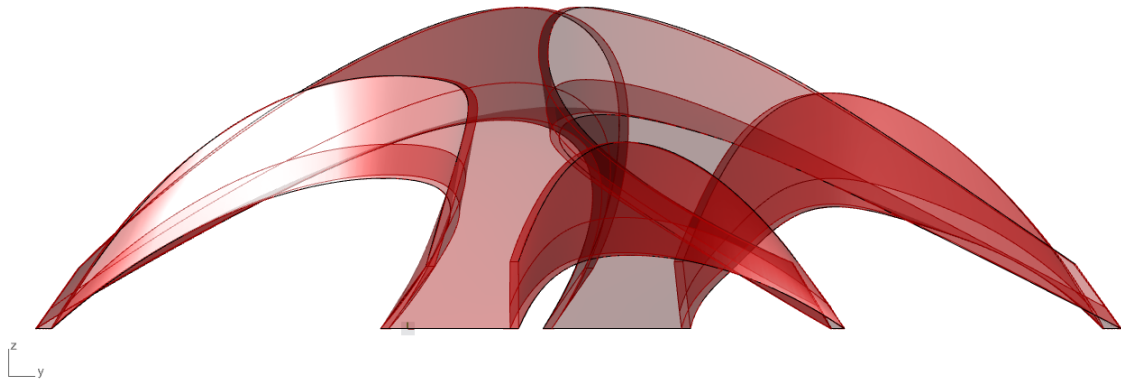


FIGURA B.12: Vista de Perfil de las superficies paramétricas.

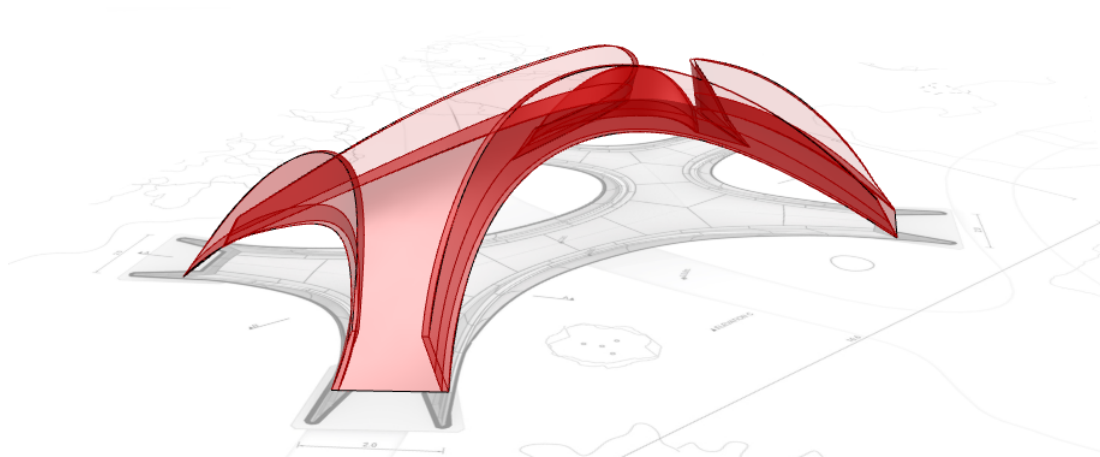


FIGURA B.13: Vista de Perspectiva de las superficies paramétricas.

### B.3. Mallado de la pasarela

Una vez establecido los límites de la pasarela, se dispone a realizar una superficie que se adapte a dicha geometría, al haber establecido la parametrización, se podrá estudiar infinitas soluciones de cara al análisis de esfuerzos.



- Conjunto 14. En primer lugar, se utiliza la herramienta Patch, e introducimos como inputs tanto las curvas paramétricas del Conjunto 7, como diferentes ajustes como serían number of spans and flexibility, dónde se entrará más en detalle en la zona de análisis. Nos creará la superficie adaptada al contorno anteriormente mencionado como se puede apreciar en la Figura B.15.
- Conjunto 15. Conversión de superficie a malla, en la que se utilizará como inputs la superficie y ajustes adicionales de la malla. Resaltar que será necesario corregir aspectos de la malla, ya que se encuentran errores de mallado en los límites de la superficie.
- Conjunto 16. Herramienta para la definición de longitud en los elementos de la malla.
- Conjunto 17. Conversión de una malla con elementos de cualquier geometría (asociado a elementos triangulares y cuadrados), a una malla con elementos cuadrados (Quad result). Cómo se puede observar en la Figura B.16, se ha podido configurar una malla sin errores en las zonas limítrofes.
- Conjunto 18. Herramienta de Quad Remesh Settings, dónde podemos establecer la cantidad de elementos cuadrados en los que la malla podría adaptarse. No es un número exacto, el programa realiza varias iteraciones y tiene como límite ese valor.
- Conjunto 19. Visualizador del mallado.
- Conjunto 20. Define el área total de la geometría introducida.

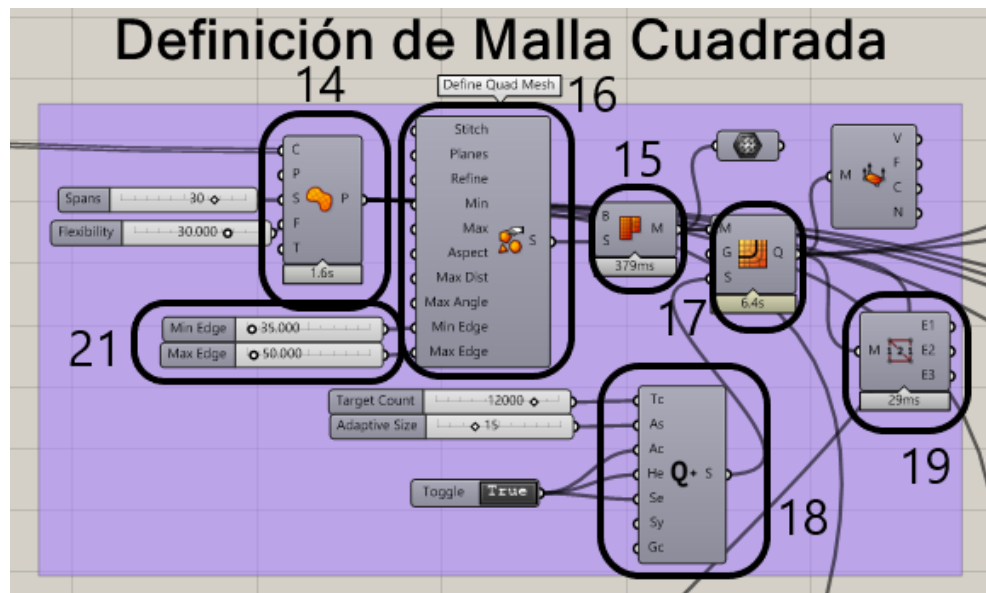


FIGURA B.14: Modelización de Malla Cuadrada

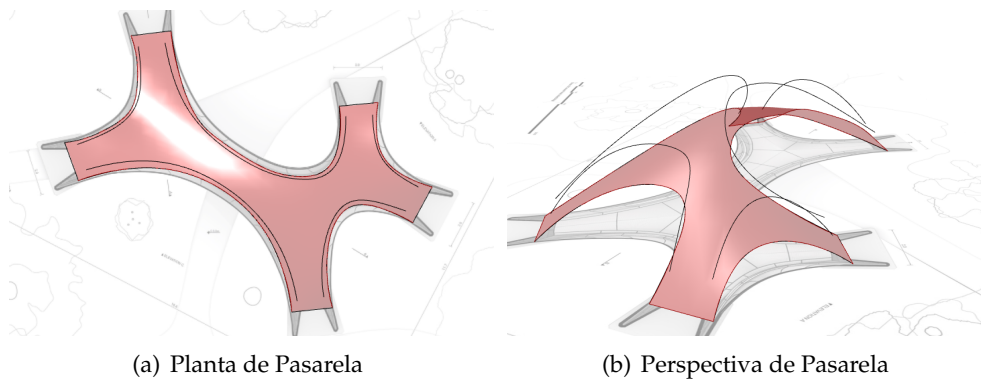


FIGURA B.15: Resultado de Patch

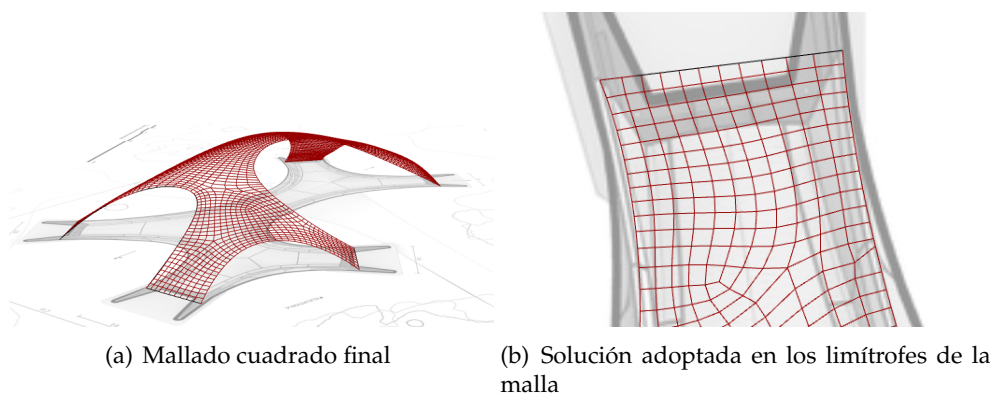


FIGURA B.16: Resultado de Patch

Una vez explicado el flujo de trabajo impuesto en Grasshopper, es importante resaltar la información asociada a la malla expuesta, ya que sus principales características son:

- En primer lugar, abarca una superficie de  $5,2258 \cdot 10^7 \text{ mm}^2$ .
- Cuenta con un total de 2788 vértices y con 2580 elementos.
- Comentar que se ha establecido en primera instancia un intervalo máximo y mínimo de longitud en milímetros de los lados de dichos elementos, como mínimo de 35 milímetros y como máximo de 50 milímetros como se puede apreciar en el Conjunto 21 de la Figura B.14, en apartados posteriores se analizará la convergencia de resultados a través de cambios en dichas características de la malla.

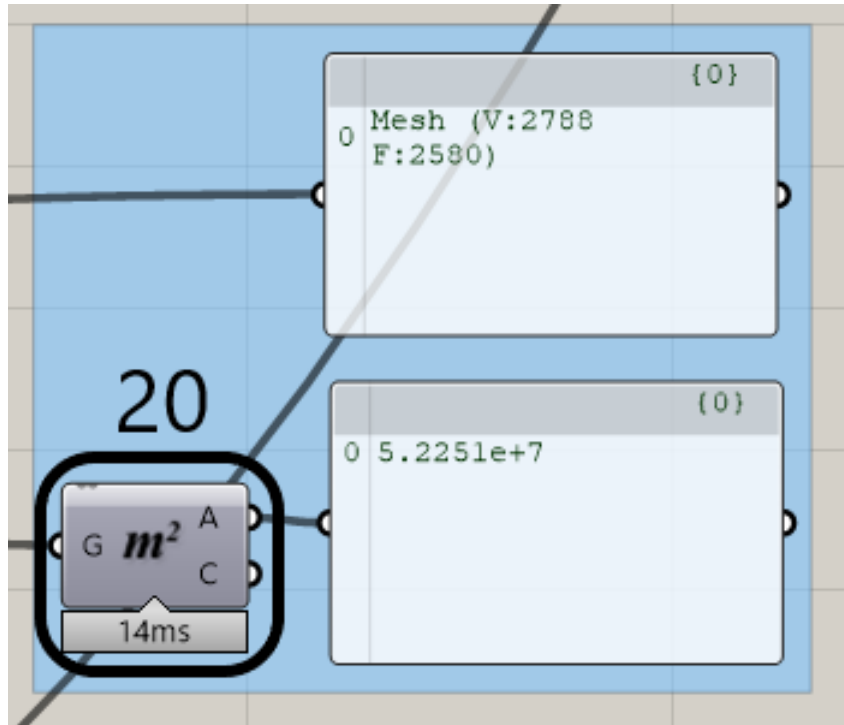


FIGURA B.17: Información de la malla

#### B.4. Definición de Condiciones de Contorno

A continuación, se mostrará tanto la metodología para definir las condiciones en los apoyos, cómo la elección de los contornos dónde actuarán las posteriores restricciones. En primer lugar se parte de líneas no paramétricas del modelo de Rhinoceros, y las asociamos a Grasshopper.

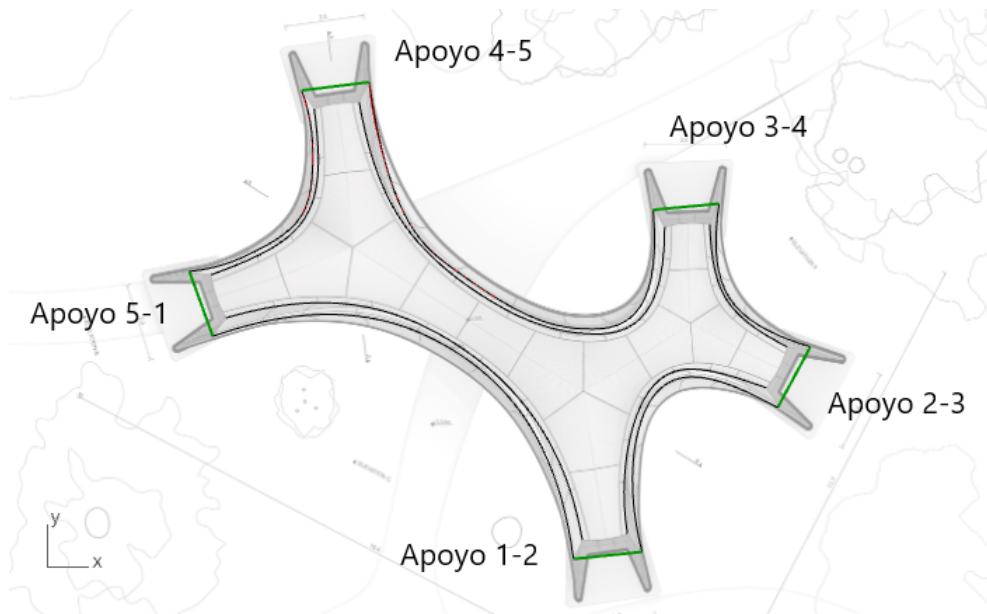


FIGURA B.18: Visor gráfico de Rhinoceros con apoyos. Están seleccionados en verde.

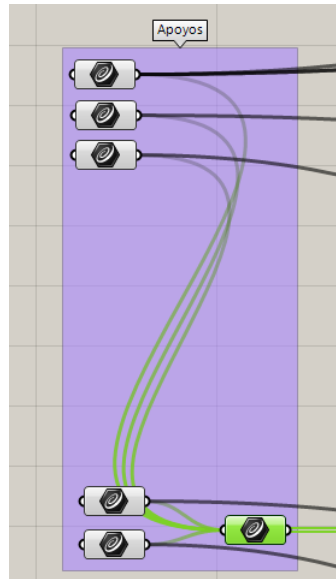


FIGURA B.19: Vinculación de apoyos no paramétricos a Grasshopper. Comentar que dicho flujo en verde, hace referencia a la selección del visor de Rhinoceros como se muestra en la Figura B.18.

Una vez establecido la selección dónde van actuar los diferentes grados de libertad de la estructura, se muestra la configuración de flujo asociado a la parte de Karamba 3D para poder realizar dicha vinculación. Consistirá principalmente en seleccionar todos los puntos de la malla que pertenezcan a los apoyos, dichos puntos no tienen una jerarquía impuesta de cara a una estructura definida de datos, por lo tanto se utilizará dicho flujo para poder definirse.

Como se ha mencionado en apartados anteriores, dicho flujo se replicará las iteraciones necesarias, en este caso serán cinco flujos de trabajo asociado a los cinco apoyos de la estructura.

- Conjunto 22. Selección de todos los puntos que están dentro de la malla realizada.
- Conjunto 23. Se utiliza la herramienta Pull Point, en los que se utiliza como inputs tanto los puntos de la malla como el apoyo definido para esta iteración, vendrá dada por su correspondiente apoyo de la Figura B.19.
- Conjunto 24. Se utiliza la herramienta Cull Pattern, para convertir dichos puntos que pertenecen a dicho apoyo, a un tipo de estructura de datos que funcionará como input para el siguiente conjunto.
- 25 Se utiliza por último la herramienta Supports Karamba 3D, en la que se definen los grados de libertad que tendrán los apoyos en la malla establecida. Los outputs de este flujo ya han sido convertidos a información que puede leer Karamba 3D, y así poder acometer la parte del proyecto asociado a elementos finitos.
- Conjunto 26. Selección del conjunto de Supports.

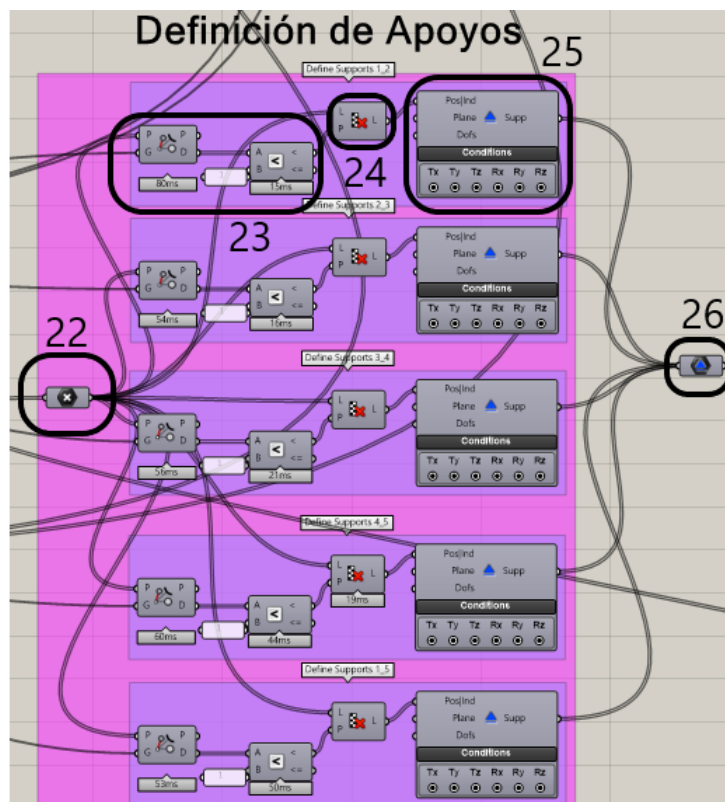


FIGURA B.20: Modelización paramétrica de apoyos y sus condiciones de contorno

## B.5. Definición de sección transversal

Como se ha comentado en Anexos como x, en la geometría real se ha podido optimizar el diseño mediante dovelas huecas y estilizadas, para nuestro caso se ha optado por diseñar un espesor constante a lo largo de la superficie.

- Conjunto 27. Utilización de la herramienta Cross Section, es destacable mencionar, en inputs tenemos la etiqueta de la familia asociada que es Shell, y la altura de la sección, que en apartados posteriores se someterá a estudio el espesor más eficiente. Además mencionar que el tipo de sección elegida es Shell Constant.
- Conjunto 28. Utilización de Cross Section Selector, en el cual se podrá jerarquizar la entrada de los diferentes tipos de secciones.



FIGURA B.21: Modelización paramétrica de la Sección Transversal

## B.6. Ensayo de Cargas 1, Carga Uniformemente Distribuida

Para el primer estado de cargas, se coge de referencia la norma española IAP 11 (*Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera*), dónde se verá en mayor detalle en el **Anexo E, Norma IAP-11**. La resolución gráfica de éste apartado se puede apreciar en la Figura B.22

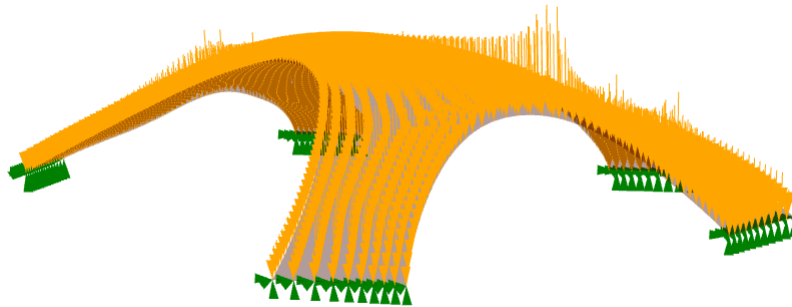


FIGURA B.22: Representación Gráfica de Cargas y Condiciones de Contorno

La geometría estará sometida a una carga distribuida de  $5 \text{ kN/m}^2$ , para ello se necesitará establecer un flujo a través de los comandos de Karamba 3D.

- Conjunto 29. Asociado a la determinación tanto del valor como del sentido y dirección de la carga a aplicar. Siendo  $5 \text{ kN/m}^2$  en dirección Z sentido negativo.
- Conjunto 30. Utilización de Loads Karamba, tomando como entradas el Conjunto 29 y Conjunto 17. Destacar la elección de MeshLoad Constant al ser una carga distribuida uniforme.
- Conjunto 31. Información sobre el Output del Conjunto 30. Podemos observar:
  1. Área total de la malla de  $52,2476 \text{ m}^2$ .
  2. Carga total de  $261,24 \text{ kN}$  en dirección Z negativa



FIGURA B.23: Modelización de cargas

## B.7. Definición de elementos

Por último, antes de pasar al Ensamblaje, hay que definir la última entidad del modelo que correspondería a determinar los elementos de la malla. Es importante resaltar que la herramienta utilizada es MeshToShell:

- Conjunto 32 se puede destacar:
  1. Como inputs, se tendrá tanto el conjunto 17, asociado a la malla cuadrada, como el conjunto 28 asociado a la sección impuesta.
  2. Como outputs, se tendrá tanto el conjunto de nodos que conformará la malla, como el tipo de elemento Shell, el cuál estará preparado para realizar el ensamblaje del modelo.

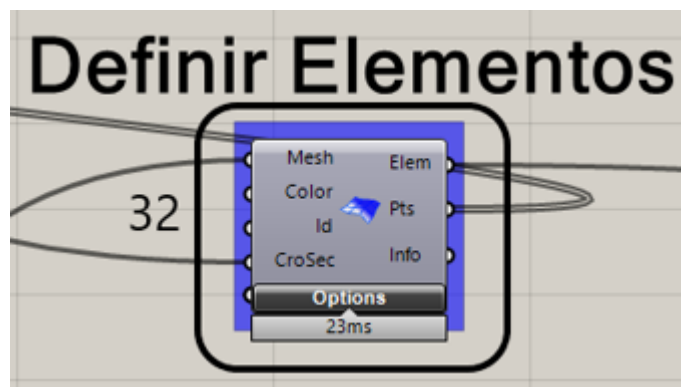


FIGURA B.24: Modelización de elementos

## B.8. Ensamblaje del modelo

Una vez explicada las cinco entidades necesarias para definir el modelo, se utiliza la herramienta ensamblaje, la cuál será el nexo para compilar el modelo estructural.

- Conjunto 33 se puede destacar:
  1. Como inputs, las cinco entidades comentadas anteriormente; elementos, apoyos, cargas, tipo sección y material.
  2. Como outputs, se tendrá el modelo ensamblado.

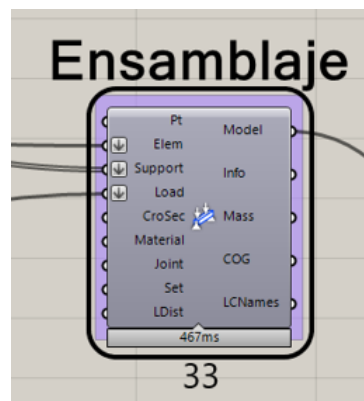


FIGURA B.25: Ensamblaje del modelo

## B.9. Vista de Resultados

Una vez establecido el Análisis, dentro de Grasshopper se necesita determinar el flujo asociado a la visualización de resultados. Cómo se muestra en la Figura B.26 , para el caso de estudio constará de tres partes que son:

- Conjunto 36 está asociado a la herramienta ModelView de Karamba 3D, a través del cuál permitirá verificar mediante el visor gráfico que las condiciones que se han establecido son las correctas, se puede destacar:
  1. Tipo de condición de contorno en los apoyos.
  2. Tipo de carga aplicada a la superficie de estudio.
  3. Deformación de la superficie.
- Conjunto 37 está asociado a la herramienta ShellView de Karamba 3D, que permite la determinación de valores asociados al cálculo mediante elementos finitos en términos de:
  1. Desplazamiento.
  2. Tensiones principales.
  3. Tensión equivalente de Von Mises.
- Conjunto 38 está asociado a la herramienta Legend, asocia los rangos de resultados a ciertas gamas de colores.



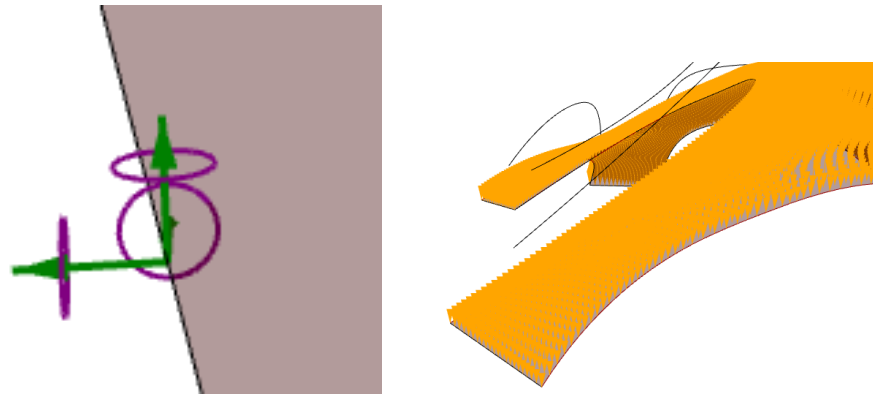
FIGURA B.26: Modelización para vista de resultados



## B.10. Vista de Condiciones de Contorno

En éste apartado se muestra cómo el programa Karamba 3D convierte el esquema del Conjunto 36 en visualización gráfica.

A continuación se muestra tanto la Figura B.27(a), asociada a la representación gráfica de un apoyo empotrado el cuál impide tanto los desplazamientos como los giros en los tres planos, además de la Figura B.27(b) que muestra la correcta aplicación de carga superficial constante a lo largo de toda la malla.



(a) Representación Gráfica Condición de Contorno en apoyos (b) Representación Gráfica Hipótesis de Carga 1 en malla

FIGURA B.27: Visualización del esquema dentro de Karamba 3D

## Apéndice C

# Metodología de optimización de forma

A continuación, se exponen los diferentes apartados asociados a la modelización de Form-Finding, véase en la Figura C.1.

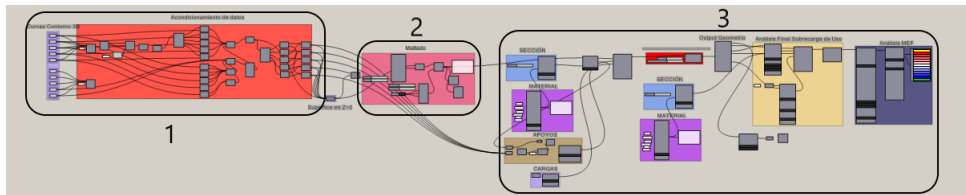


FIGURA C.1: Modelización paramétrica vía 2. 1) Modelización de la geometría plana. 2) Mallado de la superficie. 3) Modelización en Karamba 3D de ambos estados de carga.

En primer lugar, a través de los planos se realizarán las curvas de contorno sin parametrizar mediante el entorno de *Rhinoceros*, para delimitar el dominio que se va a establecer en el plano  $Z=0$ , véase la Figura C.2

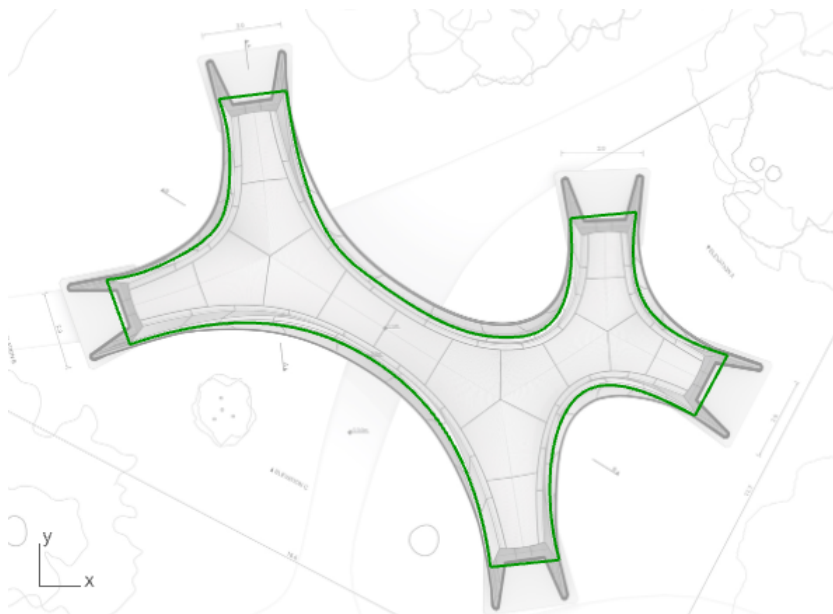


FIGURA C.2: Curvas de contorno sin parametrizar

Conforme a los apartados siguientes, estarán vinculados tanto a la realización paramétrica del modelo, como configuración y visualización de la codificación de elementos finitos de *Karamba 3D*.

### C.1. Plano paramétrico

En primer lugar, se tomará como iniciales los resultados en la anterior parte. El principal objetivo de esta codificación, véase en la Figura C.3 es establecer una superficie paramétrica impuesta en  $Z=0$ .

- Conjunto 1. Parametrización de las curvas de contorno a través de puntos.
- Conjunto 2. Herramienta Patch, creación de la superficie que encierra las curvas del Conjunto
- Conjunto 3. Codificación para resolver la intersección de varias superficies, entre el Conjunto 2 y contorno paramétrico.
- Conjunto 4. Contorno de curvas paramétricas junto a los apoyos que permanecerán en  $Z=0$ .
- Conjunto 5. Unión de las aristas paramétricas para la conversión a superficie.

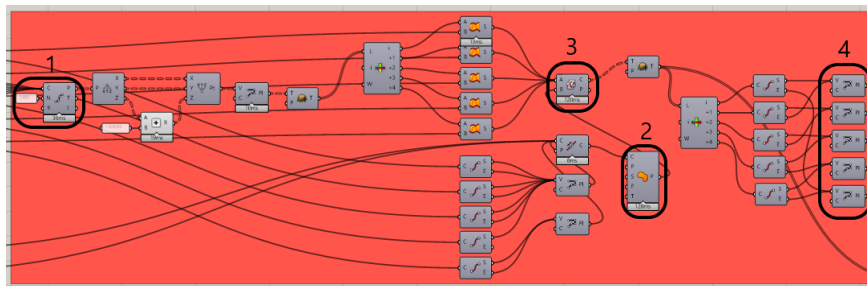


FIGURA C.3: Codificación asociada a los Conjuntos 1,2,3 y 4

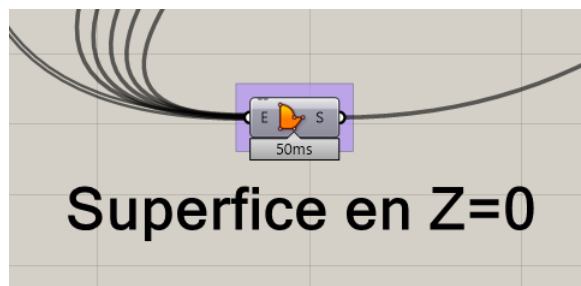


FIGURA C.4: Codificación asociada al Conjunto 5

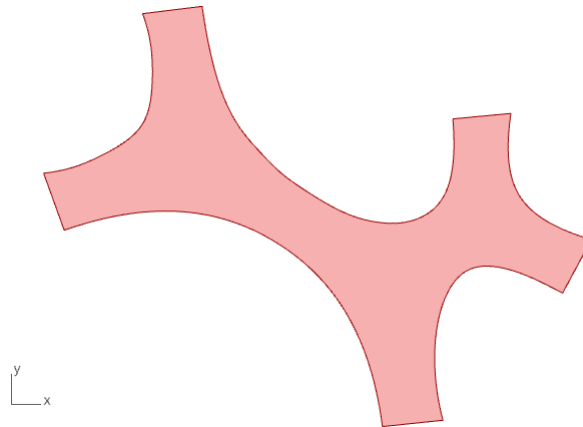


FIGURA C.5: Visualización gráfica del Conjunto 5, creación de superficie.

## C.2. Mallado de la superficie

Una vez establecido los límites de la superficie, se dispone a realizar la discretización para posteriormente realizar el estudio de cargas en dirección vertical. Cómo se puede apreciar, se ha optado por realizar el mismo esquema de mallado que en la primera vía, cómo se puede apreciar en el **Anexo B, en el apartado Mallado de la pasarela**, salvo ciertas discrepancias en cuánto a ciertos factores asociados a las mallas, como podrían ser los elementos y nodos.

- Conjunto 6. Conversión de superficie a malla, en la que se utilizará como inputs la superficie y ajustes adicionales de la malla. Resaltar que será necesario corregir aspectos de la malla, ya que se encuentran errores de mallado en los límites de la superficie.
- Conjunto 7. Herramienta para la definición de longitud en los elementos de la malla.
- Conjunto 8. Conversión de una malla con elementos de cualquier geometría (asociado a elementos triangulares y cuadrados), a una malla con elementos cuadrados (Quad result).
- Conjunto 9. Herramienta de Quad Remesh Settings, dónde podemos establecer la cantidad de elementos cuadrados en los que la malla podría adaptarse. No es un número exacto, el programa realiza varias iteraciones y tiene como límite ese valor.
- Conjunto 10. Visualizador del mallado, véanse las Figuras [C.7\(a\)](#) y [C.7\(b\)](#).
- Conjunto 11. Conversión de una superficie, a una malla con las condiciones establecidas desde el Conjunto 8.



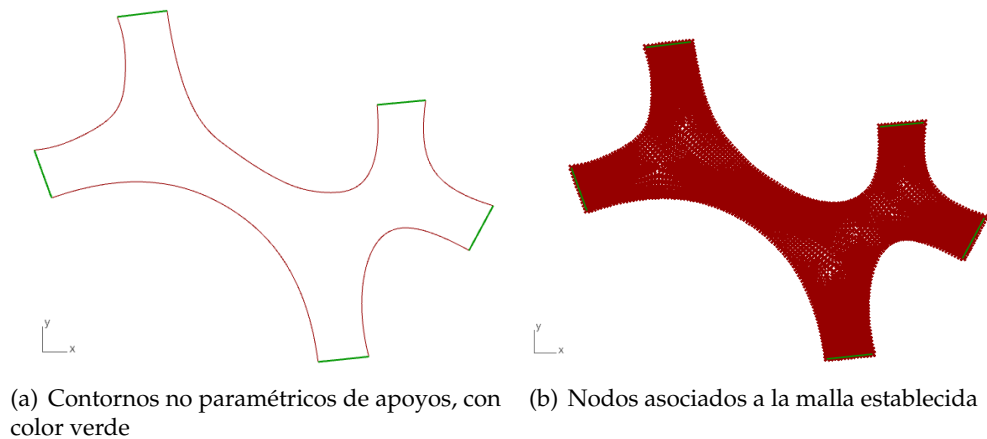


FIGURA C.8: Entrada al sistema de Modelado de Condiciones de Contorno

Resaltar que el Conjunto 12, hace referencia a la herramienta Supports, en la que se definen los grados de libertad que tendrán los nodos de la malla.

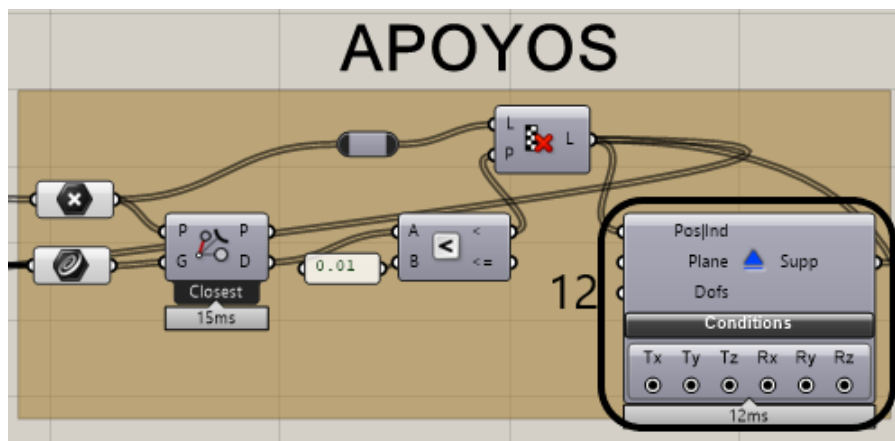


FIGURA C.9: Modelización paramétrica de apoyos y sus condiciones de contorno

## C.4. Ensayo de Cargas 1, Form-Finding de la malla

En esta sección se muestra los Conjuntos utilizados para establecer una malla deformada, la cuál satisfaga las condiciones de soportar una carga uniforme a través de esfuerzos únicamente a compresión.

Cabe mencionar que en el primer análisis no se estudiará la respuesta de la estructura, ya que lo único que interesa es tener una geometría de malla optimizada para responder al ensayo de cargas de 5kN/m.

- Conjunto 13. Se establece una carga de gravedad, en dirección Z positivas.
- Conjunto 14. Se establece el algoritmo que procede a analizar las diferentes soluciones de malla atendiendo tanto a los incrementos de cargas cómo la definición del máximo desplazamiento en dirección Z que va a caracterizar la malla optimizada.
- Conjunto 15. Altura máxima de la malla de tipo Shell, de 214,998426 cm.

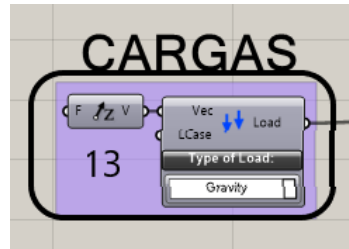


FIGURA C.10: Orientación de las cargas, en sentido y dirección Z positivas

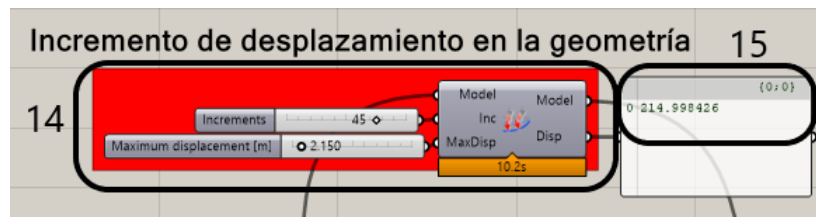


FIGURA C.11: Algoritmo de optimización de máximo desplazamiento de la malla.

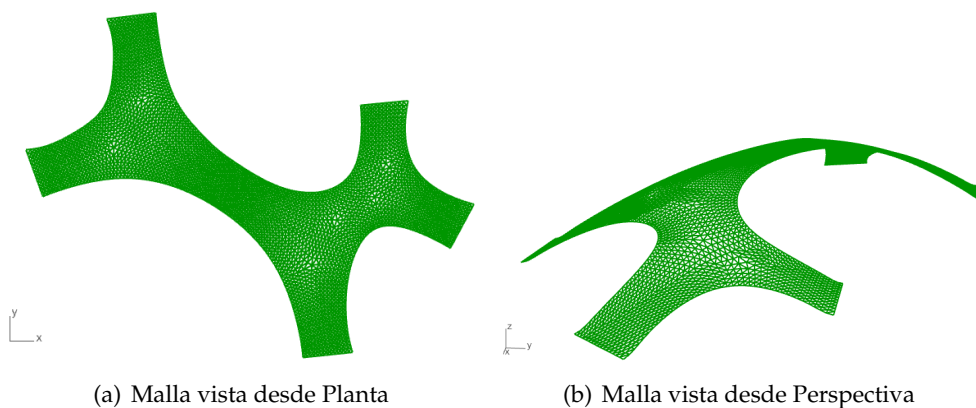


FIGURA C.12: Visualización del Conjunto 14, dónde la malla está compuesta de 3018 vértices y 5598 elementos

## C.5. Ensayo de Cargas 2, Carga Uniformemente Distribuida

En este apartado, se seguirá la misma metodología expuesta en el **Anexo B, apartado 6, Ensayo de Cargas 1**, en el cuál la geometría estará sometida a una carga distribuida de  $5\text{ kN/m}^2$  a través del flujo establecido en *Grasshopper*, véase en la Figura C.13.

- Conjunto 16. Asociado a la determinación tanto del valor como del sentido y dirección de la carga a aplicar. Siendo  $5\text{ kN/m}^2$  en dirección Z sentido negativo.
- Conjunto 17. Utilización de Loads Karamba, tomando como entradas el Conjunto 26 y la malla realizada por Form-Finding. Destacar la elección de Mesh-Load Constant al ser una carga distribuida uniforme.





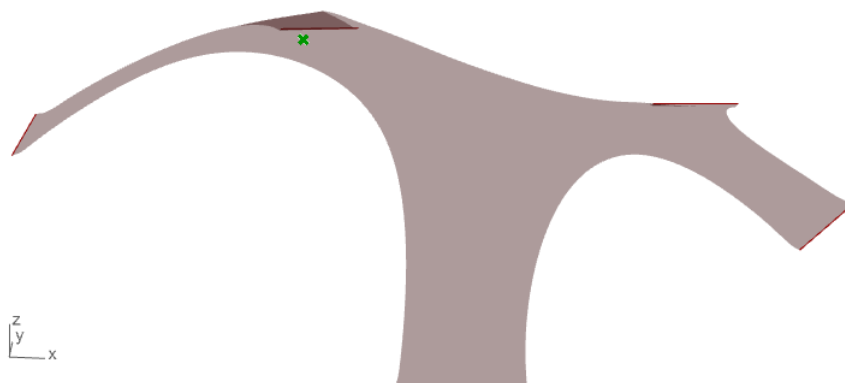


FIGURA C.15: Resolución gráfico del Conjunto 20, vértice utilizado para la posición de la carga puntual dentro de *Grasshopper*

## Apéndice D

# Análisis de Esfuerzos Form-Finding con Ensayo de Cargas 1

Es interesante analizar el comportamiento del modelo realizado por form-finding que trabaja a compresión pura en el ensayo de cargas de 5KN/m<sup>2</sup>.

A continuación, se muestra en la Figura D.1 la longitud en milímetros de los cinco apoyos, los cuáles contienen los nodos dónde se han establecido las condiciones de contorno de forma de encastre y se puede apreciar en la Figura B.27(a).

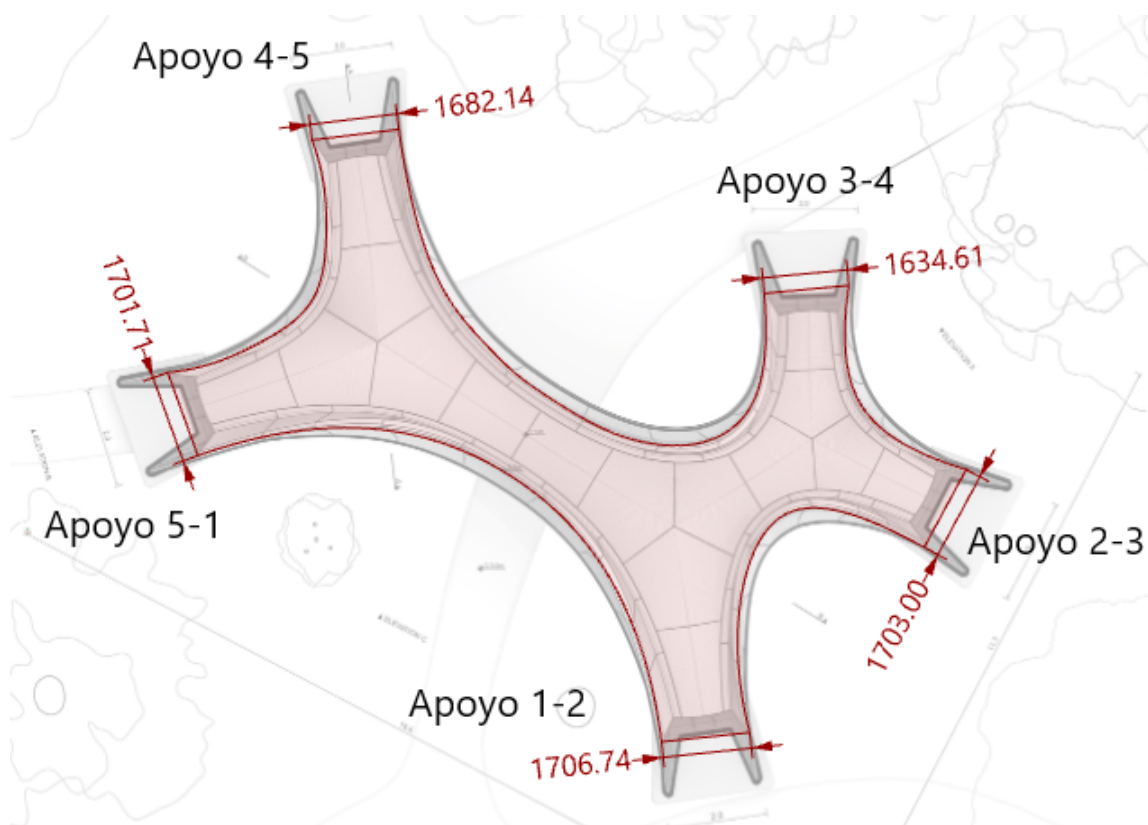
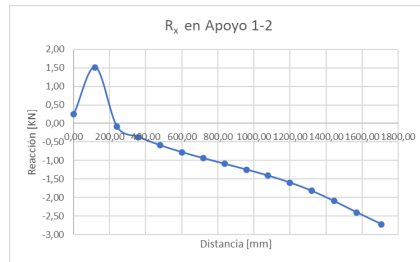


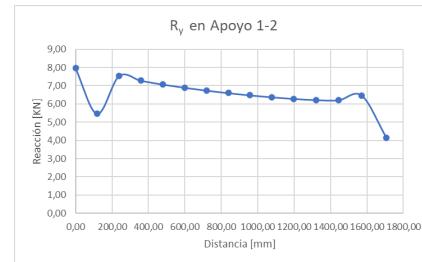
FIGURA D.1: Cotas de apoyos en milímetros

## D.1. Resultados

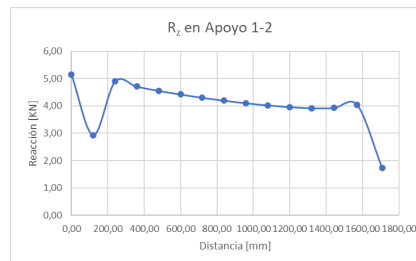
Una vez realizado la modelización dentro de Grasshopper y Karamba 3D, se procede a mostrar los resultados obtenidos. Cabe destacar que los resultados expuestos a continuación representan las reacciones en kN a lo largo de la distancia de cada apoyo en mm.



(a) Reacción en dirección x

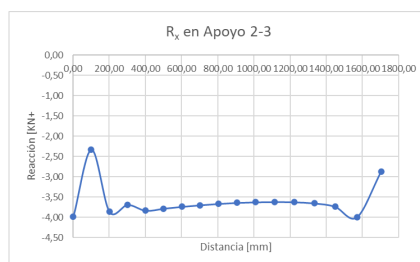


(b) Reacción en dirección y

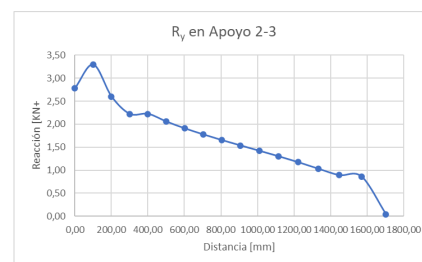


(c) Reacción en dirección z

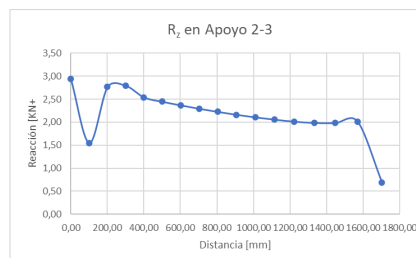
FIGURA D.2: Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 1-2



(a) Reacción en dirección x



(b) Reacción en dirección y



(c) Reacción en dirección z

FIGURA D.3: Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 2-3

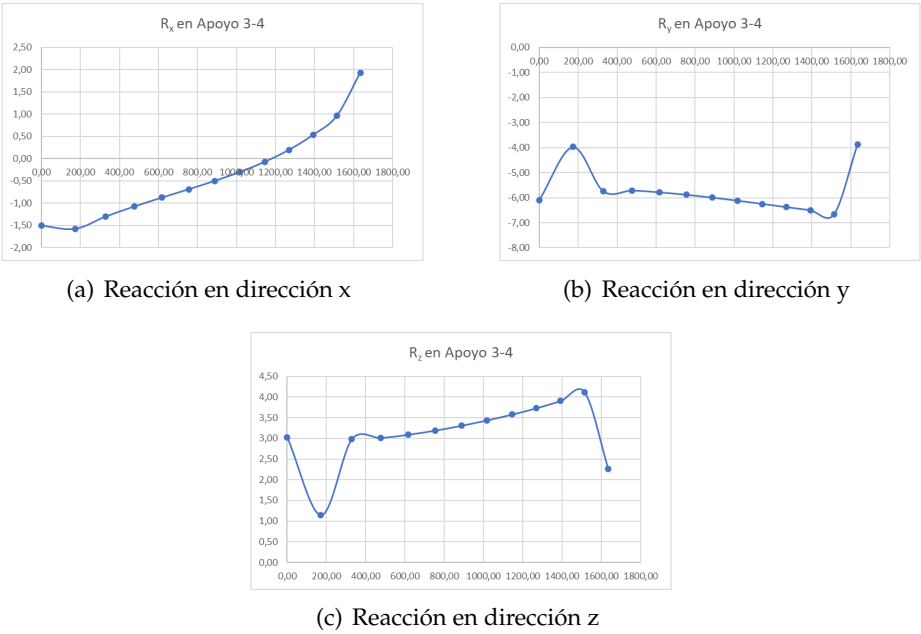


FIGURA D.4: Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 3-4

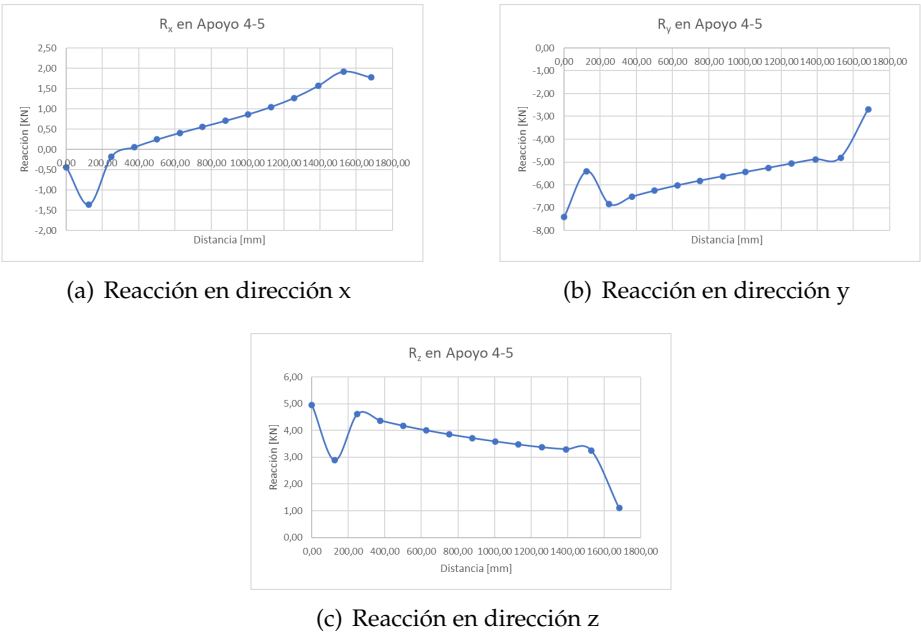


FIGURA D.5: Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 4-5

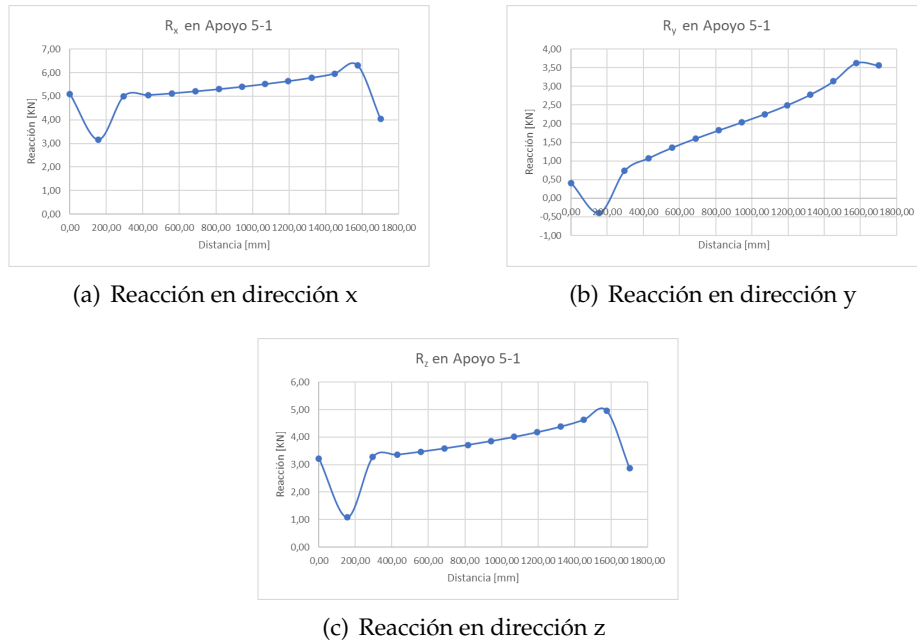


FIGURA D.6: Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 5-1

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en relación a los 3 grados de libertad de momentos. Cabe mencionar que en el eje abscisas está la distancia en milímetros de los nodos y en el eje de coordenadas está el esfuerzo en kNm.

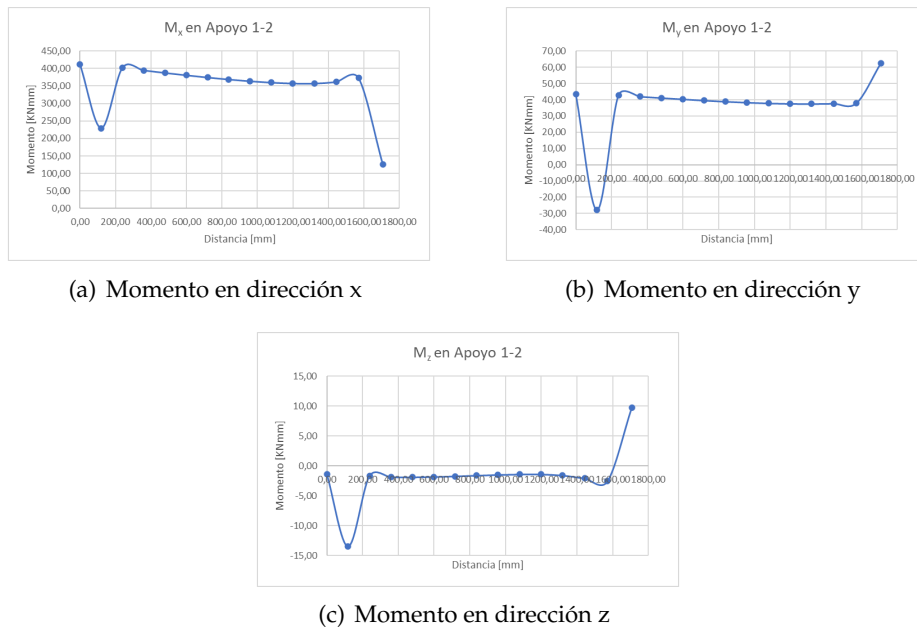
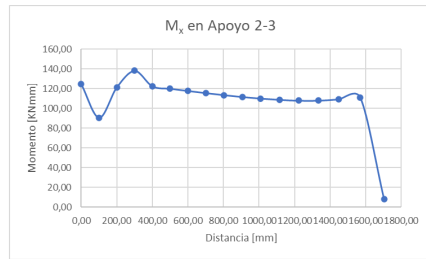
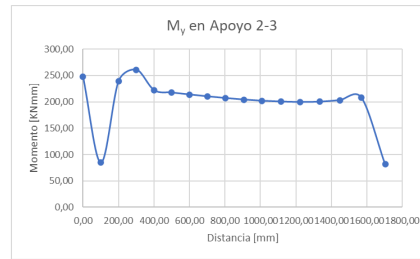


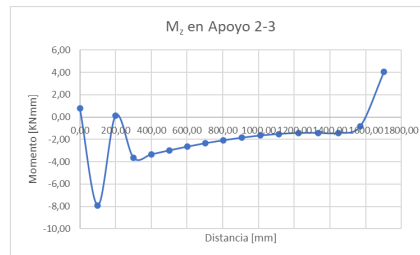
FIGURA D.7: Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 1-2



(a) Reacción en dirección x

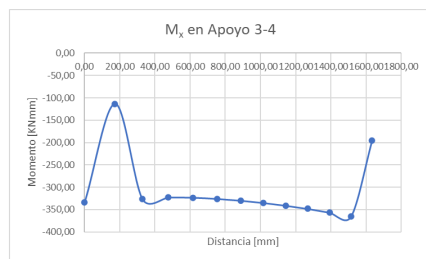


(b) Reacción en dirección y

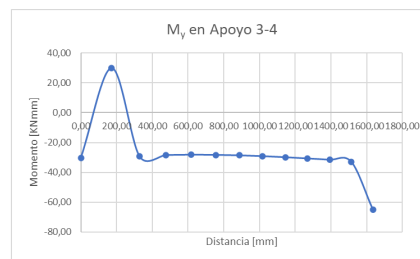


(c) Reacción en dirección z

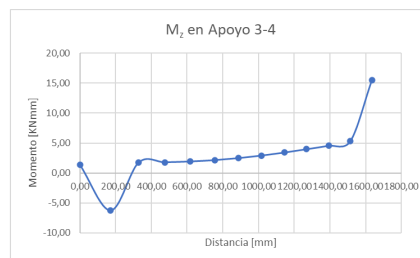
FIGURA D.8: Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 2-3



(a) Reacción en dirección x



(b) Reacción en dirección y



(c) Reacción en dirección z

FIGURA D.9: Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 3-4

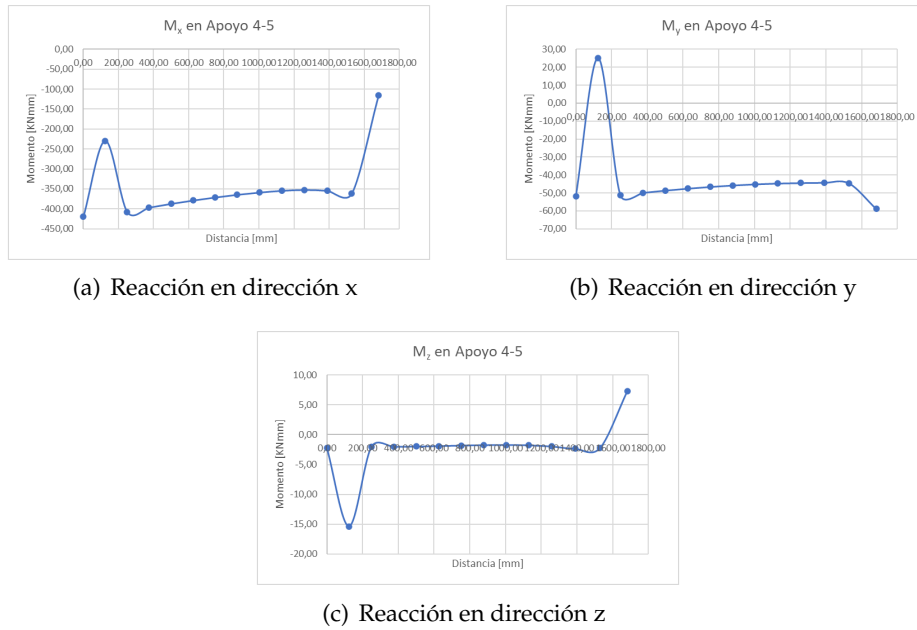


FIGURA D.10: Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 4-5

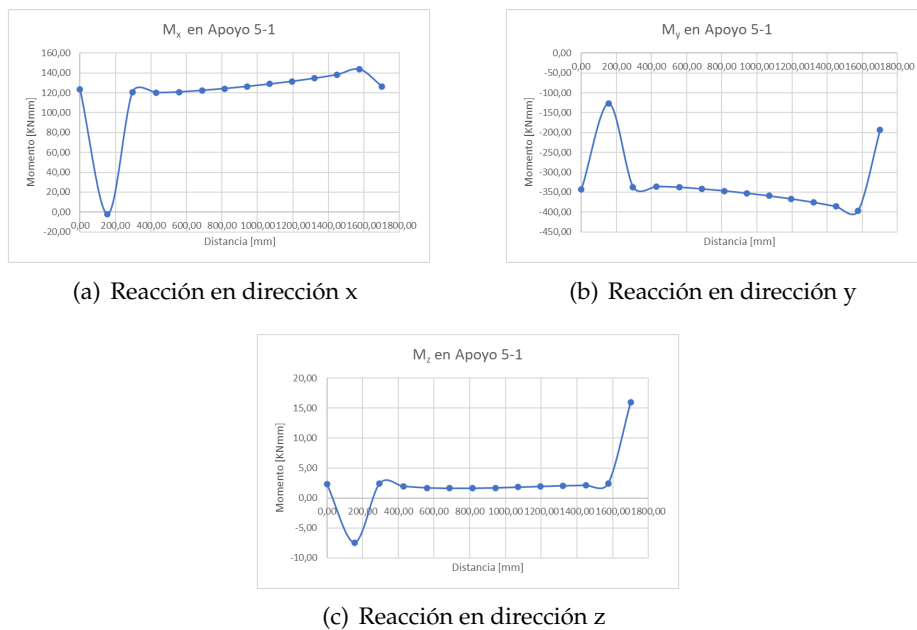


FIGURA D.11: Esfuerzos en las 3 direcciones del Apoyo 5-1

## D.2. Conclusiones

1. En primer lugar comentar la cierta simetría que se reflejan en las gráficas asociadas a las Rz de cada apoyo (véase en Figura D.2(c) ,Figura D.3(c) ,Figura D.4(c) ,Figura D.5(c) ,Figura D.6(c)) siempre obteniendo valores positivos para reaccionar al esfuerzo perpendicular de la pasarela en sentido z y dirección negativa.

2. Tanto en las reacciones asociadas al eje x como las asociadas al eje y, se rompe la simetría de establecerse valores positivos, combinándose también en valores negativos para establecer el equilibrio del sistema, anulándose las componentes en dichas direcciones como se muestra en la Figura D.12.

Total de apoyos		
$\Sigma R_x$	$\Sigma R_y$	$\Sigma R_z$
0	0	239,87
KN		

FIGURA D.12: Sumatorio de reacciones en las 3 direcciones

3. Se observa que los apoyos que más trabajan serían los situados en el semiplano izquierdo, asociados tanto al apoyo 4-5 y al apoyo 5-1. Verificándose, que al disponer en este semiplano con un apoyo menos con respecto al derecho, se debe repartir la misma carga para menos apoyos nodales.
4. En cuanto a las reacciones en momentos, permanece la simetría en el comportamiento de los apoyos en la dirección Z.
5. Los empotramientos que más trabajan a  $M_x$  son tanto el apoyo 1-2 como el apoyo 4-5, siendo contrarios de signo pero de equivalente reacción.





## Apéndice E

# Norma IAP-11

Hoy en día, cualquier tipo de estructura en realización debe ser sometida a cargas que estén contempladas dentro de una norma fidedigna y establecida. Para ello se ha elegido realizar los ensayos de carga a través de la norma IAP (*Instrucciones sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes y carreteras*), la cuál contiene información detallada sobre la definición de acciones y combinaciones, así como el establecimiento de los coeficientes de ponderación, a considerar en el proyecto de puentes de la red de carreteras del Estado en España, véase en la Figura E.1.

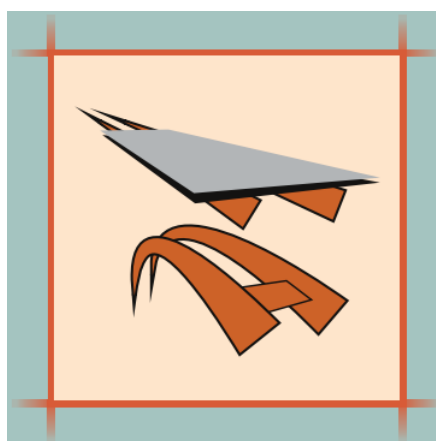


FIGURA E.1: Portada de la norma IAP

Con respecto al proyecto, la estructura que va a ser sometida a estudio se ha considerado que su equivalencia a través de la norma IAP sea una pasarela, y por lo tanto se establecen las siguientes condiciones que refleja el Anexo 4.1.8 *Sobrecarga de Uso en pasarelas* de dicha norma.

1. Ensayo de carga vertical uniformemente distribuida  $q_{fk}$  de valor igual a  $5\text{KN/m}^2$
2. A efecto de comprobaciones locales se considerará un ensayo de carga puntual  $Q_{fwk}$  de valor igual a  $10\text{KN}$



# Bibliografía

- [1] WACLAW ZALEWSKI y EDWARD ALLEN, *Form and Forces* , Massachusetts, EEUU, 2009, página 212.
- [2] «PROYECTOS DE INNOVACIÓN DOCENTE». EN LÍNEA. DISPONIBLE EN: <https://indo.unizar.es/proyecto/10/ficha>
- [3] WACLAW ZALEWSKI y EDWARD ALLEN, *Shaping structures-Statics* , Massachusetts, EEUU, 1998.
- [4] «PAPER». EN LÍNEA. DISPONIBLE EN: <https://link.springer.com/article/10.1007/s44150-022-00051-y>
- [5] «PÁGINA OFICIAL DEL PUENTE STRIATUS». EN LÍNEA. DISPONIBLE EN: <https://www.striatusbridge.com/>
- [6] «HARDENED PROPERTIES OF HIGH-PERFORMANCE PRINTING CONCRETE». EN LÍNEA. DISPONIBLE EN: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884611003255?via>
- [7] «PÁGINA OFICIAL DE KARAMBA 3D». EN LÍNEA. DISPONIBLE EN: <https://www.karamba3d.com>.
- [8] «PÁGINA OFICIAL DE ZAHA HADID ARCHITECTS». EN LÍNEA. DISPONIBLE EN: <https://www.zaha-hadid.com/design/striatus/>.